

시간-주파수 영역 반사파 계측법 기반 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함 위치 추정 연구

Localization of Concentric Neutrals Corrosion on Live Underground Power Cable Based on Time-frequency Domain Reflectometry

이 춘 구* · 윤 태 성** · 박 진 배†
(Chun Ku Lee · Tae Sung Yoon · Jin Bae Park)

Abstract - In this paper, we propose a time-frequency domain reflectometry (TFDR) based measurement method for localizing concentric neutrals corrosion on live underground power cable. It consists of two inductive couplers which can transmit the reference signal into live underground power cable and measure the reflected signals from the impedance discontinuities of concentric neutrals corrosion. In order to compensate the dispersion of the measured reflected signal via inductive coupler, an equalizer based on Wiener filtering is designed. To improve the localizing performance of concentric neutrals corrosion in the vicinity of the measurement point, the reference signal is removed from the measured reflected signals. The localization performance of the proposed method is verified by the concentric neutrals corrosion localization experiment.

Key Words : Fault localization, Time-frequency domain reflectometry, Chirp signal, Concentric neutrals corrosion, Wiener filtering, Equalizer, Underground power cable

1. 서 론

지중 전력 케이블은 포설 이후 전기적, 열적, 화학적 스트레스에 장기간 노출됨에 따라 경년 열화가 진행되며, 국부적인 결함으로 인해 절연 파괴가 발생할 수 있다 [1]. 현재 배전 계통에 주로 포설된 가교 폴리에틸렌 (XLPE)을 절연물질로 사용하는 지중 전력 케이블의 경우 열화가 진행됨에 따라 절연층에 수트리, 전기 트리 등이 발생할 수 있으며, 외부 시스층의 손상으로 인한 중성선 부식 (corrosion)과 같은 결함이 발생할 수 있다. 지중 전력 케이블을 구성하는 절연층이나 중성선의 결함은 지중 전력 케이블 시스템의 고장으로 진행 될 수 있기 때문에 사전에 결함을 검출하고 보수하는 것이 중요하다. 지중 전력 케이블을 진단하기 위한 기법으로 부분 방전 (partial discharge) 진단법, very low frequency (VLF) $\tan\delta$ 법, 시간 영역 반사파 계측법 (time domain reflectometry) 등이 개발되었다 [2]. 부분 방전 진단법, VLF $\tan\delta$ 법은 전력 케이블의 절연층의 열화를 검출 및 진단하기 위한 기법으로, 부분 방전 진단법은 절연층 내 공극에 의한 부분 방전 신호를 측정함에 따라 절연층 결함 지점을 측위할 수 있는 반면에 $\tan\delta$ 기법은 전력 케이블 전체

절연층의 상태만을 진단할 수 있다. 시간 영역 반사파 계측법으로 대표되는 기존의 반사파 계측법은 주로 중성선 부식, 접속재, 스위치, 부상, 불량 접속 지점 등과 같이 전력 케이블 내 특성 임피던스 불일치 지점을 검출하기 위하여 개발되었다.

절연층의 열화 및 결함 진단 기법들은 절연층의 결함에 서 발생하는 신호를 취득하거나, 외부 전원을 이용하여 절연층의 특성 변화를 진단하는 방식으로 꾸준히 연구 되어 왔다. 그러나, 중성선 결함 진단에 대한 연구는 시간 영역 반사파 계측법을 이용하여 직매식으로 포설된 외부 시스층이 없는 지중 전력 케이블에 적용한 연구 이후 미미한 상태이다 [3]. 중성선은 불평형 전류를 분담하고 지락 전류의 역 유입을 차단하는 역할을 하기 때문에 중성선 결함은 지중 전력 케이블 시스템의 안전성에 영향을 준다. 또한 중성선 결함은 외부의 습분이나 이물질이 절연층에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 내포하므로, 이를 사전에 검출하여 보수하는 것이 필요하다. 기존의 중성선 결함 검출 기법은 사전 상태 지중 전력 케이블만 진단 할 수 있기 때문에 진단 시 정전이 수반되는 단점이 있다 [3]. 또한 시간 영역 반사파 기법은 주변 잡음에 취약하여 활선 상태 지중 전력 케이블에 적용할 경우 주변 잡음으로 인한 결함 위치 검출 오차가 발생할 수 있다 [4]. 따라서 본 논문에서는 잡음에 강인하며, 지중 전력 케이블의 전파 특성에 맞게 기준 신호 설계가 가능하여 전력 케이블의 전파 특성에 의한 감쇠를 최소화 할 수 있는 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 기반으로, 비접촉식 커플러를 이용하여 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함 위치를 측정하는 시스템을 제시하고자 한다. 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함을 검출하기 위한 기준

* Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea.

** Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea.

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

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr

Received : October 2, 2012; Accepted : January 18, 2013

신호 설계, 비접촉식 커플러 사용과 지중 전력 케이블에 의한 신호의 감쇠 및 변형을 보상하기 위한 등화기 설계를 통해 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결합 검출에 적합한 시스템을 설계하고, 내전압기를 이용한 활선 상태 지중 전력 케이블의 모의 중성선 결합 위치를 추정하는 실험을 통해 제시한 시스템의 성능을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시간-주파수 영역 반사파 계측법

시간-주파수 영역 반사파 계측법에서 기준 신호로 사용되는 가우시안 포락선 선형 첩 신호 (Gaussian enveloped linear chirp signal)는 식 (1)과 같이 주어진다 [5].

$$s_k = Ae^{-\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} \cos\left(\frac{\beta}{2}k^2 + \omega_0 k + \phi\right) \quad (1)$$

여기서 $k = nT_s$ ($n = 1, 2, \dots, N$), T_s 는 샘플링 주기, A 는 크기, m 은 신호의 시간 중심, σ 는 시간 폭 조절 파라미터, β 는 각주파수 증가율, ω_0 는 시작 각주파수 그리고 ϕ 는 위상을 나타낸다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 지중 전력 케이블의 전파 특성에 따라 주파수 대역과 시간 폭을 조절할 수 있는 장점이 있다. 또한 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 일종의 압축 (compressed) 신호로서 수신단을 정합 필터 (matched filter)로 구성하는 경우 분해능과 반사파의 신호 대 잡음비를 동시에 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 기존의 반사파 계측법인 시간 영역 반사파 계측법의 분해능은 인가한 펄스의 폭에 반비례하고, 신호 대 잡음비는 펄스 폭에 비례하기 때문에 기준 신호 설계에 있어서 분해능과 신호 대 잡음비간의 절충이 필요하다. 반면에 시간-주파수 영역 반사파 계측법의 분해능은 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 주파수 대역에 비례하며, 반사파의 신호 대 잡음비는 인가한 기준 신호의 시간 폭에 비례한다. 따라서 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 주파수 대역과 시간 폭을 증가시키면 반사파 계측 시스템의 분해능과 반사파 신호의 신호 대 잡음비를 동시에 향상시킬 수 있으며 지중 전력 케이블의 전파 특성과 계측 시스템의 제한 조건을 고려하여 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 설계할 수 있다 [6].

본 논문에서는 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결합을 검출하고 결합 위치를 추정하기 위해서 비접촉식 커플러를 이용한 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 구축하였다. 시간-주파수 영역 반사파 계측시스템은 기준 신호를 발생시키는 임의파형 발생기, 반사파를 취득하는 디지털 오실로스코프, 그리고 2개의 비접촉식 커플러로 구성되며, 이는 그림 1과 같다. 두 개의 비접촉식 커플러는 지중 전력 케이블의 시스템에 직렬로 설치되며, 비접촉식 커플러(a)를 이용하여 기준 신호를 활선 상태 지중 전력 케이블에 인가하고, 비접촉식 커플러(b)를 이용하여 임피던스 불일치 지점에서 반사된 신호를 취득한다.

디지털 오실로스코프로 취득된 반사파는 감쇠되고 시간이

지연된 기준 신호로 모델링 될 수 있으며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$r(k) = \sum_{i=1}^M \alpha_i A_i e^{-\frac{(k-m-d_i)^2}{2\sigma^2}} \cos\left(\frac{\beta}{2}(k-d_i)^2 + \omega(k-d_i) + \phi\right) + v_k \quad (2)$$

여기서 M 은 총 반사파 개수, α_i 는 i 번째 반사파의 감쇠 상수, d_i 는 i 번째 반사파의 시간 지연을 나타내며, v_k 는 분산이 Q 인 영평균 백색 잡음을 나타낸다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템에서 두 개의 비접촉식 커플러는 직렬로 연결되어 있으므로, 지중 전력 케이블에 인가한 기준 신호는 두 비접촉식 커플러 간의 직접 경로 (direct path)를 통하여 디지털 오실로스코프로 취득된다. 따라서 취득한 반사파에는 인가한 기준 신호 성분이 포함되어 있다. 식 (2)의 반사파 모델에서 $i=1$ 은 인가한 기준 신호를 나타낸다.

