

웨이블릿 변환 기반 시간-주파수 영역 반사파 계측법을 이용한 활선 상태 전력 케이블의 중복 임피던스 변화 지점 추정

Multi-Impedance Change Localization of the On-Voltage Power Cable Using Wavelet Transform Based Time-Frequency Domain Reflectometry

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

Abstract - In this paper, we propose a multi-impedance changes localization method of on-voltage underground power cable using the wavelet transform based time-frequency domain reflectometry (WTFDR). To localize the impedance change in on-voltage power cable, the TFDR is the most suitable among reflectometries because the inductive coupler is used to inject the reference signal to the live cable. At this time, the actual on-voltage power cable has multi-impedance changes such as the automatic section switches and the auto load transfer switches. However, when the multi-impedance changes are generated in the close range, the conventional TFDR has the cross term interference problem because of the nonlinear characteristics of the Wigner-Ville distribution. To solve the problem, the wavelet transform (WT) is used because it has the linearity. That is, using WTFDR, the cross term interference is not generated in multi-impedance changes due to the linearity of the WT. To confirm the effectiveness and accuracy of the proposed method, the actual experiments are carried out for the on-voltage underground power cable.

Key Words : Multi impedance change, Time-frequency domain reflectometry, Complex wavelet transform, On-voltage power cable, Inductive coupler

1. 서 론

최근 들어 경제적인 손실과 전력 시스템 손상 등의 심각한 문제로 인하여 지중 전력 케이블에서 발생하는 고장에 대한 관심이 높아지고 있다. 이로 인하여, 지중 케이블의 고장을 파악하고 위치를 추정하는 기법이 개발되었으며, 이 중 반사파 계측법은 고장점 위치를 추정하기 위한 대표적인 방법이다. 이러한 반사파 계측법에는 세 가지 방법이 있으며, 시간 영역 반사파 계측법(Time Domain Reflectometry: TDR) [1], 주파수 영역 반사파 계측법(Frequency Domain Reflectometry: FDR) [2], 시간-주파수 영역 반사파 계측법(Time-Frequency Domain Reflectometry: TFDR) [3]-[10]으로 구분할 수 있다. 이러한 반사파 계측법 중에서 TDR과 FDR이 각각 시간 영역과 주파수 영역에서만 기준 신호와 반사 신호를 분석할 수 있는 반면, TFDR은 기준 신호와 반사 신호를 시간-주파수 영역에서 분석하게 된다. 또한, 에너지 분포를 이용하기 때문에 노이즈(noise)에 강인하고, 다른 반사파 계측법에 비해 정확도와 해상도가 높다는 장점을 가

지고 있다 [3]-[7].

이러한 장점으로 인하여 TFDR은 다양한 분야에 적용되어 왔다. TFDR이 적용된 분야는 동축 케이블 [3]-[5], 전력 케이블 [6],[7], 전력 시스템 내의 전기 케이블 [8]-[10] 등이었다. 이 중, 전력 케이블의 경우, 사선 상태 케이블의 고장 진단이거나 [6], 활선일 경우에도 부하가 걸려 있지 않은 경우였다 [7]. 실제 활선 상태 전력 케이블의 고장 진단을 위해서는 전력 계통에 있는 다양한 임피던스의 변화를 고려하여야 한다. 임피던스의 변화는 자동 고장 구분 개폐기(Automatic Section Switch: ASS)와 자동 부하 절환 개폐기(Auto Load Transfer Switch: ALTS)와 같은 스위치 부분에서 발생할 수 있으며, 또한 실제 전력 계통에서는 이러한 임피던스 변화 지점이 근거리에서 있을 경우가 발생하게 된다. 그러나 기존의 TFDR(Conventional TFDR: CTFDR)의 경우 간섭항(cross term)이 발생할 수 있다는 문제가 있다. 이러한 단점은 CTFDR이 시간-주파수 분석법 중 비선형적 특징을 가지고 있는 위그너비-빌 분포(Wigner-Ville Distribution: WVD)를 이용하기 때문이다 [6].

