

케이블 고장 진단을 위한 선형 칼만필터 기반 반사파 계측법 연구

Fault Diagnosis for Cable Using Reflectometry Based on Linear Kalman Filtering

이춘구* 윤태성** 박진배***
Chun Ku Lee, Tae Sung Yoon, Jin Bae Park

Abstract - The reflectometry for locating the fault at a cable is the same as a problem estimating the time delay between the incident and the reflected signals. In this paper, we propose a method for estimating the time delay between the two signals. The proposed method is based on the modeling of the Gaussian enveloped linear chirp signal in the Gaussian noise environment. The phase and the instantaneous frequency of the received signal are estimated by linear Kalman filtering. From the estimated instantaneous frequency, we can measure the time interval between the center frequencies of the incident and the reflected signals. The time interval is the same as the time delay between the incident and the reflected signals. In a simulation assuming that the cable has open fault at the end of the cable, the proposed method showed a good result in estimating the time delay.

Key Words : 반사파계측법, 케이블 고장점 진단, 시간 지연 추정, 선형 칼만 필터, 가우시안 첩 신호

1. 서론

정보전달이나 전력전달을 목적으로 포설된 케이블은 설치된 환경에서의 진동, 화학적 부식과 같은 요인과 부적절한 유지 보수로 인하여 절연체의 열화가 진행된다. 주변 환경의 영향으로 인하여 절연체가 열화 된 케이블은 전체 시스템의 신뢰성과 안정도를 저해할 수 있는 잠재적인 원인이 된다. 열화가 진행된 케이블은 정보를 전달하는 과정에서 신호의 손실을 유발하며 지속적인 절연체의 열화는 절연체 파괴로 이어지게 된다. 케이블의 절연 파괴는 케이블의 단락이나 지락을 야기한다. 케이블의 단락과 지락으로 인한 정전, 전기화재, 오작동은 인적 물적 피해를 발생시키며, 사고가 발생한 케이블의 복구를 위한 추가적인 비용을 요구한다. 케이블의 열화에 의한 피해를 사전에 예방하기 위해서는 케이블의 상태를 진단하는 기술과 사고 발생 후 신속하게 복구 할 수 있도록 고장점의 위치를 정확하게 알려주는 진단 기법이 필요하다. 기존의 케이블 진단법은 케이블을 진단하는 과정에서 케이블에 추가적인 손상을 주거나 고장점의 위치가 부정확하다는 단점이 있다.[1] 이러한 단점을 보완하기 위해서 선형 칼만 필터 기반 반사파 계측법을 이용한 케이블 진단 방법을 본 논문에서 제안한다.

2. 반사파 계측법

반사파 계측법의 기본원리는 임피던스 부정합에 따른 반사

현상을 이용한 것이다. 케이블의 내부 도체에 전자기 신호를 인가하게 되면 전자기 신호는 도체를 따라서 전파하게 되며 신호가 결함 지점과 같이 임피던스가 변하는 곳에 도달하게 되면 신호 중 일부는 투과하고 일부는 반사하게 된다. 임피던스 불일치 지점에서 반사된 신호는 인가한 지점으로 되돌아오게 된다. 신호를 인가한 지점에서 반사파를 취득하면 인가한 신호와의 시간 지연(time delay)을 구할 수 있으며 시간 지연은 인가한 지점으로부터 결함 지점까지 도달한 뒤 되돌아온 시간이다. 따라서 인가 신호가 결함 지점에 도달하는데 걸리는 시간은 시간 지연의 절반이 됨을 알 수 있다. 시간 지연에 전자기 신호가 케이블 내에서 전파된 속도를 곱하면 인가한 지점으로부터 결함까지의 거리를 측정할 수 있다. 전자기 신호를 인가한 지점으로부터 결함 지점까지의 거리는 식 (1)과 같다.