시간-주파수 영역 반사파 계측법은 기준 신호와 반사파에 해당하는 시간-주파수 영역 분포들 간의 상관성을 이용하여 임피던스 불일치 지점을 추정한다. 시간-주파수 영역 반사파 계측법은 먼저 위그너-빌 분포 (Wigner-ville distribution)를 이용하여 인가한 기준신호와 반사파의 시간-주파수 영역 에너지 분포를 구한다. 위그너-빌 분포는 식(3)과 같이 표현된다 [7].

$$W_s(n, m) = \sum_{k=-k_n}^{k_n} s_a(p_{n,k}) s_a^*(q_{n,k}) e^{-j2\pi mk/2N} \quad (3)$$

여기서 s_a 는 해석적 신호 (analytic signal), $k_n = \min(2n, 2N-1-2n)$, $p_{n,k} = \lfloor n+k/2 \rfloor$, $q_{n,k} = \lfloor n-k/2 \rfloor$ 를 나타낸다. $\lfloor x \rfloor$ 는 x 를 넘지 않는 가장 큰 정수를 의미한다.

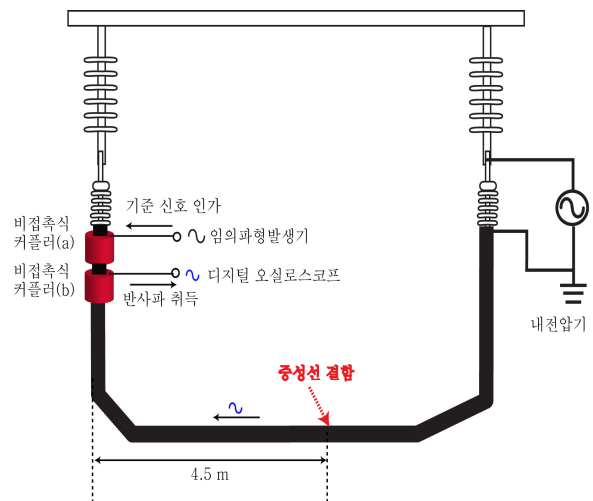


그림 1 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템

Fig. 1 Time-frequency domain reflectometry system

그런 다음 위그너-빌 분포를 이용하여 계산된 기준 신호와 반사파의 시간-주파수 영역 분포 간의 정규화된 상관 함수를 계산한다. 위그너-빌 분포 기반 정규화된 시간-주파수 영역 상호 상관함수는 다음과 같이 주어진다 [7].

$$C_{sr}(n) = \frac{1}{2N\sqrt{E_s E_r}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{2N-1} W_s(n', m') W_r(n' - m, m') \quad (4)$$

여기서

$$E_s = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{2N-1} W_s(n', m') \quad (5)$$

$$E_r = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{2N-1} W_r(n' - n, m') \quad (6)$$

E_s 는 시간-주파수 영역에서의 기준 신호 에너지, E_r 은 시간-주파수 영역에서의 반사파 에너지, W_s 는 기준 신호의 위그너-빌 분포, 그리고 W_r 은 반사파의 위그너-빌 분포를 나타낸다. 정규화된 상관 함수는 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 인가한 기준신호와 유사함을 의미한다. 정규화 된 시간-주파수 영역 상호 상관관계 함수에서 기준 신호와 반사파에 해당하는 피크점 간의 시간 지연을 계산함으로써 중성선 결합의 위치를 추정하게 된다. 기준 신호와 반사파에 해당하는 시간-주파수 상호 상관 관계 함수의 피크점간의 시간 지연을 d 라고 하면, 계측 지점으로부터 중성선 결합까지의 거리는 식 (7)과 같다.

$$L_{fault} = \frac{VOP \times d}{2} \quad (7)$$

여기서 VOP 는 지중 전력 케이블 내 전자기 신호 전파 속도이다.