CTFDR을 실제 활선 상태 전력 케이블에 적용함으로써 발생할 수 있는 간섭항 문제를 해결하기 위해 시간-주파수 분석법으로 복소수 웨이블릿 변환(Complex Wavelet Transform: CWT)을 이용한다. CWT는 선형적인 특성을 가진 시간-주파수 분석법이기 때문에 기준 신호와 반사 신호를 분석하는 과정에서 간섭항이 발생하지 않게 된다 [11]. 또한, CWT를 이용하여 기준 신호와 반사 신호를 분석하여 복소수 계수의 크기와 위상 정보를 얻음으로써 파워 시스템에서 발생하는 신호의 불규칙성을 분석할 수 있다

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea.

** Dept. of Electronic Engineering, Kyonggi University, Korea.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea.

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr

Received : November 9, 2012; Accepted : April 12, 2013

[12],[13].

본 논문에서는 활성 상태 지중 전력 케이블에 대한 웨이블릿 변환 기반 시간-주파수 영역 반사파 계측법(Wavelet transform based TFDR: WTFDR)을 제안한다. 제안한 방법에서는 CWT의 장점을 유지하기 위해서, 복소수 모어렛 웨이블릿(Complex Morlet wavelet)을 모 웨이블릿(Mother wavelet)으로 이용한다. 또한 제안한 방법의 효율성과 정확도를 증명하기 위해 실제 활성 상태 지중 전력 케이블에 적용하여 근거리에 위치한 임피던스 변화 지점인 ASS와 ALTS의 위치를 추정하는 실험을 수행한다.

2. 문제 설정

TFDR은 기준 신호와 반사 신호를 시간-주파수 영역에서 동시에 분석하는 방법으로서, 주파수가 선형적으로 증가하고 가우시안 포락선을 갖는 칩 신호를 기준 신호로 이용하게 된다. 기준 신호는 식 (1)과 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.

그림 1에서와 같이 측정된 신호 $c(t)$ 는 식 (2)와 같다.

$$c(t) = s(t) + r(t) \quad (2)$$

여기서 $r(t)$ 는 임피던스 변화 지점에서 반사된 신호이다. 기준 신호와 반사 신호를 시간과 주파수 영역에서 분석하기 위해 CTFDR에서는 시간 주파수 분석을 위해 WVD를 이용하게 된다. 측정된 신호 (2)를 WVD로 변환하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} W_c(t,s) &= \frac{1}{2\pi} \int c^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) c\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int \left(s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) + r\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right)^* \left(s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + r\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= W_s(t,s) + W_r(t,s) + \Xi(t,s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $W_c(t,s)$, $W_s(t,s)$, $W_r(t,s)$ 는 각각 측정된 신호, 기준 신호, 반사 신호의 WVD결과이다. 또한, $\Xi(t,s)$ 는 간섭항이며, *는 켈레 복소수를 의미한다.

고장점 위치를 추정하기 위해서 측정된 신호의 WVD결과에 대한 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수(Normalized Time-Frequency Cross Correlation: NTFCC)를 구해야 한다. 측정된 신호의 NTFCC는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} C_{cs}(t) &= \frac{2\pi}{E_c E_s} \iint W_c(t',\omega) W_s^*(t'-t,\omega) d\omega dt' \\ &= \frac{2\pi}{E_c E_s} \iint (W_s(t',\omega) + W_r(t',\omega) + \Xi(t',\omega)) W_s^*(t'-t,\omega) d\omega dt' \\ &= C_{ss}(t) + C_{rs}(t) + C_{is}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

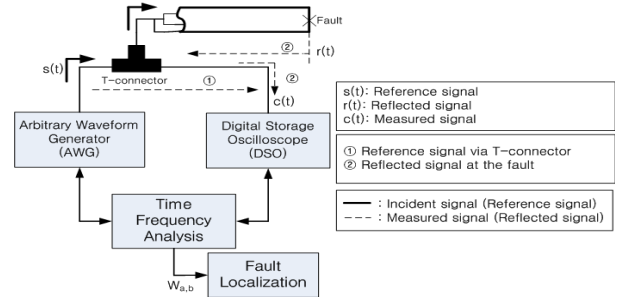


그림 1 CTFDR 시스템 구성도
Fig. 1 Configuration of the CTFDR system

여기서 $C_{ss}(t)$ 는 기준 신호의 정규화된 자기 상관관계 함수이며, $C_{rs}(t)$ 와 $C_{is}(t)$ 는 각각 반사 신호와 간섭항의 NTFCC이다. 또한, E_c 와 E_s 은 각각 측정된 신호와 기준 신호의 에너지 성분으로서, 다음과 같다.