$$d_{fault} = \frac{t_d \cdot v_p}{2}, \quad (1)$$

여기에서 d_{fault} 는 전자기 신호를 인가한 곳으로부터 결함 위치까지의 결함 거리, t_d 는 인가한 신호와 반사파 사이의 시간지연을 의미하며 v_p 는 케이블 내 신호의 전파속도를 의미한다. 식(1)에서 신호를 인가한 지점으로부터 결함지점까지의 거리를 측정하기 위해서 필요한 정보는 케이블 내 전파속도와 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연임을 알 수 있다. 케이블 내 전파 속도는 케이블의 물리적인 특성이므로 결국 인가한 전자기 신호와 반사파 사이의 시간 지연이 결함 거리를 결정하는데 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 따라서 케이블의 고장 진단을 위한 반사파 계측법에서는 시간 지연을 구하기 위하여 다양한 방법으로 접근한다. 시간 지연을 구하기 위한 방법으로 취득 신호를 시간 영역에서 해석하는

저자 소개

* 準 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 昌原大學 電氣工學科 正教授 · 工博

*** 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 正教授 · 工博

경우 시간 영역 반사파 계측법(Time Domain Reflectometry: TDR), 주파수 영역에서 해석하는 경우 주파수 영역 반사파 계측법(Frequency Domain Reflectometry: FDR), 시간과 주파수 영역을 동시에 고려하여 해석하는 경우는 시간 주파수 영역 반사파 계측법(Time Frequency Domain Reflectometry: TFDR)이 있다.[2] 본 논문에서는 선형 칼만 필터를 이용하여 신호의 순간 주파수를 추정하여 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연을 구하는 방법을 고찰할 것이다. 순간 주파수를 이용한 시간 지연 추정을 위해서 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 첩 신호(Gaussian enveloped linear chirp signal)를 사용하였다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 케이블의 물리적인 특성에 최적이 되도록 설계가 가능하다고 알려져 있다.[2]

3. 선형 칼만 필터 기반 시간 지연 추정

3.1 반사파 모델링

케이블에 인가하는 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 식(2)와 같다.

$$s(k) = e^{-\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} \cos(0.5\beta k^2 + \omega_0 k) = e^{-\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} \cos(\phi_k) \quad (2)$$

여기에서 m 은 가우시안 포락선의 평균값을 의미하며, σ 는 가우시안 포락선의 분산, β 는 각주파수 증가율, ω_0 는 시작 각주파수, ϕ_k 는 위상을 의미한다. 케이블에 인가한 전자기 신호와 케이블의 고장점에서 반사된 반사파 신호를 인가한 곳에서 측정한 신호 $r(k)$ 는 식(3)과 같이 표현 될 수 있다.

$$r(k) = s(k) + \sum_{i=1}^n \alpha_i s(k - d_i) \quad (3)$$

여기서 n 은 케이블의 고장에 의해 발생한 반사파의 총 개수를, α_i 는 각각의 반사파의 감쇠율, d_i 는 인가한 신호와 각각의 반사파 사이의 시간 지연을 의미한다. 반사파의 총 개수인 n 은 알고 있다고 가정한다. 반사파는 인가한 신호에 비하여 감쇠되고 시간 지연을 가진다고 모델링 할 수 있다. $r(k)$ 의 크기와 위상을 구하기 위해서 해석적인(analytic) 신호를 만들게 된다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 해석적인 신호는 식(4)와 같다.

$$r_a(k) = r(k) + jH(r(k)) \quad (4)$$

여기에서 r_a 는 해석적인 신호, H 는 힐버트 변환(Hilbert transform)를 의미한다. 식 (4)의 해석적인 신호의 크기와 위상정보가 칼만 필터의 측정치로 주어지게 된다.

선형 칼만 필터로 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연을 구하기 위한 상태 방정식은 식 (5)-(6)과 같다.

