

시간-주파수 영역 반사파 계측법 기반 XLPE 전력 케이블의 중성선 결함 위치 측정 연구

이춘구*, 꺽기석* 윤태성** 박진배*
연세대학교*, 창원대학교**

Detection and Localization of Neutral Wire Defect of XLPE Power Cable Based on The Time-Frequency Domain Reflectometry

Chun Ku Lee*, Ki Seok Kwak*, Tae Sung Yoon** and Jin Bae Park
Yonsei University*, Changwon National University**

Abstract - In this paper, the diagnosis system for detecting and localizing the neutral wire defect in an energized XLPE power cable is proposed. The neutral wire defect is detected and localized by the time-frequency domain reflectometry. To extract the reflected signal from the neutral wire defect, the adaptive RLS filtering is introduced. To verify the proposed method, the experiments for detecting and localizing neutral wire defect in active XLPE power cable is conducted.

1. 서 론

전력 사용량이 급증하고 있는 현 상황과 스마트 그리드의 활성화에 따른 분산 전원과의 연계운전을 고려하였을 때 신뢰성 있는 전력 공급은 안정적인 배전 계통 운용에 필수적인 조건이라 할 수 있다. 전력 공급의 신뢰성을 유지하기 위해서는 배전 선로에서 발생할 수 있는 모든 현상, 즉 기기의 정상 동작 상태, 고장 징후 현상 그리고 고장에 이르기까지의 모든 현상에 대한 인식과 더불어 전력 설비를 종합적으로 진단하여 고장을 조기에 발견하고 현재 상태 진단을 기반으로 고장을 예측할 수 있는 진단 기법의 개발이 필요하다[1].

배전 선로를 구성하고 있는 요소 중에서 전력을 각 수요처로 전송하기 위한 전력 케이블의 고장 예측 및 상태 진단을 위한 기법으로 절연 저항법, 직류 누설 전류법, 내전압 시험법, 유전 정접법, 부분 방전법이 개발되어 왔다. 이러한 진단법은 진단 시 배전 선로의 정전을 수반한다는 점에서 사용자의 불편과 경제적인 손실을 야기하기 때문에 활성 상태에서 전력 케이블의 이상을 진단하기 위한 기법의 개발이 요구되어 왔다. 이에 따라 반사파 계측법을 배전 진단에 적용하는 연구가 진행 되어왔다[2].

반사파 계측법은 레이더 시스템과 같이 전자기 신호가 임피던스 불일치 지점에서 반사되는 현상을 이용하는 기법으로서 기준신호를 전력 케이블에 인가하고 임피던스 불일치 지점에서 반사된 신호를 취득한 뒤, 기준신호와 반사파간의 시간 지연을 이용하여 결함 지점을 추정하는 기법이다. 반사파 계측법은 사용하는 기준 신호와 분석 방법에 따라 시간 영역 반사파 계측법, 주파수 영역 반사파 계측법 그리고 시간 주파수 영역 반사파 계측법으로 분류 할 수 있다[2].

시간 영역 반사파 계측법을 이용하여 사선 상태의 지중 전력 케이블의 중성선 손상 지점을 추정하는 연구가 진행 되어 왔다[4]. 사선 상태에서 진단이 실시되며, 분해능과 결함 검출 간의 trade-off가 발생한다는 점이 시간 영역 반사파 계측법의 단점이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시간 주파수 영역 반사파 계측법과 적응 RLS 필터링을 이용한 활성 상태 지중 전력케이블의 중성선 결함 위치 측정 기법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

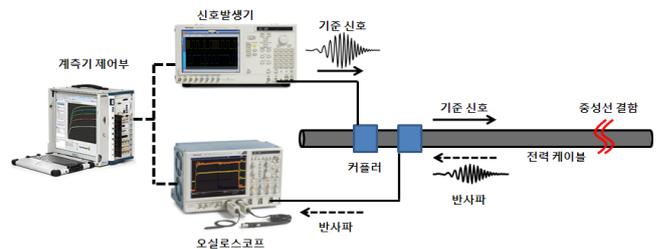
2.1 시간 주파수 영역 반사파 계측법

시간 주파수 영역 반사파 계측법은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 칩 신호를 기준신호로 사용하는 반사파 계측법이다. 가우시안 포락선 선형 칩 신호는 다음과 같이 주어진다[2].