$$E_c = \iint W_c(t,\omega) dt d\omega, \quad E_s = \int \int W_s(t',\omega) dt' d\omega,$$

측정된 신호의 NTFCC 결과, 간섭항의 NTFCC가 나타남을 확인할 수 있다. 특히, $C_{is}(t)$ 가 $C_{rs}(t)$ 와 $C_{ss}(t)$ 에 영향을 줄 정도로 충분히 가깝다면, 구하고자 하는 임피던스의 변화 지점을 추정하는데 오차가 발생할 수 있다.

이를 확인하기 위해 임피던스 변화 지점이 50m와 25m에서 발생한다고 가정하고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이때 기준 신호는 [6]에서 사용한 신호를 사용하였고, 샘플링 효율은 200M sample/s, 전파신호는 1.58×10^8 m/s로 가정한다.

그림 2와 3은 임피던스 변화가 50m 지점에서 발생했을 경우의 NTFCC와 WVD결과이다. 또한 그림 4와 5는 임피던스 변화가 25m 지점에서 발생했을 경우의 NTFCC와 WVD결과이다. 임피던스 변화가 50m에서 발생했을 경우에는 기준 신호와 반사 신호가 충분히 떨어져 있기 때문에 측정 신호를 WVD하게 되더라도 간섭항이 다른 신호에 영향을 주지 않음을 그림 3을 통해 알 수 있다. 그러나, 임피던스 변화가 25m에서 발생하게 되면, 그림 5와 같이 간섭항이 다른 신호의 WVD결과에 영향을 주게 된다.

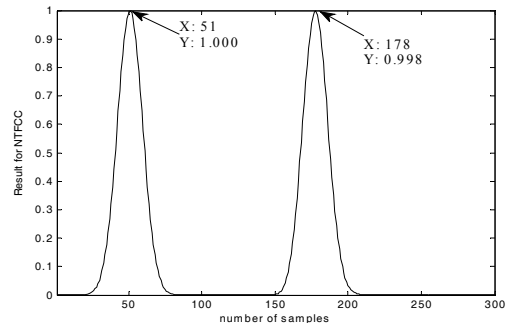


그림 2 50m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 NTFCC결과
Fig. 2 The NTFCC for the measured signal when the distance of impedance change is 50m

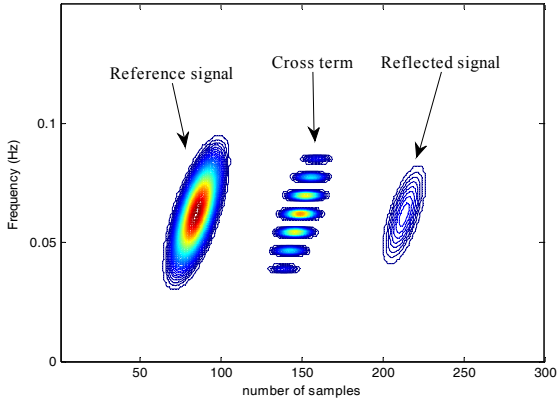


그림 3 50m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 WVD결과

Fig. 3 The WVD for the measured signal when the distance of impedance change is 50m

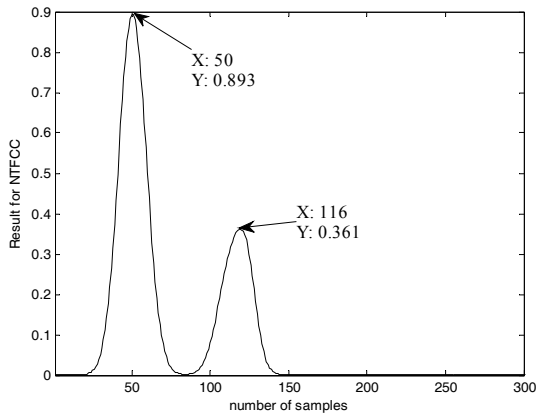


그림 4 25m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 NTFCC결과

Fig. 4 The NTFCC for the measured signal when the distance of impedance change is 25m

