

XLPE 전력 케이블 결함 진단을 위한 시간-주파수 영역 반사파 계측법 기준신호 설계

장승진*, 이신호*, 이춘규*, 박진배*
연세대학교*

Design of incident signal of time-frequency domain reflectometry in application to detect fault in a XLPE cable

Seung-Jin Jang*, Sin-Ho Lee*, Chun-Ku Lee*, and Jin-Bae Park*
Yonsei University*

Abstract - 본 논문에서는 전력케이블에서의 시간-주파수 영역 반사파 계측법을 기반으로 한 기준신호를 설계한다. 사용된 기준신호는 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석할 수 있는 가우시안 포락선을 가지는 첩신호이다. 10m 전력케이블의 특성에 적합하게 설계된 기준신호를 케이블에 직접 인가하여 반사파를 측정하고 정규화된 시간-주파수 영역 상호상관함수로 비교 분석하였다.

$$B^2 = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha} \tag{3}$$

2.1.2 시간-주파수 영역 상호상관함수

신호 인가 지점에서의 기준신호를 $S(w, 0)$ 이라 할 때, 거리 x 만큼 전파된 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(w, x) = S(w, x = 0) \cdot H(w, x), \tag{4}$$

여기서 $H(w, x)$ 는 전력 케이블의 전달 함수를 의미하며, 감쇠율과 분산이 주파수에 비례한다고 가정할 수 있으며[1] 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A(w) &\simeq Dw, \\ k(w) &\simeq Kw. \end{aligned} \tag{5}$$

기준신호에 대한 시간-주파수 영역의 위그너 빌 분포는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} W_s(t, w) &= \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-t_0)^2 - (w-\beta(t-t_0)-w_0)^2/\alpha} \\ W_r(t, w) &= \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-x/v)^2 - (w-\beta(t-x/v)-w_0)^2/\alpha} \cdot e^{-2Dxw} \end{aligned} \tag{6}$$

기준신호와 반사파의 위그너 빌 분포간 상호상관함수를 이용하여 기준신호와 반사파 간의 시간 지연을 구하게 되며 기준신호와 반사파 간의 시간-주파수 영역 상호 상관 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_s E_r} \iint W_r(t', w) W_s(t'-t, w) dw dt', \tag{7}$$

여기서 $E_r = \iint W_r(t', w) dw dt'$ 는 반사파 에너지이고,

$$E_s = \iint W_s(t', w) dt' dw \text{는 기준신호 에너지이다.}$$

시간-주파수 상호 상관 함수는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$C_{sr}(t) = e^{-((\alpha^2 + \beta^2)/2\alpha)(Ax)^2} e^{-((\alpha^2 + \beta^2)/2\alpha)(t-x/v)^2}, \tag{8}$$

여기서 v 는 전력 케이블에서의 전파 속도이다. 식 (8)에 따르면 상호 상관 함수의 폭은 주파수 대역에 반비례한다. 그러므로 시간 영역 반사파 계측법에서는 신호의 시간폭을 줄임으로써 분해능을 향상시킬 수 있었던 것에 비해 시간-주파수 영역 반사파 계측법은 기준신호의 주파수 대역을 증가시킴으로써 분해능을 향상시킬 수 있다. 그러나 전력 케이블의 전파 특성에 의해 주파수 대역을 무한정 높일 수는 없기 때문에 전력 케이블의 주파수 특성에 적합한 기준신호를 설계해야 한다.

2.2.1 기준신호의 중심 주파수 설계

전력 케이블 내 신호의 감쇠율은 주파수에 의존하기 때문에, 이를 고려해서 중심 주파수를 결정해야 한다. 중심 주파수가 높아지면 파장이 짧아져서 높은 분해능을 갖는 대신 신호 감쇠율이 증가하게 되고, 중심 주파수가 낮아지면 신호 감쇠율은 감소하지만 분해능이 저하된다.

본 논문에서 사용된 10m 길이의 FR-CNCO 지중전력 케이블의 경우, 전력 케이블 내에서 반사파를 검출할 수 있는 신호의 허용 감쇠율은

1. 서 론

일반 가정에서부터 고도의 안전성이 요구되는 원자력 발전소 제어 시스템, 우주 왕복선, 항공기 등에 이르기 까지 전기, 전자 시스템의 배선에 대한 신뢰성 있는 진단 기법의 필요성은 꾸준히 제기되어 왔다.

