

## 실시간 스펙트럼 추정기에 기반한 시간-주파수 영역에서의 동축케이블 결함 검출 기법

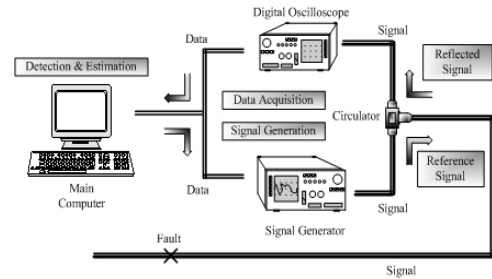
두승호\*, 나원상\*, 광기석\*, 윤태성\*\*, 박진배\*  
 \*연세대학교 전기전자공학과, \*\*창원대학교 전기공학과

### Time-Frequency Domain Reflectometry based on Real-Time Spectrum Estimation for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable

Seung Ho Doo\*, Won Sang Ra\*, Ki-Seok Kwak\*, Tae Sung Yoon\*\*, Jin Bae Park\*

\*Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei Univ. \*\*Dept. of Electrical Engineering, Changwon National Univ.

**Abstract** - 본 논문에서는 실시간 스펙트럼 추정기에 기반하여 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템에서의 동축케이블 결함을 검출하는 방법을 제안한다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 가우시안 포락선(Gaussian Envelop)모양의 첩 신호를 기준신호로 하여 도선에 반사파를 분석하는 기법으로써 타 방법에 비하여 높은 정확도를 자랑하는 것으로 알려져 있다. 하지만 결함 위치를 추정하기 위해 Wigner 시간 주파수 분포 함수를 이용하므로 계산량 증가에 따른 실시간 구현이 어렵다는 단점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 LMS 스펙트럼 추정기를 이용한 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 구현방법을 새롭게 제안한다. 제안된 기법은 실제 동축케이블에 대한 실험결과를 통하여 그 성능을 입증하도록 한다.



<그림 1> 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 구성도

## 1. 서 론

오늘날 전기, 전자 배선 시스템은 초고속 인터넷이나 방송 통신 케이블뿐만 아니라 항공기나 우주 발사체에 이르기까지 복잡하고 다양하게 쓰이고 있다. 90년대 중반이후 발생한 수차례의 항공기 추락사고의 주 원인이 전기 배선의 결함 문제임이 밝혀진 것을 계기로, 정밀 배선 결함 진단 기술의 중요성과 공공에 미치는 파급효과가 중요하게 인식되기 시작하였다[1]. 이를 위해, 지난 수년간 배선 결함 진단을 위하여 일정한 신호를 도선에 인가한 후에 반사되어 돌아오는 신호를 분석하여 배선의 결함 여부를 진단하는 반사파 계측 방법에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다[2]-[4].

반사파 계측 방법은 크게 시간 영역 반사파 계측 방법(TDR : Time Domain Reflectometry), 주파수 영역 반사파 계측 방법(FDR : Frequency Domain Reflectometry), 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법으로 구분된다. 이 가운데서, 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 나머지 두 방법보다 진보된 최신 기술로서 시간과 주파수 각각의 영역에서 분석하는 방법의 단점과 한계를 효과적으로 해결함으로써 높은 정확도로 도선의 결함 여부를 진단할 수 있는 것으로 알려져 있다[5]. 종전의 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 시간 주파수 분포 함수를 사용하여 구현되며, 최종적으로 상호 시간-주파수 분포 함수(Cross Time-Frequency Distribution Function)를 이용하여 배선의 결함 위치를 추정하는 방식으로 구성된다. 해당 방법은 결함 위치 추정 정확도에 있어서는 만족할 만한 성능을 제공하지만, 많은 계산량을 요구하는 알고리즘으로 실시간 구현에 있어서 간과할 수 없는 문제점들을 안고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위해, 본 논문에서는 LMS 알고리즘을 이용한 실시간 스펙트럼 추정기[6-7]를 설계하고, 여기에 시간-주파수 반사파 계측 알고리즘을 결합한 새로운 배선 결함위치 추정 기법을 제안한다. 실제 동축케이블의 결함진단을 위한 실험결과를 이용하여, 적은 계산량으로도 기존의 비실시간 알고리즘과 동등한 결함 위치 추정 성능을 얻을 수 있음을 확인하도록 한다.

## 2. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법

### 2.1 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템

본 절에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 구성에 대해 간략히 설명한다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 <그림 1>에 도시한 바와 같이 신호 발생부(signal generation), 신호 습득부(signal acquisition), 신호 분배부(circulator), 신호 처리부(signal processing)로 구성된다. 실험을 위해 신호 발생부는 ZTEC사의 ZT500PXI, 신호 습득부는 ZTEC사의 ZT430PXI, 신호 분배부는 Renaissance 사의 순환기, 신호 처리부는 National Instrument사의 PXI controller(NI PXI-8176)가 사용되었다.