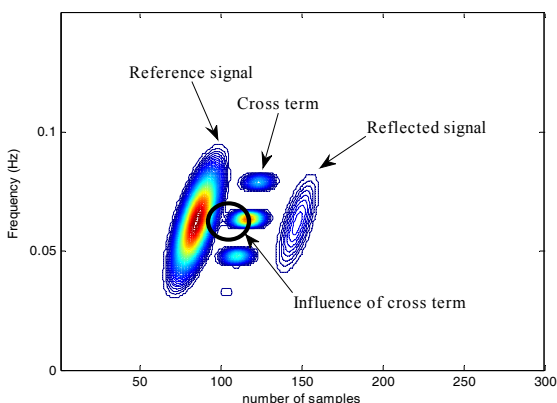


그림 5 25m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 WVD결과

Fig. 5 The WVD for the measured signal when the distance of impedance change is 25m

표 1 CTFDR을 이용한 임피던스 변화 지점 추정

Table 1 Estimation of impedance change location using CTFDR

임피던스 변화 지점 위치 [m]	50	25
샘플 차이	127	66
시간 지연 [ns]	635	330
임피던스 변화 지점 추정 [m]	50.165	26.07
오차율 [%]	0.33	4.28

그림 2와 4를 이용하여 임피던스 변화 지점을 추정된 결과가 표 1에 나타나 있다. 임피던스 변화가 50m 지점에서 발생했을 경우 CTFDR을 통한 추정 결과가 50.165m이며, 오차율은 0.33%이다. 하지만 임피던스 변화가 25m 지점에서 발생했을 경우 CTFDR을 통한 추정 결과가 26.07m이며, 오차율은 4.28%가 된다. 즉, 간섭항으로 인하여 오차율이 커짐을 확인할 수 있다.

3. WTFDR을 이용한 실제 전력 계통에서의 중복 임피던스 변화 추정

3.1 WTFDR을 통한 간섭항 문제 해결

CTFDR의 간섭항 문제를 해결하기 위해 WTFDR을 제안한다. WTFDR은 그림 1에서의 시간 주파수 분석법에 웨이블릿 변환을 사용하여 웨이블릿 변환의 장점을 갖는다. 즉, 웨이블릿 변환의 선형성으로 인하여 간섭항이 발생하지 않게 된다. 이는 다음과 같이 증명된다.

$$\begin{aligned}
 WT_c &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} c(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \\
 &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} (s(t)+r(t)) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \\
 &= WT_s + WT_r
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 a 는 비례 상수이고, b 는 변형 상수이다. ψ 는 모 웨이블릿이며, 모 웨이블릿은 웨이블릿의 허용 조건을 만족시킨다 [14],[15]. 또한, WT_c , WT_s , WT_r 는 각각 측정된 신호, 기준 신호, 반사 신호의 웨이블릿 변환 결과이다. 식 (5)에서 알 수 있듯이, 웨이블릿 변환의 선형성을 인하여 간섭항이 발생하지 않게 된다.

본 논문에서 제안한 WTFDR의 장점을 증명하기 위해 먼저, 2장에서 수행했던 컴퓨터 시뮬레이션을 WTFDR을 통해 다시 해보기로 한다. 이 때 이용되는 모 웨이블릿은 복소 모어렛 웨이블릿이며, 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{(t-b)^2}{f_b}} e^{-j2\pi f_c \frac{t-b}{a}} \tag{6}$$

여기서 f_b 와 f_c 는 각각 주파수 대역폭과 중심 주파수를 나타낸다. 식 (5)를 통해 웨이블릿 변환의 계수를 구할 수 있으며, 기준 신호와 반사 신호의 계수의 최고점을 통해 시간차

를 구하고, 케이블의 전파속도를 이용하여 고장점의 위치를 추정할 수 있게 된다.