$$s_k = Ae^{(k-m)^2/2\sigma^2} \cos(0.5\beta k^2 + \omega_0 k + \phi) \quad (1)$$

여기서 A , m , σ , β , ω_0 그리고 ϕ 는 각각 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 크기, 신호의 중심 시간, 시간 폭, 각주파수 증가율, 시작 각주파수 그리고 위상을 나타낸다. 일종의 compressed 신호인 가우시안 포락선 선형 칩 신호와 정합 필터(matched filter)를 사용함으로써 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 구형파 펄스를 기준신호로 사용하는 시간 영역 반사파 계측법에 비해 분해능과 결함 검출 능력을 동시에 향상 시킬 수

있는 장점이 있다. 또한 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 시간 폭, 시작



<그림 1> 시간-주파수 영역 반사파 계측법 기반 활성 상태 지중 전력 케이블 진단 시스템

주파수, 각주파수 증가율을 조절함으로써 기준 신호의 주파수 대역을 전력 케이블과 신호 인가 센서의 주파수 특성에 따라서 선택적으로 조절할 수 있다.

임피던스 불일치 지점에서 반사된 신호는 인가한 기준신호가 감소되고 시간 지연된 형태로 모델링 될 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k = \alpha Ae^{(k-m-d)/2\sigma^2} \cos(0.5\beta(k-d)^2 + \omega(k-d) + \phi) + v_k \quad (2)$$

여기서 α , d 는 각각 감쇠 상수, 시간 지연이며 v_k 는 분산이 R 인 영평균 백색 잡음이다.

시간-주파수 영역 반사파 계측법은 임피던스 불일치 지점에서 반사된 신호의 검출과 계측 지점에서 임피던스 불일치 지점까지의 거리를 측정하기 위해서 위그너빌 분포 기반 정규화 된 시간-주파수 상호 상관함수를 사용한다. 인가한 신호와 반사파간의 시간-주파수 상호 상관함수의 피크점 검출을 통해 인가한 기준 신호와 반사파 간의 시간 지연을 추정하며 이를 바탕으로 결함 위치를 측정하게 된다, 위그너빌 분포 기반 정규화 된 시간-주파수 상호 상관함수는 다음과 같이 주어진다[2].

$$C_{sr}(k) = \frac{1}{\sqrt{E_s E_r}} \sum_t \sum_{\omega} W_s(t, \omega) W_r(t-k, \omega) \quad (3)$$

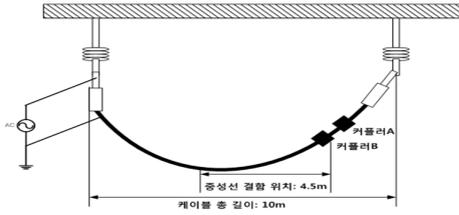
여기서 E_s , E_r , W_s 그리고 W_r 은 각각 인가한 기준신호의 에너지, 반사파의 에너지, 인가한 기준 신호의 위그너빌 분포 그리고 반사파의 위그너빌 분포를 의미한다.

2.2 활성 상태 전력 케이블에 적용된 시간 주파수 영역 반사파 계측 시스템

활성 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함을 진단하기 위한 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 구조도는 그림 1과 같다. 기존의 사선 상태 전력 케이블에 적용 시 사용한 T자 커넥터 대신 비접촉식 커플러 2개를 사용함으로써 고전압으로부터 계측기를 보호하고 고주파수 기준신호를 활성 상태 지중 전력 케이블에 인가할 수 있다. 그림 1에서 설계된 기준 신호는 신호 발생기에서 발생되어 커플러를 통하여 지중 전력 케이블에 인가된 후 직선 접속제, 종단 부분과 같은 전력 케이블의 구조에 의한 임피던스 변화 지점과 중성선 결함과 같이 결함에 의한 임피던스 변화지점에서 반사된다. 반사파는 커플러를 통하여 오실로스코프로 취득되며 정규화 된 시간-주파수 상호 상관함수를 통하여 결함 지점까지의 거리를 계측하게 된다.