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_k w_k \quad (5)$$

$$y_k = Hx_k + v_k \quad (6)$$

여기에서 $x_k = [A_k \ \phi_k \ \Delta\phi_k \ \Delta^2\phi_k]^T$,

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

w_k, v_k 는 공분산이 각각 Q_k, R_k 인 영평균 백색 가우시안 잡음으로 w_k 는 상태 천이 잡음, v_k 는 측정 잡음이다. 상태 변수 A_k 는 취득신호 $r_a(k)$ 의 크기, ϕ_k 는 위상, $\Delta\phi_k$ 는 순간 주파수(instantaneous frequency)로서 $\frac{\partial\phi_k}{\partial k}$ 를 의미하며

$\Delta^2\phi_k$ 는 주파수의 증가율로서 $\frac{\partial^2\phi_k}{\partial k^2}$ 를 의미한다. 상태 천이 행렬 F_k 는 테일러 급수를 전개하고 미분한 값을 계산한 결과이다.[3]

3.2 순간 주파수 추정

케이블의 고장점을 탐지하기 위해서 케이블에 인가한 신호인 가우시안 선형 첩 신호는 주파수가 선형적으로 증가하며 가우시안 포락선에 의하여 시간 주파수 영역 상에서 한정되어 있다. 따라서 가우시안 선형 첩 신호가 존재하는 구간에서 순간 주파수가 선형적으로 증가한다. 결합지점에서 되돌아온 반사파 신호 또한 인가한 신호와 같은 순간 주파수 특성을 지니게 된다. 이러한 순간 주파수 특성을 이용하여 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연을 구하기 위하여 선형 칼만 필터를 이용하여 순간 주파수를 추정하였다. 선형 칼만 필터는 식(7)-(11)과 같다.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + Q) \quad (7)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (8)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \quad (9)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \quad (10)$$

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + R_k \quad (11)$$

선형 칼만 필터를 이용하여 인가한 신호와 반사파의 순간 주파수를 추정하고 추정된 순간 주파수에서 인가한 신호와 반사파의 중심주파수 간의 시간 지연을 구한다. 중심 주파수 간의 시간 지연은 결국 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연이라 할 수 있다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 케이블이 단선된 경우를 가정하였다. 따라서 케이블의 고장점은 1개이다. 시뮬레이션의 조건은 표 1과 같다. 그림 1은 신호를 인가한 지점에서 취득한 신호를 나타낸다. 첫 번째 신호는 인가한 신호를 나타내며 두 번째 신호는 고장점에서 반사된 반사파를 나타낸다. 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연은 300[sample]이다. 그림 2는 인가한 신호와 반사파의 위상 ϕ_k 와 이를 추정한 값을 나타낸다. 노이즈가 존재하는 상황에서 선형 칼만 필터가 위상을 잘 추정함을 알 수 있다. 그림 3은 선형 칼만 필터에 의해서 추정된 순간 주파수를 나타낸다. 추정된 순간 주파수에서 인가한 신호의 중심주파수는 68[sample]에 위치하였고, 반사된 신호의 중심 주파수는 371[sample]에 위치하였다. 따라서 인가한 신호와 반사파 사이의 시간 지연은 303[sample]이다. 시뮬레이션에서 설정한 시간 지연 값인 300[sample]에 거의 근사한 값을 추정함을 확인할 수 있었다.

표 1 시뮬레이션 조건

Sampling rate	200[Msps]
Frequency range	0.025-0.05
Center frequency	0.0375
Time duration of chirp signal	140[sample]
Time delay	300[sample]
Attenuation(α)	0.5
Noise standard deviation	0.0001