2.2 비접촉 커플러 및 전력 케이블에 의한 신호의 왜곡

본 논문에서는 지중 전력 케이블의 중성선 결합을 활성 상태에서 진단하기 위해서, 비접촉식 커플러를 이용하여 기준신호를 인가하고 반사파를 취득한다. 일종의 대역통과 필터인 비접촉식 커플러를 이용해 지중 전력 케이블에 인가된 기준 신호는 비접촉식 커플러의 주파수 특성에 의해 신호가 감쇠되거나 변형된다. 이는 기준 신호와 반사파 간의 상관 정도를 저하시키는 원인으로 반사파 계측 시스템의 중성선 결합 검출능력을 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Wiener 필터링 기법을 적용하여 비접촉식 커플러와 지중 전력 케이블이 결합된 모델의 전달함수를 추정하고 이를 기반으로 등화기 (equalizer)를 설계한다. 등화기 설계를 통해 비접촉식 커플러와 지중 전력 케이블에 의한 신호의 변형과 감쇠를 보상하여 지중 전력 케이블 내 임피던스 불일치 지점의 위치 추정 성능을 향상 시키고자 한다. 비접촉식 커플러와 전력 케이블이 결합된 모델의 전달 함수를 $H(f)$ 라 하면, 비접촉식 커플러 간의 직접 경로를 통과하여 취득된 기준 신호는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$Y(f) = H(f)S(f) \quad (8)$$

여기서 $S(f)$ 는 기준 신호 $s(k)$ 의 푸리에 변환을 나타내며, $Y(f)$ 는 직접 경로를 통과한 뒤 비접촉식 커플러를 통하여 취득된 신호의 푸리에변환을 나타낸다. Wiener 필터링을 이

용하여 추정된 비접촉식 커플러와 지중 전력 케이블이 결합된 모델의 전달함수는 식 (9)와 같이 표현된다 [8].

$$\hat{H}(f) = Y(f) \frac{S^*(f)}{|S(f)|^2 + \lambda} \quad (9)$$

여기서 λ 는 최적화 파라미터를 나타내며, $S^*(f)$ 는 $S(f)$ 복소공액 (complex conjugate)을 나타낸다.

Wiener 필터를 이용하여 추정된 비접촉식 커플러-지중 전력 케이블 결합 모델의 전달함수를 이용하여 등화기를 설계 할 수 있다. Wiener 필터 기반 등화기는 식 (10)과 같다.

$$H^{eq}(f) = \frac{P_{ss} \hat{H}^*(f)}{P_{ss}(f) |\hat{H}(f)|^2 + P_{vv}(f)} \quad (10)$$

여기서 P_{ss} 는 신호의 파워스펙트럼, $\hat{H}(f)$ 는 Wiener 필터링을 이용하여 추정된 비접촉식 커플러와 지중 전력 케이블이 결합된 모델의 전달함수, $\hat{H}^*(f)$ 는 $\hat{H}(f)$ 의 복소공액, P_{vv} 는 노이즈의 파워스펙트럼을 의미한다. 본 논문에서는 식 (10)과 같이 설계된 등화기를 이용하여 비접촉식 커플러와 전력 케이블에 의한 신호의 변형을 보상하고자 한다.

2.3 기준 신호 제거

앞서 언급한 바와 같이 활성 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결합을 검출하기 위한 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 비접촉식 커플러가 직렬로 설치되는 구조적인 특성으로 인하여 기준 신호성분이 취득한 반사파에 포함된다. 인가한 기준 신호의 시간 폭 보다 짧은 시간 동안에 반사파가 유입되면, 기준 신호와 반사파간의 중첩이 발생하여, 결합 위치 검출에 오차를 유발하게 된다. 이는 곧 지중 전력 케이블 내 중성선 결합 지점이 측정 지점에 근접한 경우, 중성선 결합 검출 능력이 저하됨을 의미한다. 이러한 중성선 결합 검출 저하 현상을 방지하기 위해서 취득한 반사파 신호에서 인가한 기준 신호를 제거할 필요가 있다. 반사파에 포함된 기준 신호는 정보를 알고 있는 신호이기 때문에 시간적으로 매칭만 된다면, 반사파에서 기준신호 성분을 제거할 수 있다. 앞서 설계한 등화기를 통하여 복원된 반사파는 등화기 설계 시 사용한 기준 신호와 시간적으로 매칭되어 있기 때문에 등화기를 통과하여 취득한 반사파에서 기준 신호를 빼면 된다. 기준 신호가 제거된 반사파는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$r^{ISC}(k) = r^{EQ}(k) - s(k) \quad (11)$$

여기서 r^{ISC} 는 기준 신호가 제거된 반사파를 나타내며, r^{EQ} 는 등화기를 통해 복원된 반사파를 나타낸다. 기준 신호가 제거된 반사파와 기준 신호간의 시간 주파수 상호 상관 관계 함수를 구하여 이로부터 중성선의 결합위치를 검출한다. 활성 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결합 위치 검출 알고리즘 순서도는 그림 2와 같다.