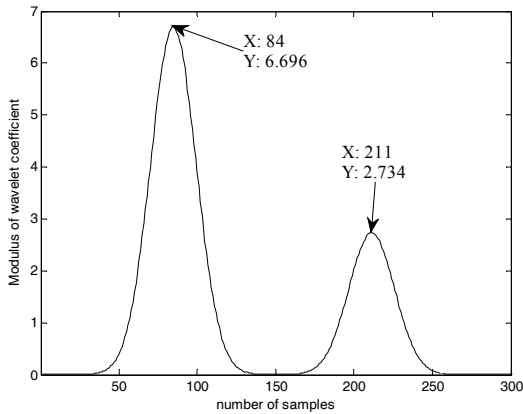


그림 6 50m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 WTFDR결과

Fig. 6 The WTFDR result for the measured signal when the distance of impedance change is 50m

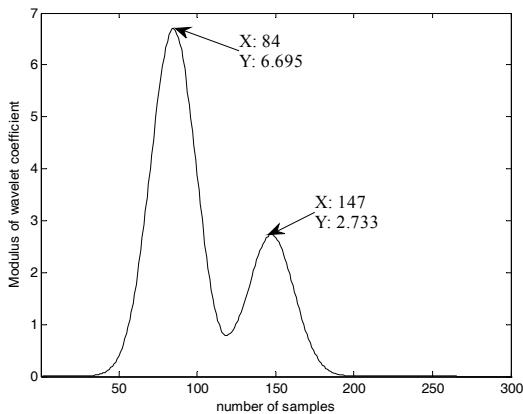


그림 7 25m지점에서 임피던스 변화가 발생했을 경우, 측정 신호의 WTFDR결과

Fig. 7 The WTFDR result for the measured signal when the distance of impedance change is 25m

표 2 WTFDR을 이용한 임피던스 변화 지점 추정

Table 2 Estimation of impedance change location using WTFDR

임피던스 변화 지점 위치 [m]	50	25
샘플 차이	127	63
시간 지연 [ns]	635	315
임피던스 변화 지점 추정 [m]	50.165	24.885
오차율 [%]	0.33	0.46

그림 6과 7을 이용하여 임피던스 변화 지점을 추정한 결과가 표 2에 나타나 있다. 임피던스 변화가 50m 지점에서 발생했을 경우 WTFDR을 통한 추정 결과가 50.165m이며, 오차율은 0.33%이다. 이는 CTFDR과 같은 결과를 보이고

있다. 하지만 임피던스 변화가 25m 지점에서 발생했을 경우 CTFDR을 통한 추정 결과가 24.885m이며, 오차율은 0.46%가 된다. 이는 CTFDR의 결과와 비교했을 때, 향상된 오차율을 가지고 있으며, 이는 간섭항을 제거하였기 때문이다. 따라서 간섭항이 발생했을 때, WTFDR의 효율성을 입증할 수 있다.

3.2 실제 전력계통 및 실증 선로실험을 위한 시스템구성

실제 활선 상태의 전력 계통은 직선 접속재, ASS, ALTS 등이 케이블에 연결되어 있어서, 고장이 발생하지 않더라도 많은 임피던스 변화 지점이 발생한다. 또한, 이러한 임피던스 변화 지점은 상호 간 가까운 지점에 포설되어 있는 경우도 있다. 본 논문에서는 연세대학교 내 중앙 변전소에서 실제로 실험을 수행하였으며, 이 경우 측정위치에서 30m지점과 42.5m 지점에 ASS와 ALTS가 각각 설치되어 있다. 이렇게 임피던스 변화 지점이 상호 간 근거리에서 발생했을 경우, CTFDR로 그 위치를 각각 추정하게 되면 간섭항으로 인한 간섭 현상이 심화된다.

본 논문에서 제안한 WTFDR의 효율성과 정확도를 증명하기 위해 활선 상태 지중 전력 케이블에 적용한다. 이 때, 대상 케이블은 325sq의 22.9kV급 FR CNCO-W 지중 전력 케이블이며, 실제 활선에서의 실험을 위해 비접촉식 커플러가 이용된다. 실증 선로 실험을 위한 시스템 구성도는 그림 8과 같다. 이 때, PXI(PCI eXtensions for Instrumentation) 타입의 시스템이 이용되며, 이 시스템은 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator: AWG)와 디지털 오실로스코프(Digital Storage Oscilloscope: DSO)로 구성되어 있다. 이 실험 장비의 사양은 표 3에 나타내었다. 또한, 활선 상태에서 무정전 실험을 하기 위해 비접촉식 커플러를 이용하여 기준 신호를 인가하고 반사 신호를 측정하게 되며, 실제 실험 구성은 그림 9와 같다. 이 때, 기준 신호의 중심 주파수와 주파수 대역폭은 [6]과 같게 하며, 시간 폭은 신호의 SNR을 고려하여 700ns로 결정하였다.