배선의 결함 유무를 진단할 수 있으며 그 위치를 추정할 수 있는 방법 중 하나로 반사파 계측법이 있다. 반사파 계측법은 대상 전력 케이블에 전자기 신호를 인가한 뒤 결함이나 전력 케이블의 구조적 특성에 의한 임피던스 변화지점에서 반사되는 신호를 취득하여 분석함으로써 결함상태를 진단하고 결함 위치를 추정하는 방법이다[1].

반사파 계측법은 기준신호의 종류와 분석법에 따라 시간 영역 반사파 계측법, 주파수 영역 반사파 계측법으로 분류할 수 있다[1]. 구형과 펄스를 사용하는 시간영역 반사파 계측법의 경우 결함 검출 분해능을 높이기 위해 시간 폭을 줄이게 되면 전력 케이블에 의한 감쇠로 인해 반사파의 크기가 작아져 검출이 어려워지는 단점이 있다[2]. 시간 폭을 늘리기 되면 검출 분해능이 저하되는 단점이 있으며 이를 보완하기 위해 시간-주파수 영역 반사파 계측법이 도입되었다. 이러한 시간-주파수 영역 반사파 계측법은 외부 환경에 민감한 앞선 두 방법에 비해 거리계측에서 뛰어난 성능을 보여준다[3]. 시간-주파수 영역 반사파 계측법은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 첩신호를 사용한다[2]. 기준신호를 대상 전력 케이블에 인가한 후 결함 지점에서 반사된 신호를 위그너 빌 시간-주파수 분포를 이용하여 시간과 주파수 영역에서 반사파의 에너지 분포를 구하며 이를 기반으로 한 정규화된 시간-주파수 상호상관함수를 이용하여 대상 배선의 결함 검출 및 결함 위치를 추정한다[1]. 정확한 결함 위치를 추정하기 위해서는 전력 케이블의 특성에 맞는 적합한 기준신호 설계가 필요하다.

본 논문에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측법에서 사용되는 기준신호를 전력 케이블의 특성에 적합하게 설계하는 기법을 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.

2. 기준신호 설계

2.1.1 가우시안 포락선 선형 첩신호

시간-주파수 영역 반사파 계측법은 가우시안 포락선 선형 첩신호를 기준신호로 사용하고 있으며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha(t-t_0)^2/2 + j\beta(t-t_0)^2/2 + jw_0(t-t_0)}, \tag{1}$$

여기서 α 와 β 는 각각 시간 폭, 주파수 대역을 결정하는 파라미터이고, t_0 와 w_0 는 시간 중심 그리고 중심 각주파수이다.

시간 폭과 파라미터 α 의 관계는 다음 식 (2)와 같다.

$$T^2 = \frac{1}{2\alpha} \tag{2}$$

주파수 대역과 파라미터 α, β 의 관계를 수식으로 나타내면 식 (3)와 같다.

-24dB로 알려져 있다[1].

$$[A_r] \leq \frac{24dB}{20m} = \frac{12dB}{10m} \quad (9)$$

여기서, A_r 는 단위 길이당 신호 감쇠율이다.

10m 전력 케이블의 신호 감쇠율 특성을 나타내는 그림 1에 따르면 중심 주파수 f_0 는 다음과 같이 결정 된다.

$$f_0 \leq 12.5MHz \quad (10)$$

2.2.2 기준신호의 주파수 대역 및 시간 폭 설정

전력 케이블에 인가한 기준신호의 변형을 최소화하기 위해 전력 케이블 내 위상이 선형인 구간을 주파수 대역으로 선정해야 한다.

주파수 대역은 15MHz(5MHz ~ 20MHz)으로 잡고, 시간폭은 분해능과 SNR을 고려하여 350ns로 설정하였다.

3. 실험 결과

그림 2는 두 가지 기준신호를 나타낸 그림이다. 주파수 대역이 다른 두 신호를 전력 케이블에 인가하여 그 결과를 분석하였다.

그림 3은 두 가지 기준신호의, 가우시안 칩 신호 5 ~ 20MHz, 350ns와 5 ~ 30MHz, 350ns, 시간-주파수 영역 자기상관함수를 비교한 것이다. 주파수 대역을 보다 넓게 설계한 신호는 자기상관함수의 폭이 다른 함수의 폭보다 좁기 때문에 분해능이 더 높다. 그러나 케이블의 특성상 고주파에서 신호의 감쇠가 심하기 때문에 주파수 대역을 무한정 높일 수가 없다. 그림 4는 두 가지 신호를 10m 전력 케이블에 인가한 후 그에 따른 반사파를 측정하여 분석한 시간-주파수 상호상관함수이다. 주파수 대역이 더 높은 신호를 인가하였을 때 함수의 폭이 좁아서 분해능이 더 좋지만 신호감쇠가 심해서 피크 지점의 크기가 낮다. 그에 반해 주파수 대역이 더 낮은 신호를 인가하였을 때는 함수의 폭이 넓어서 분해능은 조금 떨어지지만 피크 지점의 크기가 높기 때문에 결합 검출에 더 우수한 성능을 보인다.