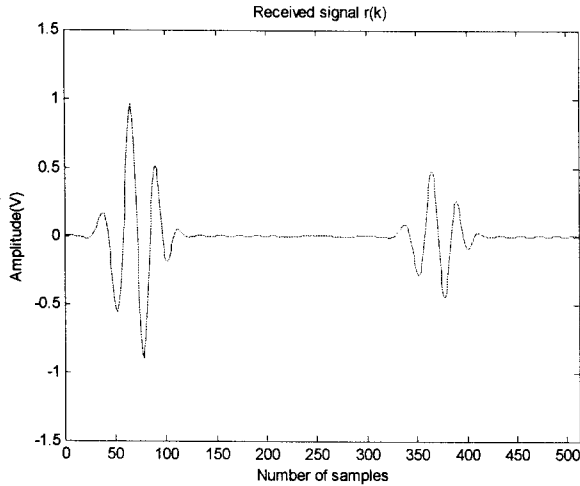


그림 1 신호를 인가한 지점에서 취득한 신호

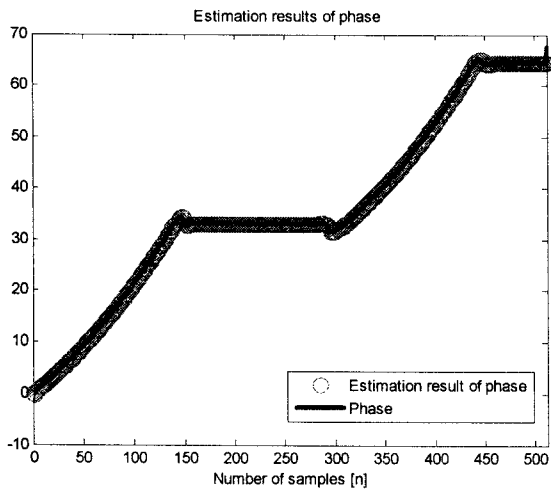


그림 2 신호의 위상 추정 결과

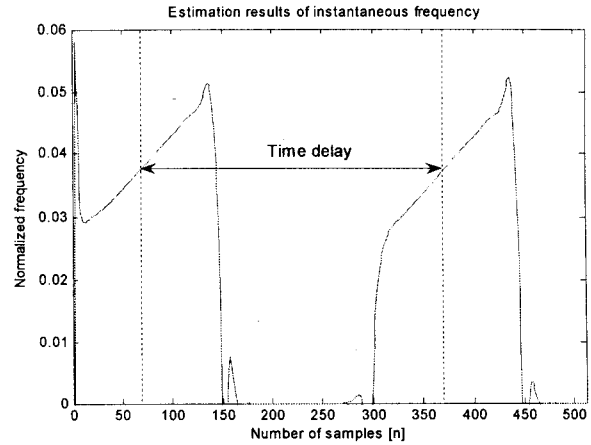


그림 3 추정된 순간주파수와 인가한 신호와 반사파의 중심 주파수간 시간 지연

5. 결론

케이블의 고장점의 위치를 측정하기 위해서 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 선형 칩 신호를 인가 신호로 사용하였다. 고장점에서 반사된 반사파를 모델링하고 선형 칼만 필터를 이용하여 인가 신호와 반사파의 순간주파수를 추정하였다. 추정된 순간 주파수에서 인가한 신호의 중심 주파수와 반사파의 중심 주파수간의 간격을 구함으로써 두 신호 사이의 시간 지연을 측정할 수 있었다.

이 논문은 2009년도 두뇌한국21사업과 산업자원부 전력기반조성사업 센터의 고급인력양성사업을 통한 연세 대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다

참 고 문 헌

- [1] 임종성, 김보경, 주태광, 유성중, "전력케이블 열화진단 기술", 전기학회지, 4호, 제 45권, pp.20-24, 1996. 4.
- [2] Y. J. Shin, E. J. Powers, Tok-Son Choe, Chan-Young Hong, Eun-Seok Song, Jong-Gwan Yook, and Jin-Bae Park, "Applection 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, Dec. 2005.
- [3] Janos Gal, Andrei Campeanu, Ioan Nafornita, "Estimation of Chirp Signals in Gaussian Noise by Kalman Filtering", Signals, Circuits and Systems, 2007. ISSCS 2007. International Symposium on , vol.1, no., pp.1-4, July 2007.
- [4] B.Boashash, "Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal- Part 2: Algorithms and Applications", Proceedings of the IEEE, vol.80, no.4, pp 540-568, April 1992.