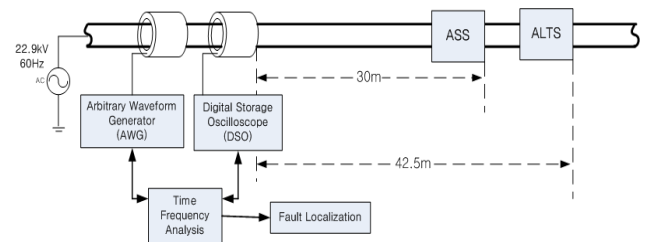


그림 8 실증 실험을 위한 WTFDR 시스템 구성도

Fig. 8 Configuration of the CTFDR system for actual on voltage experiment

표 3 실험 장비 사양

Table 3 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 9 실제 실험 구성
 Fig. 9 Actual experimental setup

3.3 실험 결과 및 분석

활선 상태 실증 선로는 중복의 임피던스 변화 지점이 존재하며, 각 임피던스 변화 지점은 근거리에 위치해 있는 경우가 있다. 연세대학교 내 중앙 변전소의 경우 측정위치에서 30m지점과 42.5m 지점에 ASS와 ALTS가 각각 설치되어 있으며, 각각의 반사 신호는 간섭항으로 인한 간섭 현상이 일어나기에 충분히 가까운 거리이다. 그림 10은 활선 상태 실증 선로에서 취득한 데이터에 CTFDR을 적용한 결과이며, 그림 11은 WTFDR을 적용한 결과이다. 그림 10에서 알 수 있듯이, CTFDR을 적용하게 되면, 반사파의 결과값 한 부분만 나타나게 되며, 이는 ALTS에서 반사되어 나온 신호의 NTFCC결과임을 알 수 있다. 이와 달리 WTFDR을 적용하게 되면, 그림 11과 같이 중복된 부분에서 최대 값이 나타나게 되며, 이는 ASS와 ALTS에서 반사된 신호 모두 웨이블릿 상수가 나오게 됨을 확인할 수 있다. 실험 결과는 표 4에 나타나 있다. CTFDR의 결과 ASS의 위치는 알 수 없으며, ALTS까지의 거리는 7.81%의 오차가 있다. 그에 반해 WTFDR의 결과는 ASS 1.25%, ALTS 2.23%의 오차로 CTFDR에 비해 정확한 결과를 확인할 수 있었다.

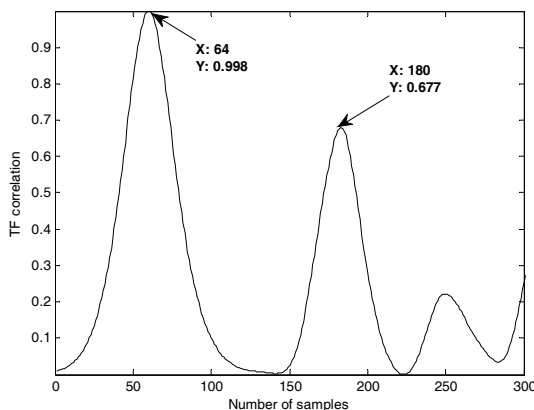


그림 10 근거리 중복 임피던스 변화가 있는 활선 상태 전력 케이블의 측정 신호에 대한 CTFDR 결과

Fig. 10 The CTFDR result of the measured signal for on-voltage power cable with multi impedance change at the close range