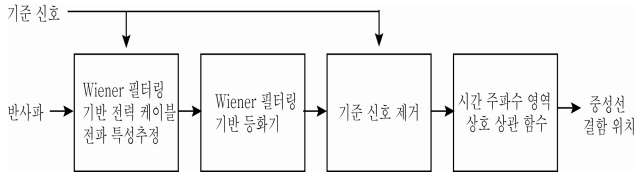


그림 2 활선 상태 지중 전력 케이블 중성선 결함 위치 검출 알고리즘 순서도

Fig. 2 Flow of the algorithm of the proposed method

2.4 실험 환경 및 조건

활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함 위치 추정 실험을 통해 제안한 기법의 성능을 평가하기 위해, 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 구축하였다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 National instruments (NI)사의 PCI extensions for instrumentation (PXI)타입으로 구축되었으며, 구성요소로서 가우시안 포락선 선형 칩 신호를 발생시키기 위한 임의파형 발생기(NI-PXI 5422), 반사파 취득을 위한 디지털 오실로스코프(NI-PXI 5124), 계측기기를 제어하기 위한 컨트롤러 (NI-PXI 8105), 그리고 활선 상태 지중 전력 케이블에 기준 신호를 인가하고 반사파를 취득하기 위한 2개의 비접촉식 커플러 (MTR-ICU-H28)가 사용되었다.

실험 시료인 지중 전력 케이블은 22.9kV 수밀형 저독성 난연 동심 중성선 케이블 (FR-CNCO-W)로서 절연체는 가교 폴리에틸렌 (XLPE)으로 구성되어 있고 중심 도체의 단면적은 $60mm^2$ 이며, 중성선은 총 18가닥으로 반도전층 위에 동심으로 감겨져 있다. 실험 대상 지중 전력 케이블의 총 길이는 10m이며 양 종단은 활선 실험을 위하여 종단 접속재로 시공하였다. 지중 전력 케이블의 중성선 결함을 모의하고 중성선 결함 정도에 따른 결함 위치 추정 성능을 시험하기 위해서 지중 전력 케이블 종단으로부터 5m지점의 시스와 수밀형 부품을 테이프를 0.1m 제거한 후, 중성선을 각각 1, 4, 8, 13, 18가닥 절단해 가면서 실험을 진행하였다. 단선된 중성선의 숫자가 증가할수록 중성선의 결함 정도가 심해진다고 가정하였다. 지중 전력 케이블의 양단은 실험장 천정에 시공된 폴리머 애자에 결함되어 지상으로부터 2m 지점에 위치하고 있으며, 한 쪽 종단은 지중 전력 케이블을 활선 상태로 유지시키기 위해서 내전압기와 연결되어 있다. 내전압기를 이용하여 지중 전력 케이블에 22.9kV를 인가하였으며, 반사파 계측 실험 시에도 유지하도록 하였다. 중성선 결함을 위한 실험 환경은 그림 3과 같다. 지중 전력 케이블의 종단 지점으로부터 0.2m 떨어진 지점에 비접촉식 커플러(a)를 위치시키고 비접촉식 커플러(b)는 0.5m 떨어진 지점에 설치하였다. 따라서 계측지점으로부터 지중 전력 케이블의 중성선 결함까지의 거리는 4.5m이다.

2.5 활선 상태 전력 케이블의 중성선 결함 위치 측정 실험

활선 상태 지중 전력 케이블의 S21 파라미터와 비접촉식 커플러의 S21 파라미터는 각각 그림 4, 5와 같다. 지중 전력



그림 3 중성선 결함 위치 추정 실험 환경

Fig. 3 Experiment for detecting the concentric neutrals on the live underground power cable