### 2.2 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘

시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 기준신호로 가우시안 포락선을 갖는 첩 신호를 사용하며, 기준 신호를 도선에 인가한 후 되돌아오는 반사파를 계측하여 분석하는 알고리즘으로 구성된다. 도선의 특성 임피던스(Characteristic Impedance)의 불연속지점에서 발생하는 반사 신호를 취득하고, 식 (1)의 기준 신호와 반사 신호의 시간-주파수 분포 함수와 식 (2)의 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수(Normalized Time-Frequency Cross Correlation Functions)를 이용하여 정확한 도선의 결함 유무와 결함 위치를 계산한다.

$$WVD(t, w) = \int x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-jw\tau}d\tau \quad (1)$$

$$C_{sr}(t) = \frac{1}{E_s E_r(t)} \int_{t-T_s}^{t+T_s} W_r(t', w) W_s^*(t'-t, w) dw dt' \quad (2)$$

여기서  $x(t)$ 는 획득된 신호,  $w$ 는 주파수,  $W_s(t', w)$ 는 기준 신호의 시간-주파수 분포 함수,  $W_r(t', w)$ 는 반사 신호의 시간-주파수 분포 함수,  $E_s(t)$ 는 기준 신호의 에너지이며,  $E_r(t)$ 는 반사 신호의 에너지를 나타낸다.

계산된 시간-주파수 상호 상관 함수를 이용해 기준 신호와 반사 신호 사이의 정확한 시간 지연을 계산한다. 결과는 <그림 4>, <그림 5>의 하단에 도시되어 있다. 시간 지연은 에너지 밀도함수의 중심점, 즉 <그림 4> 및 <그림 5> 하단 그래프의 첩점 사이의 시간차이로 도출된다. 첩점 사이의 시간차이를  $t_d$  라 하면, 도선 결함 거리는 식(3)과 같이 구해진다[8].

$$d = \frac{v_p \cdot t_d}{2} \quad (3)$$

여기서  $d$ 는 결함 거리,  $v_p$ 는 도선에서의 전파진행 속도를 나타낸다.

### 2.3 LMS 알고리즘과 실시간 주파수 분석 기법

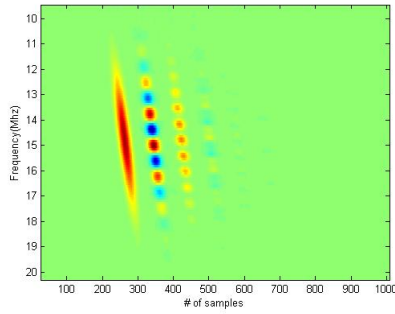
본 논문에서는 사용된 LMS 알고리즘은 식(4)-(6)과 같다.

$$y(n) = \hat{w}^H(n)u(n) \quad (4)$$

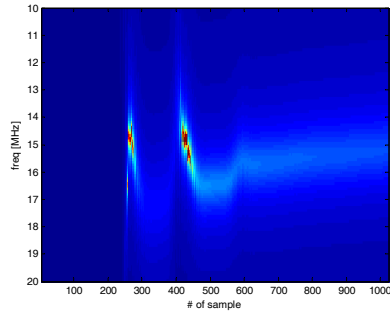
$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (5)$$

$$\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + \mu u(n)e^*(n) \quad (6)$$

여기서  $y(n)$ 는 LMS 알고리즘의 출력,  $u(n)$ 는 입력치,  $\hat{w}^H(n)$ 는 가중치,  $e(n)$ 는 잔류치,  $d(n)$ 는 측정치이며,  $\mu$ 는 스텝 사이즈를 나타낸다. 스펙트럼 추정을 위해  $\hat{w}^H(n)$ 은 3차,  $\mu$ 는 0.35를 사용하였다.



<그림 2> 시간-주파수 분포 함수에 의한 스펙트럼



<그림 3> 실시간 주파수 분석 기법에 의한 스펙트럼

LMS 알고리즘에 의해 구해진 반사파 신호의 AR 계수를 이용하여 식 (7)과 같이 실시간으로 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$F(w,n) = \frac{1}{\left| 1 - \sum_{k=1}^3 \hat{w}_k(n) e^{-jwk} \right|^2} \quad (7)$$

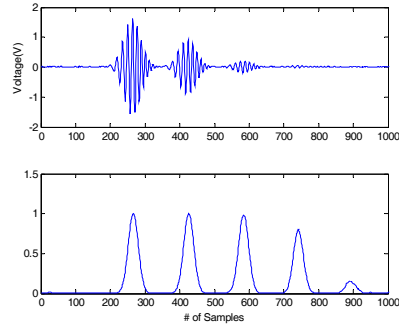
실제 구현에 있어서는 식 (7)의 스펙트럼을 구할 필요가 없다. 결합위치 추정은 식 (2)의 시간-주파수 상호상관함수를 통하여 이루어지므로 구해진 AR 계수만을 가지고 이를 계산할 수 있다.

### 3. 실험 결과

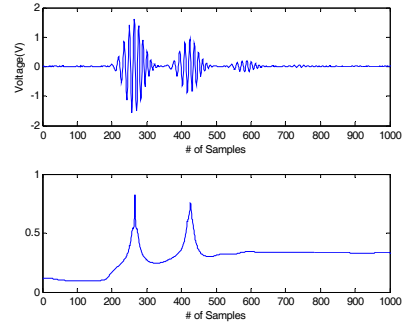
기존의 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법[5]과 제안된 방법의 결과를 비교한다. 본 실험은 100m, 10C-FBT 동축케이블에 대해 10MHz ~ 20MHz의 주파수와  $\pm 2V_{pp}$ 의 전압을 갖는 칩 신호를 이용하여 이루어졌다. 실시간 스펙트럼 추정 결과는 <그림 2> 와 <그림 3>에 도시하였다. 도선의 결합 거리 측정을 위해 이루어진 정규화 된 시간-주파수 상호 상관 함수의 결과는 <그림 4> 와 <그림 5>와 같다. SNR 문제 등으로 인해 실시간 주파수 분석 기법에 의한 스펙트럼은 반사파 신호의 고조파를 정확히 추정하지는 못한다. 하지만, 결합위치 측정은 고조파의 추정 가능 여부와 큰 관계가 없으므로, 실제 구현에 있어서는 문제가 되지 않는다. 기존의 방법과 제안된 방법 사이의 실험 결과를 비교하여 보았다. 도선 결합위치가 100m인 경우에 대한 반복실험 결과, 기존 방법은 오차수준 0.4%[8], 제안된 방법은 0.6% 이내의 오차를 보인다. 실험 결과로 볼 때, 적은 계산량으로도 기존 방법과 유사한 수준의 결합 위치 추정 정밀도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 가우시안 포락선 모양을 가지는 칩 신호를 기준신호로 사용하여 도선의 불연속점에서 반사되어 돌아오는 신호를 분석하여 도선의 결합 위치를 추정하는 기법이다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 이전의 전통적인 반사파 계측 방법과 달리 시간-주파수 영역을 모두 이용하기 때문에 타 배선 결합 진단 방법에 비해 정확도가 우수하다는 장점을 갖는다[9]. 하지만 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 결합위치 추정을 위해 많은 계산량을 요구하므로 실시간 구현이 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자 LMS 주파수 추정기법을 이용한 실시간 시간-주파수 반사파 계측기법을 제안하였으며, 실제 실험결과 만족할만한 추정성능을 보임을 확인하였다. 제안된 기법은 다양한 시스템에 대한 실시간 결합 감시 시스템 등으로 확장하여 적용될 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 4> 기존의 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 결과



<그림 5> 제안된 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 결과

본 논문은 전력산업연구개발사업으로 수행되었습니다. (과제번호:R-2006-1-229)

### [참 고 문 헌]

- [1] C.Furse and R.Haupt, "Down to the wire: The hidden hazard of aging aircraft wiring", IEEE Spectrum, pp. 35-39, Feb. 2001
- [2] Yamada, H., Ohmiya, M., Ogawa, Y. and Itoh, K., "Superresolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer", Antennas and IEEE Transactions on Propagation, Vol. 39, pp. 177-183, Feb. 1991.
- [3] Van Hamme, H., "High-resolution frequency-domain reflectometry by estimation of modulated superimposed complex sinusoids", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, pp. 762-767, Dec. 1992.
- [4] Agrez, D., "Approximation of the skin effect to improve cable-fault location by TDR", Instrumentation and Measurement Technology Conference 2003, Proceedings of the 20th IEEE, Vol. 1, pp. 50-53, May 20-22, 2003.
- [5] Yong-June Shin, Edward J. Powers, Tok-Son Choe, Chan-Yong Hong, Eun-Seok Song, Jong-Gwan Yook, Jin Bae 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, Dec. 2005.
- [6] LLOYD J. GRIFFITHS, "Rapid Measurement of Digital Instantaneous Frequency", IEEE TRANSACTIONS OF ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, Vol. ASSP-23, No.2, Apr. 1975.
- [7] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory forth editions", Prentice Hall, 2002
- [8] Tokson Choe, ChanYoung Hong, Jin Bae Park, Tae Sung Yoon, "Implementation of a Time-Frequency Domain Reflectometry System with PXI Platform for a Coaxial Cable", IMTC2004, May. 2004.
- [9] 최덕선, 광기석, 윤태성, 박진배, "시간-주파수 반사파 계측 방법을 이용한 전송선로의 결합 위치 추정", Trans. KIEE. Vol. 54D, No. 9, Sep. 2005.