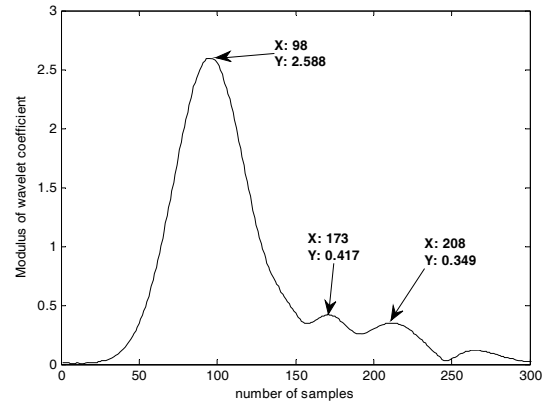


그림 11 근거리 중복 임피던스 변화가 있는 활선 상태 전력 케이블의 측정 신호에 대한 WTFDR 결과

Fig. 11 The WTFDR result of the measured signal for on-voltage power cable with multi impedance change at the close range

표 4 임피던스 변화 지점 추정 결과

Table 4 Estimation of impedance change location

	CTFDR		WTFDR	
	ASS	ALTS	ASS	ALTS
거리 [m]	-	45.82	29.63	43.45
오차율[%]	-	7.81	1.25	2.23

4. 결 론

본 논문에서는 활선 상태 전력 케이블에 있는 중복의 임피던스 변화 지점 추정을 위한 WTFDR 알고리즘을 개발하였다. 활선 상태에서 임피던스 변화 지점을 추정하기 위해서는 비접촉식 커플러가 필요하며, 이는 TFDR이 활선 상태 전력 케이블을 측정하기 위한 방법 중 가장 유용한 방법이라는 것을 나타낸다. 이 때, 실증 선로에서는 ASS와 ALTS와 같은 임피던스 변화 지점이 근거리에 존재할 가능성이 있다. 하지만, 근거리에서 임피던스 변화가 있을 경우에 CTFDR을 적용하게 되면, WVD의 비선형성으로 인한 간섭항 문제가 발생하게 된다. 간섭항은 임피던스 변화 지점을 추정할 때, 오차를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 WTFDR을 적용하였다. WT의 선형성으로 인하여 근거리에서 임피던스 변화가 중복으로 일어나도 간섭항이 발생하지 않는다. 제안한 방법의 정확성과 효율성을 입증하기 위해 연세대학교 내 중앙 변전소의 활선 상태 전력 케이블에서 실험을 수행하였으며, 이를 통해 근거리의 ASS와 ALTS의 위치를 추정하였다.

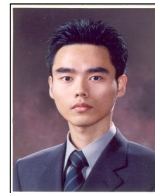
감사의 글

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

References

- [1] R. Papazyan and R. Eriksson "Calibration for time domain propagation constant measurements on power cables," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 52, no. 2, pp. 415-418, Apr., 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] S. H. Lee, J. B. Park and Y. H. Choi, "Wavelet-transform-based time-frequency domain reflectometry for reduction of blind spot," Measurement Science and Technology, vol. 23, no. 6, 065004, May, 2012.
- [7] S. H. Lee, C. K. Lee, J. B. Park and K. S. Kwak, "Impedance change localization for live underground cable using time-frequency domain reflectometry," IEICE Electronics Express, vol. 9, no. 5, pp. 359-364, Mar., 2012.
- [8] 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.
- [9] J. Wang, P. Crapse, Y. J. Shin and R. A. Dougal, "Diagnostics and prognostics of electric cables in nuclear power plants via joint time-frequency domain reflectometry," Proc. of IEEE International Symposium Electrical Insulation, pp. 24-27, Jun., 2008.
- [10] J. Wang, P. Crapse, Y. J. Shin and R. A. Dougal, "Diagnostics and prognostics of electric cables in ship power systems via joint timefrequency domain reflectometry," Proc. of IEEE International Conf. on Instrumentation and Measurement Technology, pp. 917-921, May, 2008.
- [11] J. C. Goshwami and A. K. Chan, Fundamentals of wavelets: theory, algorithms, and application, New York: Wiley, 1999.
- [12] P. Shukla, "Complex wavelet transforms and their applications," M.S. thesis, Dept. Electronic and Electrical Eng., Univ. Strathclyde, Glasgow, U.K., 2003.
- [13] 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.
- [14] L. G. Weiss, "Wavelets and wideband correlation processing," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan., 1994.
- [15] 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, ADP기반 최적 제어.



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.