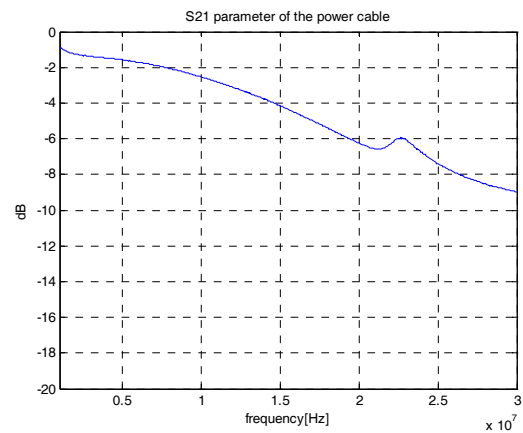


그림 4 지중 전력 케이블의 S21 파라미터

Fig. 4 S21 parameter of the underground power cable

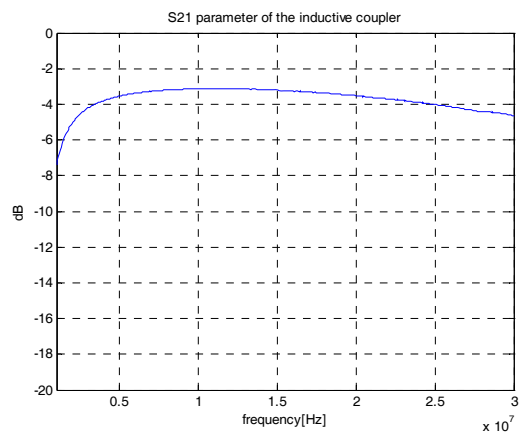


그림 5 비접촉식 커플러의 S21

Fig. 5 S21 parameter of the inductive coupler

케이블은 고주파수 대역으로 갈수록 감쇠가 증가하는 경향을 보이며, 비선형 이득 곡선을 가지고 있어서 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 칩 신호는 분산 및 왜곡 현상을 겪을 수 있다. 비접촉식 커플러의 경우 통과 주파수 대역이 1.7MHz 부터 30MHz 이고, 삽입손실이 최소 -3dB에서 최대 -6dB이다. 따라서 기준 신호 설계 시 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 주파수 대역은 비접촉식 커플러의 통과 주파수 대역인 1.5MHz에서 30MHz 대역 내로 설정해야 하며, 지중 전력 케이블의 감쇠와 비접촉식 커플러에 의한 삽입 손실을 고려하여 시간 폭을 설정해야한다. 본 논문에서는 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 주파수 대역을 5MHz-20MHz로 설정하였으며, 시간 폭은 350ms로 설정하였다. 이와 같이 설계된 기준 신호를 비접촉식 커플러를 통해 활성 상태 지중 전력 케이블에 인가한 뒤 중성선 결함 지점에서 취득한 신호는 그림 6과 같다. 그림 6에서 100 샘플 지점에 위치한 신호는 직접 경로를 통해 취득한 기준 신호이며, 150 샘플 지점의 신호는 중단에서 반사되어 들어온 반사파이다. 인가한 기준 신호의 피크 전압이 10V이지만, 취득된 기준신호와 반사파는 지중 전력 케이블과 비접촉식 커플러에 의하여 감쇠가 많이 되었음을 알 수 있다. 또한 중성선 결함 지점으로부터 반사된 신호는 기준 신호와 중첩되어 있는 상태로 중성선의 단선수가 증가함에 따라 기준 신호 부분에서 변화가 발생함을 알 수 있다. 따라서 지중 전력 케이블과 비접촉식 커플러에 의한 감쇠와 변형을 보상하고 기준 신호와의 중첩으로 인한 결함 위치 추정 성능 저하를 방지하기 위해 Wiener 필터링 기반 등화기 사용 및 기준 신호를 제거한 뒤 시간-주파수영역 상호 상관 함수를 이용하여 중성선 결함 위치를 추정한다. 등화기를 통과한 반사파는 그림 7과 같다.

등화기를 통과한 반사파 신호에서 기준 신호를 제거한 뒤의 반사파는 그림 8과 같다. 그림 8의 100 샘플 부분에서 중성선 결함에 의한 반사파를 확인할 수 있다. 중성선 결함 지점에서 반사된 신호는 단선된 중성선의 수가 늘어날수록 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