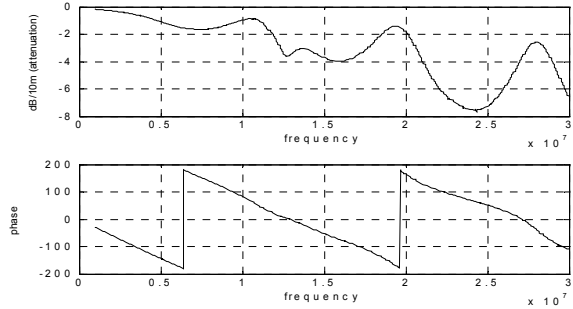
4. 결 론

본 논문에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측법을 기반으로 한 정규 분포 상호상관함수를 이용하여 전력 케이블의 특성에 적합한 기준신호를 설계한다. 사용된 기준신호는 가우시안 포락선 모양을 가지는 칩 신호로 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석될 수 있으며 잡음에 강한 장점을 가진다.

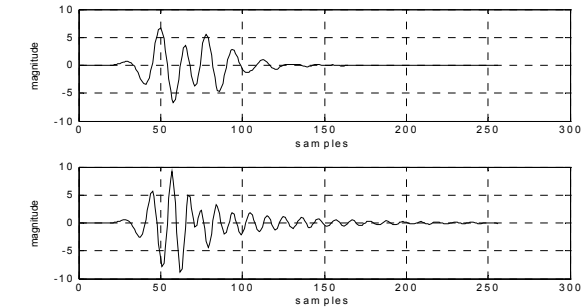
주파수 대역을 다르게 설계한 두 가지 기준신호를 10m 전력케이블에 각각 인가하고 그에 따른 반사파를 측정하여 위그너 빌 분포함수 기반으로 한 시간-주파수 영역의 상호상관함수로 비교 분석하는 실험을 통해 설계한 기준신호의 우수성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

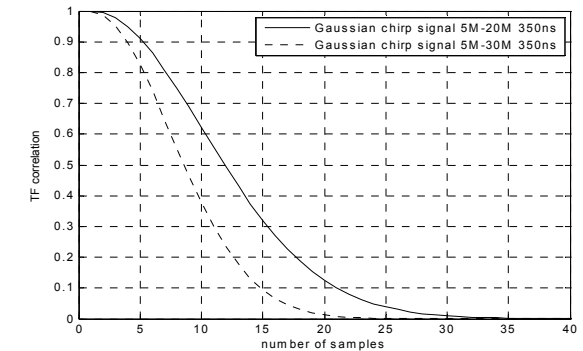
- [1] J. Wang, P.E.C Stone, Y.-J. Shin, R.A. Dougal, "Application of joint time-frequency domain reflectometry for electric power cable diagnosis", IET Signal Processing, Vol. 4, Iss. 4, pp.395-405, 2010
- [2] Young-June Shin, Edward J. Powers, Tok-Son Choe, Chan-Young Hong, Eun-Seok Song, Jong-Hwan Yook, Jin Bae 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, 2005
- [3] 성화창, 박진배, 주영훈, "저압 배선 이상 진단을 위한 지능형 차단 시스템 구축", 한국지능시스템학회 논문지, vol. 18, pp.518-523, 2008



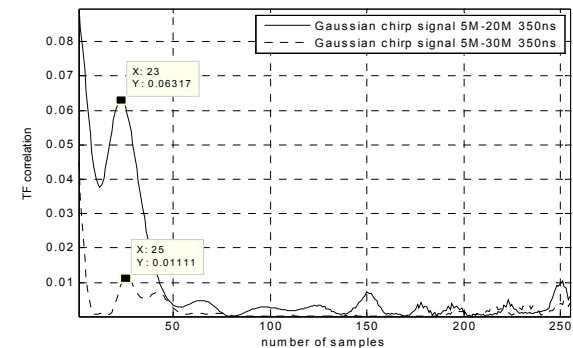
<그림 1> 10m 전력 케이블 특성



<그림 2> (a) 가우시안 칩신호 5 ~ 20MHz, 350ns
(b) 가우시안 칩신호 5 ~ 30MHz, 350ns



<그림 3> 두 가지 설계신호의 시간-주파수 영역 자기상관함수 비교



<그림 4> 두 가지 설계신호의 시간-주파수 영역 상호상관함수 비교