2.3 적응 RLS 필터링

지중 전력 케이블의 직선 접속재 및 중단과 같이 전력 케이블 구조에 의한 임피던스 변화지점은 고정적이며 여기서 발생된 반사파는 취득 신호 중 비교적 고정된 위치에서 측정된다.



〈그림 2〉 활선 상태 지중 전력 케이블 중성선 위치 측정 실험 구조도

직선 접속재 및 중단 지점 부근에 중성선 결함이 발생하는 경우, 중성선 결함에 의한 반사파와 구조적 특성에 의한 반사파 간 겹침 현상으로 인해 결함 검출 분해능이 저하된다. 신호 간 겹침 현상으로 인한 분해능 저하를 방지하고 중성선 결함에 의한 반사파를 추출하기 위해서 본 논문에서는 적응 RLS 필터링 기법을 도입 하였다. 적응 RLS 필터링의 목적함수는 다음과 같이 주어진다[3].

$$J_k = \sum_{n=0}^k \frac{1}{\lambda^n} (y_n - \sum_{i=0}^{p-1} h_{k,i} x_{k-i})^2 \quad (4)$$

여기서 λ , y_k , p , $h_{k,i}$ 그리고 x_k 는 각각 망각 인자(forgetting factor), 중성선 결함과 전력 케이블의 구조적 특성에서 반사된 신호가 포함된 신호, 필터의 차수, 필터의 계수 그리고 정상 상태 전력 케이블에서 취득한 반사파 신호를 의미한다. 적응 RLS 필터링은 식 (4)의 목적 함수를 최소화하는 필터의 계수를 찾게 되며 다음의 수식을 통해 구현된다.

$$K_k = \frac{P_{k-1} X_k}{\lambda^k + X_k^T P_{k-1} X_k} \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k X_k^T) P_{k-1} \quad (6)$$

$$e_k = y_k - X_k^T \theta_{k-1} \quad (7)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + K_k e_k \quad (8)$$

여기서 $X_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-p+1}]^T$, $\theta_k = [h_{k,0} \ h_{k,1} \ \dots \ h_{k,p-1}]^T$, P_k , K_k 그리고 e_k 는 각각 취득 신호 벡터, 필터 계수 벡터, 오차 공분산, 필터 이득 그리고 필터의 잔차를 나타낸다. 식 (7)은 중성선 결함과 전력 케이블의 중단 및 직선 접속재에서 반사된 신호가 포함된 신호에서 전력 케이블의 중단 및 직선 접속재에서 반사된 신호를 제거한 신호를 의미한다.

적응 RLS 필터링을 통하여 전력 케이블의 중단 및 직선 접속재에서 반사된 신호를 제거함으로써 중성선 결함에서 반사된 신호를 추출할 수 있으며 추출된 신호와 식 (1)의 기준신호 간의 정규화된 시간-주파수 상호 상관함수를 통하여 중성선의 결함 위치를 측정하게 된다.

2.4 활선 상태 전력 케이블의 중성선 결함 위치 측정 실험

본 논문에서 제시된 적응 RLS 필터링 기반 중성선 결함에 의한 반사파 추출 알고리즘을 검증하기 위해서 총 18가닥의 지중 전력 케이블의 중성선 중에서 13개의 중성선을 절단하여 중성선 결함을 전력 케이블에 모의한 뒤 활선 상태에서 실험을 진행하였다.

그림 2는 활선 상태 전력 케이블의 중성선 결함 위치 측정 실험의 구조도를 나타낸다. 10m 길이의 FR-CNCO 60sq 지중 전력 케이블의 5m 지점에 중성선 결함을 인가한 후 신호 취득을 위한 비접촉식 커플러를 중성선 결함 지점으로부터 4.5m 지점에 체결하여 반사파를 취득하였다. 실험은 내전압기로 22.9kV를 인가한 상태에서 진행 되었으며 전력 케이블의 구조적 특성에 의한 반사파를 취득하기 위해서 중성선 결함을 인가하기 전에 활선 상태 전력 케이블에 기준 신호를 인가한 뒤 반사파를 취득하였다.

그림 3에서 실선은 중성선 결함을 지중 전력 케이블에 인가하기 전에 취득한 반사파이며, 점선은 중성선 결함 인가 후 취득한 반사파를 나타낸다. 70[sample] 부근에 존재하는 신호는 인가한 기준 신호이며 130[sample]부근의 신호는 전력 케이블의 중단에서 반사된 신호를 나타낸다.