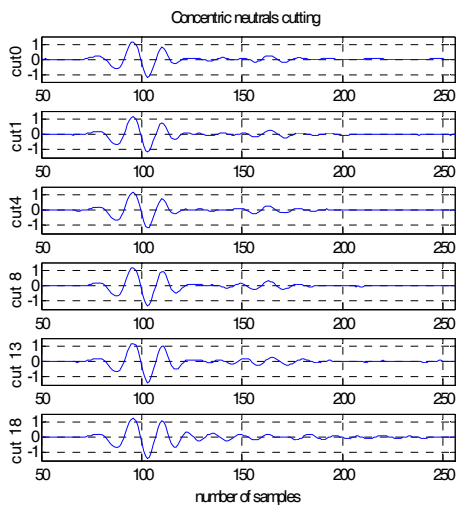


그림 6 비접촉식 커플러로 취득한 기준신호 및 중성선 결함에서 반사된 신호

Fig. 6 Measured reflected signal via inductive couplers

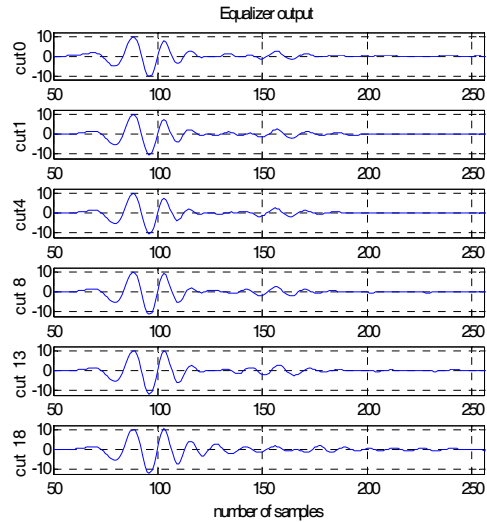


그림 7 등화기를 통과한 반사파 신호

Fig. 7 The reflected signal after equalization

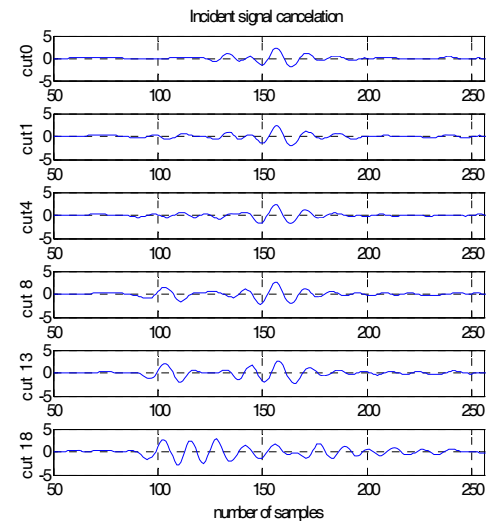


그림 8 기준신호 성분이 제거된 반사파 신호

Fig. 8 The reflected signal without the incident signal

기준 신호가 제거된 반사파 신호와 기준 신호 간의 정규화 된 시간-주파수 영역 상호 상관 함수 (Time-frequency cross-correlation, TFCC)를 구한 결과는 그림 9와 같다. 등화기를 통과한 뒤 기준신호를 제거하지 않은 반사파와 인가한 기준 신호간의 정규화 된 시간-주파수 영역 상호 상관함수는 점선으로 표시되어 있으며, 등화기 통과 후 기준 신호 성분을 제거한 반사파와 기준 신호간의 정규화된 시간-주파수 영역 상호 상관 함수는 실선으로 표시되어 있다. 기준 신호 성분이 제거된 반사파와 기준 신호간의 상관함수에서 100 샘플 부분의 피크점은 중성선 결함에 의한 반사파를 의미하며, 기준 신호 성분이 제거되지 않은 반사파와 기준 신호간의 상관함수에서 첫 번째 피크점은 기준 신호의 위치를 나타낸다. 기준 신호가 제거 되지 않은 반사파와 기준 신호간의 시간-주파수 상관함수에서는 중성선 결함지점에서 반사된 신호에 해당하는 피크점이 없는 것을 확인할 수 있다.

이는 기준 신호와 반사파 간의 중첩 현상과 위그너-빌 분포의 비선형성에 의해 생성된 성분의 영향으로 인한 것이다.

본 논문에서 제안한 방법을 적용하여 얻어진 시간-주파수 영역 상호 상관 함수로부터의 중성선 결함 위치 추정 결과는 표 1과 같다. 중성선 단선 수가 증가할수록 추정 값의 오차가 감소함을 알 수 있다. 중성선 1선 단선 결함의 경우 중성선 결함에서 반사되는 반사파의 크기가 작아서 반사파가 계속 지점으로 되돌아오는 과정에서 감쇠와 신호의 퍼짐과 같은 변형이 일어났기 때문에 시간 주파수 영역 상호 상관 함수로 추정된 위치의 오차가 증가하였으며, 중성선 단선의 수가 증가할수록 오차가 감소하는 경향을 보였다.