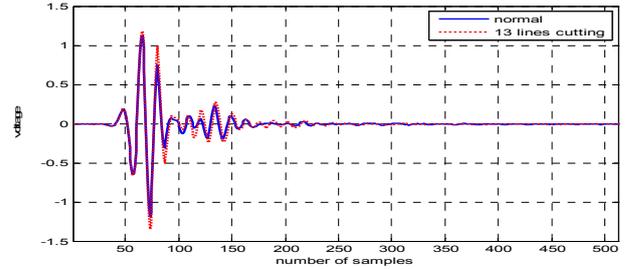
적응 RLS 필터링을 이용하여 중성선 결함에서 반사된 신호를 추출한 결과는 그림 4와 같다. 중성선 결함에서 반사된 신호와 기준신호 간의 정규화된 시간-주파수 상호 함수는 그림 5와 같다. 그림 5에서 45[sample]에 위치한 피크점은 중성선 결함에 의한 반사파의 위치를 나

타낸다.

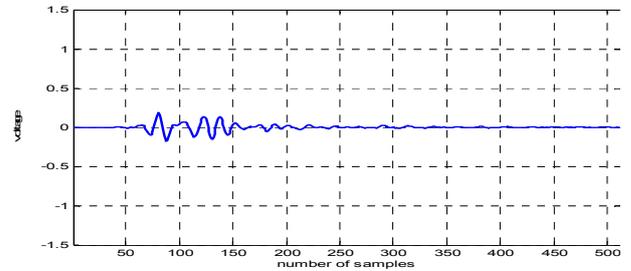
정규화된 시간 주파수 상호 상관함수의 피크 점의 인덱스를 이용하여 중성선 결함 지점의 거리를 50회 측정하여 평균한 결과 4.2934[m]로서 평균 오차율은 4.59[%]로 측정되었다.

3. 결 론

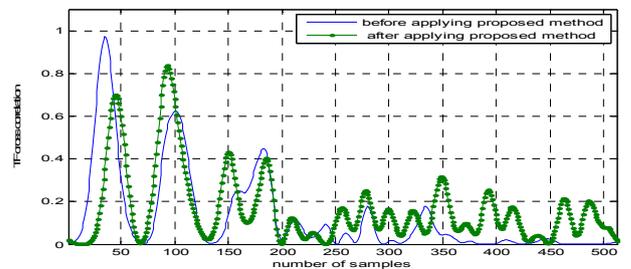
본 논문은 시간-주파수 영역 반사파 계측법 기반 활선 상태 지중 전력 케이블의 중성선 결함을 측정하는 기법 및 시스템 구성을 제안하고, 적응 RLS 필터링을 이용하여 중성선 결함에 의한 반사파를 직선 접속재 및 중단에서 반사된 신호에서 추출하는 방법을 제안하였다. 적응 RLS 필터링을 취득한 반사파에 적용한 결과 중성선 결함에 의한 반사파를 효과적으로 추출할 수 있었으며 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수를 통하여 중성선의 결함을 측정할 수 있었다.



〈그림 3〉 정상상태 전력 케이블 및 중성선 결함 취득 신호



〈그림 4〉 제안된 기법 적용 후 추출된 반사파 신호



〈그림 5〉 추출된 반사파와 기준 신호 간 시간 주파수 상호 상관 함수

감사의 글

본 논문은 서울시 산학연 협력사업(2010-8-2027)으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1]김창중, 유명호, "배전선로 고장 예지 및 종합 진단 기술", 전기학회지, 제 45권, 5호, pp.23-29, 5월 1996.
 [2] 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 Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 6, pp.2493-2500, Dec. 2005.
 [3] C. K, Lee, K. S. Kwak, T. S. Yoon and J. B. Park, "Adaptive RLS filtering for the reduction of blind spot in a cable fault locator," *International Conf. on Control, Automation and Sys.*, 2010, pp. 637-640.
 [4]Keith Lanan, "TDR use in Neutral Corrosion Detection and Splice Identification Including the Application of Sub-nanosecond Pulses", May, 1999.