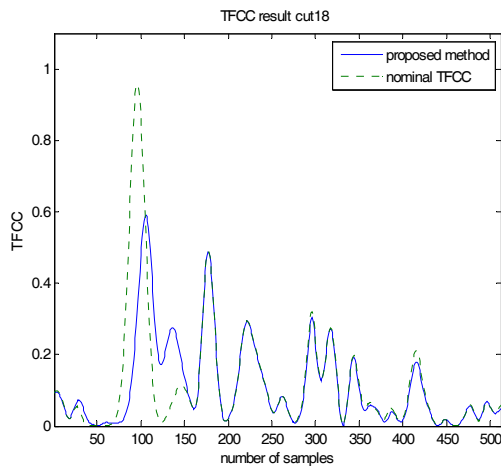


그림 9 정규화된 시간-주파수 영역 상호 상관 함수 결과
Fig. 9 Results of normalized time-frequency domain cross-correlation

표 1 제안 기법의 중성선 결함 위치 추정 결과
Table 1 Results of the proposed method

단선수	기준 신호 위치[μ s]	반사파 위치[μ s]	추정치[m]	오차율[%]
1	0.4750	0.4949	1.6619	63.0688
4	0.4750	0.5079	2.7473	38.9489
8	0.4750	0.5315	4.7170	4.8231
13	0.4750	0.5302	4.6071	2.3795
18	0.4750	0.5281	4.4333	1.4832

3. 결 론

본 논문에서는 지중 전력 케이블의 중성선 결함을 중성선의 단선 수로 모의 하였으며, 이러한 중성선의 결함을 활성 상태 지중 전력 케이블에서 측정하기 위해서 비접촉식 커플러를 사용하였다. 비접촉식 커플러를 사용함으로써 활성 상태 지중 전력 케이블에 설치한 기준 신호를 인가하고 중성선 결함 지점에서 반사된 신호를 취득할 수 있었다. 지중 전력 케이블과 비접촉식 커플러의 전파 특성에 의한 신호의 분산과 감쇠가 발생하였으며 이를 보상하기 위해서 Wiener

필터링 기법을 기반으로 등화기를 설계하였다. 또한 기준 신호와 반사파간의 중첩으로 인한 검출 성능 저하를 방지하기 위해서 기준신호를 제거한 뒤 시간-주파수 영역 상호 상관 함수를 구하였다. 활성 상태 지중 전력 케이블의 모의 중성선 결함 검출 실험을 통하여, 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 검증하였으며, 실험 결과 중성선의 손상이 전체 중성선의 50%이상일 경우 오차율 5% 이내로 중성선 결함 검출이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No.2009T100100609) 및 (No.20124030200040)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

- [1] G. Mazzanti, "Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electrothermal stress on life expectancy of high-voltage ac cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2000-2009, Oct. 2007
- [2] IEEE Standard 400, *IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5kV and Above*, 2012.
- [3] IEEE Std 1617-2007, *IEEE Guide for detection, mitigation, and control of concentric neutral corrosion in medium-voltage underground cables*, IEEE, 2007.
- [4] 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. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2493-2500, Dec. 2005.
- [5] J. Wang, P. E. C. Stone, Y. J. Shin, and R. A. Dougal, "Application of joint time-frequency domain reflectometry for electric power cable diagnostics," *IET Signal Process.*, vol. 4, pp. 395-405, 2010.
- [6] E. S. 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. Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, pp. 131-138, Feb. 2002.
- [7] Eric Chassande-Mottin and A. Pai, "Discrete time and frequency Wigner-Ville distribution: Moyal's formula and aliasing," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 508-511, Jul. 2005.
- [8] B. Parruck and S. M. Riad, "An optimization criterion for iterative deconvolution," *IEEE Transactions on Instrum. and Meas.*, vol. IM-32, no. 1, pp. 137-140, Mar. 1983.

저 자 소 개



이 춘 구 (李 春 九)

1983년 4월 12일생. 2007년 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 (공학사). 2007년~ 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정.

Tel : +82-2-2123-2773

Fax : +82-2-392-4358

E-mail : cklee03@yonsei.ac.kr



윤 태 성 (尹 泰 星)

1956년 6월 22일생. 1978년 연세대학교 공과대학 전기공학과 (공학사). 1980년 동 대학원 전기공학과 (석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 (박사). 1994년 3월 ~ 1995년 2월 미국 Vanderbilt 대학교 전기공학과 객원교수. 1989년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수

Tel : +82-55-213-3633

Fax : +82-55-263-9956

E-mail : tsyoon@changwon.ac.kr



박 진 배 (朴 珍 培)

1954년 8월 7일생. 1977년 연세대학교 공과대학 전기공학과 (공학사). 1985년 ~ 1990년 Kansas State University 공과대학 전기 및 컴퓨터 공학과 (공학박사). 1990년~1991년 Kansas State University 전기 및 컴퓨터공학과 조교수. 1992년 ~ 현재 연세대학교 전기공학과 교수

Tel : +82-2-2123-2773

Fax : +82-2-362-4539

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr