시간-주파수 반사파 계측 방법을 이용한 전송선로의 결함 위치 추정

論 文
54D-9-1

Estimation of Fault Location on a Transmission Line via Time-Frequency Domain Reflectometry

崔 德 善* · 郭 基 錫** · 尹 泰 星*** · 朴 珍 培†
(TokSon Choe · Kwak, Ki-Seok · Tae Sung Yoon · Jin Bae Park)

Abstract - In this paper, a new high resolution reflectometry scheme, time-frequency domain reflectometry(TFDR), is proposed to detect and estimate a fault in a transmission line. Traditional reflectometry methodologies have been achieved either in the time domain or in the frequency domain only. However, the TFDR can jump over the performance limits of the traditional reflectometry methodologies because the acquired signal is analyzed in time and frequency domain simultaneously. In the TFDR, the new reference signal and the novel TFDR algorithm are proposed for analyzing the acquired signal in the time-frequency domain. Because the reference signal of Gaussian envelop chirp signal is localized in the time and frequency domain simultaneously, it is suitable to the analysis in the time-frequency domain. In the proposed TFDR algorithm, the time-frequency distribution function and the normalized time-frequency cross correlation function are used to detect and estimate a fault in a transmission line. That algorithm is verified for real-world coaxial cables which are typical transmission line with different types of faults by the TFDR system composed of real instruments. The performance of the TFDR methodology is compared with that of the commercial time domain reflectometry(TDR) experiments, so that concludes the TFDR methodology can detect and estimate the fault with smaller error than TDR methodology.

Key Words : Time-Frequency Domain Reflectometry, Transmission Line, Estimation of Fault Location, TFDR algorithm

1. 장 서 론

항공기나 선박에서와 같은 큰 전기, 전자 시스템은 내부에 시스템의 동력전달, 제어계측 등 이유로 복잡한 전기, 전자 배선이 필수적이다. 이러한 전기, 전자 시스템에서 사용되는 총 배선의 길이는 용도에 따라 수 미터에서 수십 킬로미터에 이른다[1]. 따라서, 이러한 복잡한 배선의 정비에는 많은 노력과 시간이 소요된다. 전기, 전자 시스템에서 배선은 직류전원 배선, 교류전원 배선, 신호전달 배선으로 나눌 수 있다. 이러한 배선들은 보통 다발(bundle)로 구성되는데 보통 한 다발은 많게는 50개에서 60개의 도선들로 이루어져 있다. 이러한 복잡한 배선을 진단하고 점검하는데 있어서 대부분 숙련된 사람에 의한 육안 관찰을 주로 사용하고 있다[2]. 이런 숙련된 사람에 의한 복잡한 배선들의 진단과 점검은 정확한 진단과 점검은 가능하지만 복잡한 배선들을 진단하고 점검하는데 있어서 많은 시간과 노력과 비용을 요구되며, 이러한 숙련된 인원을 교육하는데 많은 시간이 필요하다. 또한, 그날그날 사람의 상태에 따라 진단과 점검의 정확도와 신뢰도가 다르다는 단점을 가지고 있다.

숙련된 사람에 의한 진단과 점검을 보조하거나 궁극적으로 진단과 점검의 자동화를 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다. 배선을 진단하고 점검하는 하나의 방법으로 도선의 시작과 끝부분 사이의 저항을 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 도선의 상태가 양호하면 저항이 낮고, 도선의 상태가 불량하면 저항이 높다는 원리를 이용하는 방법이며, 이 방법은 도선의 결함 존재 유무는 알 수 있지만 그 위치를 추정할 수 없다는 단점을 가진다. 이 방법 이외에도 도선의 누설 전류(leakage current), 부분 방전(partial discharge), 유전체 손실(dielectric loss) 등을 측정하여 도선의 결함 여부를 진단하는 방법들이 있다[3]. 이러한 방법들 또한 도선의 결함 존재 유무는 알 수 있지만 결함의 정확한 위치를 추정할 수 없다는 단점을 가진다.

도선의 결함 유무를 진단할 수 있으며 그 위치를 추정할 수 있는 방법으로 오래전부터 연구되어 왔으며 현재 상용화된 방법이 반사파 계측 방법이다[4]-[11]. 반사파 계측의 기본 개념은 일정한 신호를 도선에 인가하고 결함 부분이나 도선의 말단에서 반사되어 돌아온 신호를 분석하여 도선의 결함 유무를 진단하고 결함의 위치를 추정하는 것이다. 반사파 계측 방법은 분석 방법에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 시간 영역 반사파 계측 방법(TDR : Time Domain Reflectometry)이고, 다른 하나는 주파수 영역 반사파 계측 방법(FDR : Frequency Domain Reflectometry)이다.

시간 영역 반사파 계측 방법[12]은 사각 펄스(pulse) 신호

† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學科 敎授 · 工博
E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr
* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 12月 17日
最終完了 : 2005年 5月 11日

시간 영역 반사파 계측 방법[12]은 사각 펄스(pulse) 신호나 스텝(step) 모양의 전압 신호를 기준 신호로 사용한다. 이 기준 신호를 진단하고자 하는 도선에 인가하고 도선의 결함 부분이나 말단부에서 반사되어 돌아오는 신호를 시간 영역에서 분석하여 도선의 결함 유무를 진단하고 결함의 위치를 추정하는 방법이다. 시간 영역 반사파 계측 방법은 반사되어 돌아오는 신호의 전압 변화와 위상 변화를 이용하여 도선의 결함 상태를 진단하고 기준 신호와 반사 신호 사이의 시간지연을 측정하여 결함의 위치를 계산한다. 시간 영역 반사파 계측 방법의 성능은 시간 영역에서의 분해능(resolution)에 의해 크게 영향을 받는다.

주파수 영역 반사파 계측 방법[13]은 기준 신호로 일정한 주파수 대역을 갖는 정현파들을 사용한다. 시간 영역 반사파 계측 방법과 마찬가지로 기준 신호를 진단하고자 하는 도선에 인가하고 도선의 결함 부분이나 말단부에서 반사되어 돌아오는 신호를 주파수 영역에서 분석하여 도선의 결함 유무와 결함의 위치를 알아내는 방법이다. 주파수 영역 반사파 계측 방법은 전압 정재파 비(VSWR : voltage standing-wave ratio)나 반사 손실(return loss)을 측정하여 결함 상태를 진단하고 도선의 결함 부분이나 말단부에서 반사되어 생기는 정재파(standing-wave)의 주파수를 측정하여 결함 위치를 측정한다. 이 주파수 영역 반사파 계측 방법의 성능은 측정할 수 있는 주파수 대역폭의 크기에 의해 크게 좌우된다.

기존의 반사파 계측 방법들은 시간 영역 또는 주파수 영역에 한정되어 기준 신호를 생성하고 반사 신호를 분석한다. 그러나, 본 논문에서 제안하는 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법(TFDR : Time-Frequency Domain Reflectometry)은 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석되어질 수 있기 때문에 기존 방법들에 비해 더 나은 성능을 얻을 수 있다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 사용되는 기준 신호와 반사 신호를 분석하는 알고리즘으로 인해 기존의 반사파 계측 방법과 구별된다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호는 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석되어질 수 있기 위해 가우시안(Gaussian) 포락선 모양을 가지는 첩(chirp) 신호를 사용한다. 가우시안 포락선 모양을 가지는 첩 신호는 시간에 따라 주파수가 증가하는 첩 신호를 사용하여 주파수 성분을 생성하였으며, 가우시안 포락선을 첩 신호에 변조함으로써 시간과 주파수 영역에서 동시에 지역화(localize)되도록 한다. 또한, 이러한 기준 신호를 대상 전송선로에 인가했을 때 되돌아오는 반사 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석하기 위해 위그너 시간-주파수 분포 함수(Wigner Time-Frequency Distribution Function)와 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수(Normalized Time-Frequency Cross Correlation Function)를 사용한 알고리즘을 제안하여 대상 전송선로의 결함 유무와 결함 위치를 계산한다. 본 논문에서는 제안된 기준 신호와 알고리즘은 실제 계측기들을 이용하여 구현된 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템과 전송선로 중에서 배선에 많이 쓰이는 실제 동축 케이블을 이용한 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법

본 장에서는 제안하는 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법과 알고리즘에 대하여 서술한다. 우선, 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법에 사용되는 기준 신호와 시스템에 대해 상세히 서술한다. 그 후에 이를 사용한 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 핵심인 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 상세히 서술한다.

2.1 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호

시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석하기 위해 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법이나 주파수 영역 반사파 계측 방법에 사용되는 펄스 또는 스텝 신호는 일정한 주파수 대역을 가지는 정현파를 사용하지 않고 독특한 기준 신호를 사용한다. 본 논문에서는 기준 신호가 주파수 영역에서 일정한 대역을 가지기 위해 시간에 따라 주파수가 일정하게 증가하는 첩(chirp) 신호를 사용하며 시간과 주파수 영역에서 동시에 지역화하기 위해 가우시안 포락선을 변조한다. 기준 신호를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다[14].

$$s(t) = (\alpha/\pi)^{1/4} e^{-\alpha(t-t_0)^2/2 + j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)} \quad (1)$$

여기서 각 파라미터 α, β, t_0, w_0는 시간 중심(t_s), 시간폭(T_s), 주파수 중심(w_s), 주파수 대역(B_s)과 상관관계가 있다. 시간 중심(t_s)과 시간폭(T_s)을 식 (1)로부터 유도하면 식 (2) 및 식 (3)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$t_s = \int t|s(t)|^2 dt = t_0 \quad (2)$$

$$T_s^2 = \int (t-t_s)^2 |s(t)|^2 dt = \frac{1}{2\alpha} \quad (3)$$

식 (1)의 퓨리에 변환을 이용해서 주파수 중심(w_s)과 주파수 대역(B_s)도 시간 중심(t_s)와 시간폭(T_s)를 구하는 방법과 유사하게 구할 수 있다. 우선, 식 (1)의 퓨리에 변환은 식 (4)과 같다.

$$S(w) = \sqrt{\frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}(\alpha - j\beta)}}\, e^{-(w-w_0)^2/2(\alpha - j\beta)} \quad (4)$$

식 (4)를 이용해 주파수 중심(w_s), 주파수 대역(B_s)를 유도하면 식 (5), (6)과 같다.

$$w_s = \int w|S(w)|^2 dw = w_0 \quad (5)$$

$$B_s^2 = \int (w-w_s)^2 |S(w)|^2 dw = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha} \quad (6)$$

시간 중심(t_s), 시간폭(T_s), 주파수 중심(w_s), 주파수 대역

(B_s)의 선택은 대상 전송선로의 전기적, 물리적 특성에 의해 영향을 받는다. 기준 신호의 주파수 영역은 대상 전송선로의 주파수에 대한 감쇄 특성을 고려하여 기준 신호가 먼 거리를 왕복하더라도 반사 신호를 습득할 수 있는 주파수 영역을 선택하는 것이 바람직하다. 기준 신호의 주파수 영역이 선택된 후에 포락선의 시간폭이 결정되어야 한다. 포락선의 시간폭은 선형적으로 주파수의 변화가 이루어지면서도 최대한 폭이 작아지도록 선택되어야 하며, 이렇게 함으로써 기준 신호는 양호한 분해능을 가질 수 있다. 하지만 이런 최적의 기준 신호 선택은 대부분 시스템의 성능에 의해 크게 좌우된다.

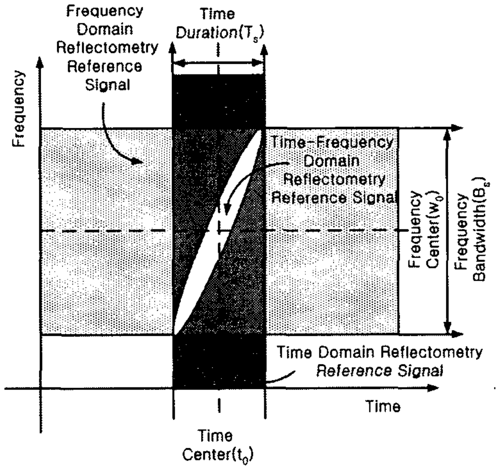


그림 1 TDR, FDR 및 TFDR의 기준신호

Fig. 1 Reference signals of TDR, FDR and TFDR

그림 1은 기존의 방법들과 비교하여 시간-주파수 영역에서 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법이 사용하는 기준신호의 시간 중심(t_s), 시간폭(T_s), 주파수 중심(w_s), 주파수 대역(B_s)을 보여준다. 또한, 그림 1은 시간 영역 반사파 계측 방법, 주파수 영역 반사파 계측 방법, 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호들의 차이를 보여준다. 시간 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호는 펄스 또는 스텝 신호이다. 이 신호는 시간에 대해서는 지역화 되어 있지만 그 주파수에 대해서는 지역화 되어 있지 않다. 마찬가지로 주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호가 일정한 주파수 대역을 가지는 정현파들이기 때문에 주파수 영역에서는 지역화 되어 있지만 시간 영역에서 본다면 이 신호들은 무한대의 시간 성분을 가지고 있다. 이에 비해 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호는 시간과 주파수 영역에서 동시에 지역화 되어 있다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호가 가지고 있는 이런 특성 때문에 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석 가능하다.

2.2 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템

본 절에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 서술한다. 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 크게 신호 발생부(signal generation), 신호 습득부(signal acquisition), 신호 분배부(circulator), 신호 처리부(signal processing)로 구성된다. 그림 2는 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 개략적으로 나타낸다.

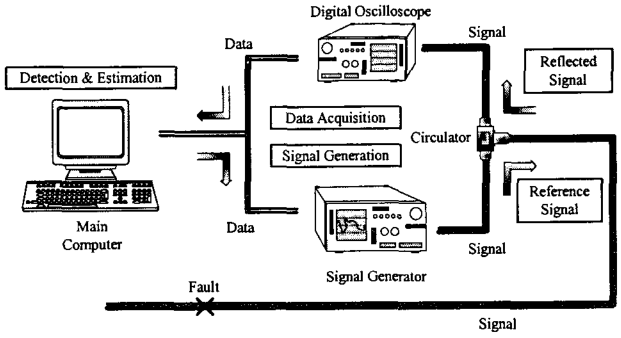


그림 2 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 블럭선도

Fig. 2 Block diagram of the TFDR system

그림 2에서 신호 발생기는 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템에서 사용되는 기준 신호를 발생시키는 역할을 한다. 이 신호 발생기에서 발생된 신호는 순환기로 구현된 신호 분배부로 전송된다. 신호 분배부의 역할은 신호 발생기, 신호 습득기, 대상 전송선로를 연결해 주는 역할을 한다. 신호 분배부로 입력된 신호의 일부는 신호 습득기로 직접 입력되며 일부는 대상 전송선로로 전송된다. 대상 전송선로로 전송된 신호는 대상 전송선로의 결함 부분에서 반사되어 신호 발생기에서 신호 분배부를 거쳐 바로 신호 습득기로 입력된 신호와 시간지연을 가지고 신호 습득기로 전송된다. 신호 습득부에서 얻어진 아날로그 신호는 디지털화 되어 컴퓨터로 전송되고 컴퓨터에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 수행한다. 또한, 실험의 편의성과 원활한 수행을 위해 컴퓨터와 계측기들을 통신 케이블로 연결하여 컴퓨터가 각 계측기를 통제할 수 있는 기능을 갖도록 한다. 여기서, 컴퓨터는 신호 처리부 역할을 수행한다.

2.3 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘

시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘의 기본 개념은 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석되어질 수 있는 기준 신호를 사용하여 얻어진 반사 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석하여 대상 전송선로의 결함 유무와 결함의 정확한 위치를 추정하는 것이다. 반사 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석하기 위해 위그너 시간-주파수 분포 함수와 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수를 사용한다. 제안된 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘은 7단계로 세분할 수 있다.

1) 단계 1

시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘은 그림 2의 신호 습득기에서 얻어진 디지털 데이터의 습득으로부터 시작한다. 신호 습득기에서는 신호 발생기에서 발생하여 순환기를 거쳐 직접 입력된 신호와 순환기에서 대상 전송선로로 진행하여 대상 전송선로의 결함 지점에서 반사되어 돌아오는 신호가

함께 존재한다. 이 신호를 신호 습득기가 디지털화하여 컴퓨터로 전송하고 컴퓨터에서는 이 디지털 데이터를 읽어 들인다.

2) 단계 2

단계 1에서 습득된 데이터에는 신호 발생기 등 여러 가지 원인에 의해 발생하는 노이즈와 DC 성분이 존재한다. DC 성분은 전체 신호의 크기에 비해 크기는 작지만 나중에 습득된 신호의 시간-주파수 분포를 계산할 때 영향을 미친다. DC 성분은 시간-주파수 분포에서 시간에 따라 주파수가 0Hz 근처에서 일정한 크기를 가짐으로써 나타난다. 이 DC 성분이 있는 시간-주파수 분포는 전체 알고리즘의 성능에 오차 요인으로 작용한다. 따라서, 단계 1에서 습득된 신호에서 DC 성분이 제거되어야 한다. DC 성분의 제거는 신호 발생기에서 기준 신호 발생시 신호의 크기가 0인 구간을 기준 신호 앞에 넣어줌으로써 나중에 신호 습득시 그 앞부분에서 DC 성분을 측정하여 전체 신호에서 그 성분을 제거한다.

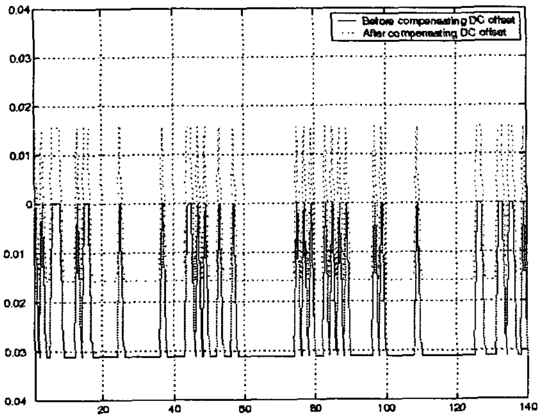


그림 3 DC 성분 제거
Fig. 3 Elimination of DC component

그림 3에서 실선 부분이 DC 성분 제거전 기준 신호의 앞부분에 삽입한 크기가 0인 구간이고 점선 부분이 그 신호에서 DC 성분을 실제로 측정하여 그 성분을 제거한 신호를 의미한다. 이후로 단계 1에서 습득된 전체 신호에서 DC 성분을 제거한 신호를 $r(t)$라고 정의한다. 그리고, 그림 3에서 클럭(clock)과 유사한 신호는 신호 발생기에서 발생되는 노이즈를 의미한다.

3) 단계 3

본 단계에서는 단계 2에서 얻어진 신호 $r(t)$를 힐버트(Hilbert) 변환을 하는 단계이다. 만약 $r(t)$를 퓨리에 변환을 한다면 주파수 영역에서 좌, 우 대칭인 형태로 나타난다. 실제 신호처리를 하는데 있어서 어느 한 부분만 있어도 가능하며 효율적인 처리를 위해 나머지 부분은 제거해 주는 것이 바람직하다. 힐버트 변환은 주파수 영역에서 좌, 우 대칭인 스펙트럼을 한 쪽면에만 나타나도록 적당한 허수값을 붙여 복소수화 시켜 준다. 이 복소수화 시킨 신호를 해석적인(analytic) 신호라고 부른다. 만약 실수값으로만 이루어진 신호 $f(t)$가 있고 이 신호의 퓨리에 변환이 $F(w)$라고 한다면 $-jF(w)sgn(w)$을 역퓨리에(inverse Fourier) 변환한 것을 힐버트 변환이라고 부른다. 여기서 $sgn(w)$은 w가 0 이상일 때는 1이며 0 미만일 때는 -1인 함수를 의미한다. 본 단계에서 $r(t)$를 힐버트 변환하여 얻어진 신호를 이후로 $h(t)$로 정의한다.

4) 단계 4

단계 3에서 얻어진 $h(t)$를 바탕으로 본 단계에서는 $h(t)$의 시간-주파수 분포를 계산하는 단계이다. 시간-주파수 분포 함수는 시간-값에 대한 데이터를 시간-주파수-값에 대한 데이터로 재구성하는 함수이다. 시간-주파수 분포 함수에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 가장 기본적인 시간-주파수 분포 함수인 커널이 1인 위그너 시간-주파수 분포를 사용한다. 위그너 시간-주파수 분포 함수에 $h(t)$를 대입하여 얻어진 위그너 시간-주파수 분포 $W_r(t,w)$는 식 (7)과 같다.

$$W_r(t,w) = \frac{1}{2\pi}\int h^*(t-\frac{1}{2}\tau)h(t+\frac{1}{2}\tau)e^{-j\tau w}d\tau \tag{7}$$

5) 단계 5

단계 4에서 얻어진 위그너 시간-주파수 분포 $W_r(t,w)$는 신호 발생기에서 순환기를 거쳐 바로 들어온 신호와 대상 전송선로의 결합 부분에서 반사되어 돌아온 신호가 함께 존재한다. 만약 신호 발생기의 채널(channel)이 2개라면 2개의 채널에서 동시에 같은 신호를 발생시키고 그 중 한 채널은 신호 발생기와 신호 습득기를 직접 연결하여 기준 신호를 추출한다. 신호 발생기에서 발생시키는 기준 신호의 시간폭과 주파수 대역은 알고 있기 때문에 직접 습득된 신호의 시간 중심을 안다면 그 시간 중심을 기준으로 알고 있는 시간폭만큼 지역화 시켜 기준 신호를 추출할 수 있다. 기준 신호를 직접 습득시 노이즈도 같이 섞여 있지만 신호 발생기에서 발생되는 노이즈는 그 크기가 작고 거의 백색 가우시안(White Gaussian) 노이즈와 유사한 특성을 보이기 때문에 단순히 직접 습득된 신호의 시간축에 대한 평균을 구함으로써 바로 습득된 신호의 시간 중심을 구할 수 있다. 이는 백색 가우시안 노이즈의 경우 그 평균이 0이기에 가능하다. 그러므로, 임의의 시간에 대한 신호 $x(t)$의 경우 식 (8)에 의해 신호의 시간 중심을 구할 수 있다.

$$m = \bar{t} = \int t \cdot x(t)\,dt \tag{8}$$

만약 신호 발생기의 채널이 하나뿐이라면 습득된 신호에서

신호 발생기에서 순환기를 거쳐 신호 습득기로 직접 들어온 신호를 임의로 원래 알고 있는 기준 신호의 시간폭 보다 조금 넓게 추출한 후 위와 같은 과정을 반복함으로써 그 기준 신호를 추출해 낼 수 있다. 이렇게 추출된 기준 신호의 위그너 시간-주파수 분포는 식 (7)에 의해 계산되어질 수 있고 이후로 이 기준 신호의 위그너 시간-주파수 분포를 $W_s(t,w)$로 정의하고, 시간 영역에서의 이 신호를 $s(t)$라고 정의한다.

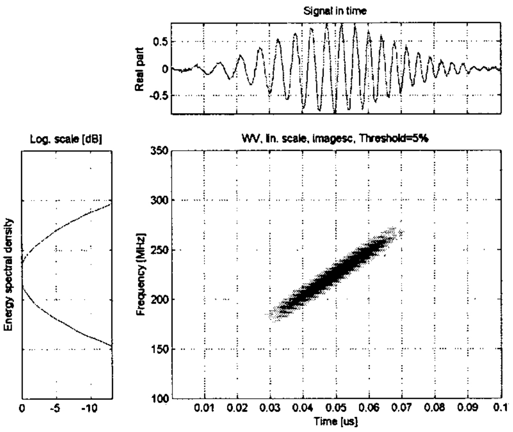


그림 4 추출된 기준 신호의 위그너 시간-주파수 분포
Fig. 4 Wigner distribution of the extracted reference signal

그림 4는 케이블 방송국에서 고주파 통신 케이블에 사용되는 5C-FBT 동축 케이블의 40 [m] 위치에 결함을 만들고 시간폭이 60 [ns]이며 주파수 대역이 160~300 [㎒]인 기준 신호를 인가한 후에 습득된 신호에서 위와 같은 방법으로 기준 신호를 추출하여 얻어진 위그너 시간-주파수 분포이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 추출된 기준 신호는 시간과 주파수 영역에서 동시에 지역화 되어 있는 신호임을 확인할 수 있다.

6) 단계 6

단계 6은 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘에서 가장 중요한 부분이다. 본 단계에서는 기준 신호와 반사 신호 사이의 시간지연을 정확히 측정하기 위해 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수를 사용한다. 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수의 정의는 식 (9)와 같다[15].

$$C_{sr}(t)=\frac{1}{E_s E_r(t)}\int_{t'=t-T_s}^{t'=t+T_s}\int W_r(t',\omega)W_s(t'-t,\omega)d\omega dt' \qquad (9)$$

여기서

$$E_s = \iint W_s(t',w)\,dw\,dt' \qquad (10)$$

$$E_r(t) = \int_{t'=t-T_s}^{t'=t+T_s}\int W_r(t',w)\,dw\,dt' \qquad (11)$$

이며, T_s는 기준 신호 $s(t)$ 또는 $W_s(t,w)$의 시간폭을 의미한다. E_s는 기준 신호 $s(t)$ 또는 $W_s(t,w)$의 에너지를 의미한다. $E_r(t)$는 $r(t)$ 또는 $W_r(t,w)$의 시간 t에서 기준 신호의 시간폭만큼 추출된 신호의 에너지를 의미한다. 그러므로, $C_{sr}(t)$는 시간 t에 대해 시간-주파수 영역에서 $W_s(t,w)$와 $W_r(t,w)$ 사이의 상호 상관 함수를 의미한다.

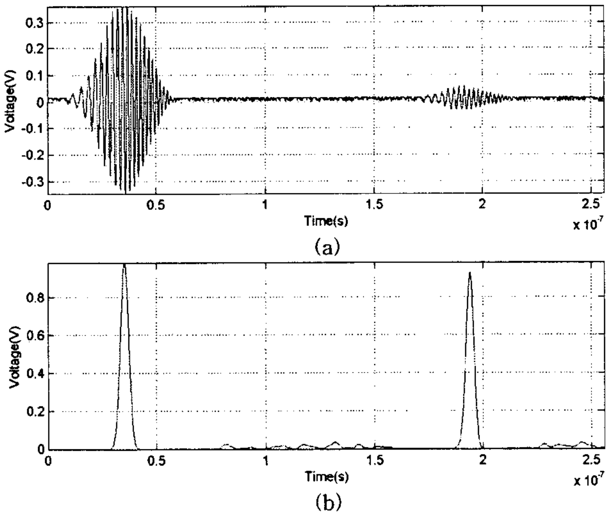


그림 5 반사 신호와 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수
Fig. 5 A reflected signal and the normalized time-frequency cross correlation

그림 5는 40 [m]에 결함이 있는 5C-FBT 동축 케이블에 기준 신호를 인가하고 얻어진 신호이다. 그림 5(a)는 단계 2에서 얻어지는 신호인 $r(t)$를 의미하며, 그림 5(b)는 그 신호의 $C_{sr}(t)$를 의미한다. 그림 5(a)에서 10 [ns]와 70 [ns] 사이의 신호가 신호 발생기에서 순환기를 거쳐 직접 신호 습득기로 입력된 신호를 의미하며, 170 [ns]에서 230 [ns] 사이의 신호는 40 [m] 결함 부분에서 반사되어 돌아온 신호를 의미한다. 그림 5(b)는 추출된 기준 신호의 위그너 시간-주파수 분포 $W_s(t,w)$와 $r(t)$의 위그너 시간-주파수 분포 $W_r(t,w)$ 사이의 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수 $C_{sr}(t)$를 의미한다. $C_{sr}(t)$는 정규화를 했기 때문에 그림 5(a)에서 170 [㎲]와 230 [㎲]에 있는 반사 신호가 그림 5(b)에서는 큰 값으로 나타난다. 그림5(b)에서 이상적인 단선이나 단락일 경우 전반사가 되므로 170 [㎲]와 230 [㎲]에 있는 반사 신호는 1이 나와야 한다. 실제 실험을 통해 거의 1에 가까운 값이 나옴을 확인할 수 있었다. 이에 비추어 손상일 경우 반사의 정도가 달라지므로 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 $C_{sr}(t)$에서 반사 신호의 피크(Peak)값을 읽어서 손상의 정도를 알 수 있다. 더 나아가 기준 신호와 반사 신호 사이의 위상 값을 읽어서 단선과 단락을 구별할 수 있다[16]. $C_{sr}(t)$를 이용하여 그림 5(a)에서 170 [㎲]와 230 [㎲] 사이의 반사 신호를 추출하여 위그너 시간-주파수 분포를 그려보면 그림 6과 같다.

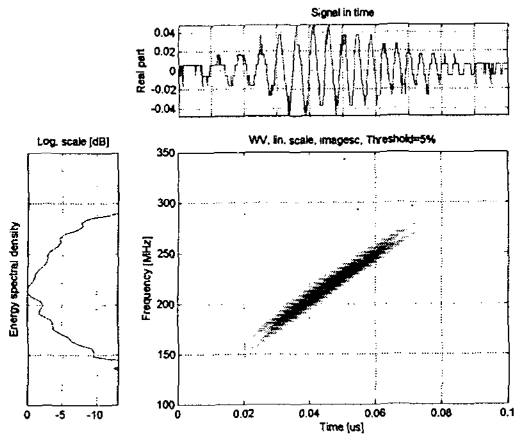


그림 6 반사 신호의 위그너 시간-주파수 분포
Fig. 6 Wigner time-frequency distribution of the reflected signal

그림 6에서 반사 신호 주위로 분포되어 있는 신호가 존재하는데 이는 계측기에 의해 발생하는 노이즈(noise)를 의미한다.

7) 단계 7

본 단계에서는 단계 6에서 얻어진 $C_{sr}(t)$로부터 기준 신호와 반사 신호 사이의 정확한 시간지연을 계산한다. 그림 5(b)로부터 기준 신호와 반사 신호의 피크(peak)를 알 수 있다. 기준 신호의 시간폭은 알고 있기 때문에 이 피크 정보를 기준으로 $C_{sr}(t)$에서 기준 신호의 시간폭 만큼 기준 신호와 반사 신호를 지역화할 수 있다. 이렇게 $C_{sr}(t)$에서 지역화된 기준 신호와 반사 신호에 대해 식 (8)을 사용하여 더욱 정확한 기준 신호와 반사 신호의 시간 중심을 계산할 수 있다. 이 결과를 통해 기준 신호와 반사 신호 사이의 시간지연 t_{delay}를 정확히 계산할 수 있으며, 시간지연 t_{delay}와 신호의 해당 매질에서의 진행속도 v_p를 안다면 식 (12)에 의해 결함의 정확한 위치 d를 얻을 수 있다.

$$d = \frac{v_p \cdot t_{delay}}{2} \quad (12)$$

식 (12)에서 2로 나누는 이유는 신호 발생기로부터 대상 전송선로로 인가된 신호는 결함 부분에서 반사되어 다시 돌아오기 때문에 결함의 위치는 전체 신호가 진행한 거리의 반이기 때문이다.

3. 실험 및 결과 고찰

본 장에서는 계측기들을 사용하여 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 구현하고 대표적인 전송선로인 실제 동축 케이블에 결함을 발생시켜 본 논문에서 제안한 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 검증하였다. 먼저, 범용 계측기들을 이용하여 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 구현하고 동축 케이블의 종류, 길이, 결함의 종류를 달리하여 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 시험하였다. 제안된 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 시간 영역 반사파 계측 장비를 사용하여 똑같은 실험을 수행하고 그 결과를 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 통해 얻어진 결과와 비교하였다.

3.1 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 구현

본 실험에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법과 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법을 비교하였다. 범용 계측기들로 구성된 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템은 신호 발생부를 Tektronix사의 AWG610 임의 파형 발생기(2.6GS/sec), 신호 습득부는 Agilent사의 54845A 오실로스코프(8GS/sec), 신호 분배부는 Renessance사의 순환기, 신호 처리부는 데스크탑 컴퓨터로 각각 구현하였다. 비교 실험을 위해 사용된 시간 영역 반사파 계측 장비는 HP사의 54750A/54754A(12GS/sec)를 사용하였다. 실제로 구성된 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템과 시간 영역 반사파 계측 장비는 그림 7과 같다.

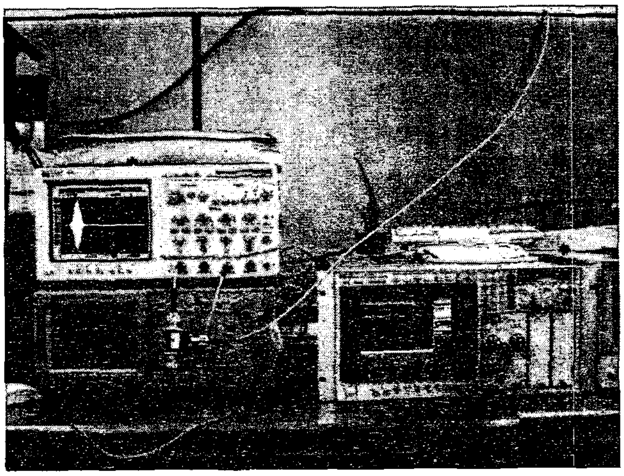


그림 7 범용 계측기로 구현된 TFDR 시스템과 TDR 시스템
Fig. 7 TFDR and TDR system composed of commercial instruments

그림 7에서 왼쪽 하단에 있는 장비가 Tektronix사의 AWG610 임의 신호 발생기이며, 왼쪽 상단에 있는 장비가 Agilent사의 54845A 오실로스코프이다. 그리고, AWG610 임의 파형 발생기와 54845A 오실로스코프 사이에 있는 것이 신호 발생기, 신호 습득기, 대상 동축 케이블을 연결시켜 주는 순환기이다. 또한, 그림 7에서 오른쪽에 있는 장비는 HP사의 54750A/54754A 시간 영역 반사파 계측 장비이다. 오른쪽 장비에서 전체 프레임에 해당하는 부분은 오실로스코프 기능을 수행하는 54750A이며, 장비의 오른쪽 하단 부분에 세 개의 원형 단자가 있는 사각형 부분은 시간 영역 반사파 계측 방법의 기준 신호인 스텝 신호를 발생시키고 결함 부분에서 반사되어 돌아오는 신호를 습득하는 54754A 모듈(module)이다.

범용 계측기로 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 구현할 때 실험의 원활한 수행을 위해 각 계측기들을 제어하며 알고리즘을 수행하는 별도의 그래픽 유저 인터페이스 프로그램을 개발하여 사용하였다. 개발된 그래픽 유저 인터페이스는 그림 8과 같다.

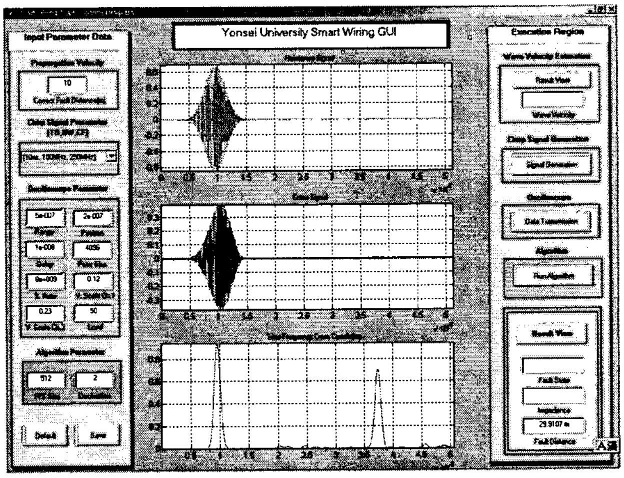


그림 8 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템의 GUI
Fig. 8 Graphic user interface of the TFDR system

그림 8의 왼쪽 부분은 신호 발생기와 신호 습득기의 파라미터들을 제어하는 부분이다. 그림에서 오른쪽 부분은 신호 발생기와 신호 습득기를 작동시키며 알고리즘을 수행하여 도선의 결함 위치를 출력하는 기능을 담당한다. 그림 8에서 중앙 부분의 맨 위의 창은 신호 발생기의 채널이 2개일 경우 신호 발생기에서 순환기를 거쳐 신호 습득기로 직접 입력되는 신호를 출력하는 부분이다. 그 아래에 있는 창은 신호 발생기에서 순환기를 거쳐 대상 동축 케이블의 결함 부분에서 반사되어 들어오는 신호를 출력하는 부분이다. 그림 8의 중앙 부분에서 가장 아래에 있는 부분이 기준 신호와 반사 신호의 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수 값을 출력하는 부분이다.

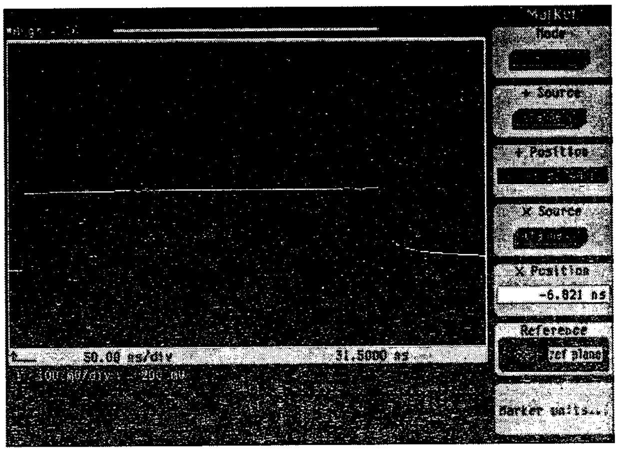


그림 9 시간 영역 반사파 계측 시스템의 인터페이스
Fig. 9 Interface of the TDR system

그림 9는 비교 실험을 위해 사용된 시간 영역 반사파 계측 장비인 54750A/ 54754A의 인터페이스이다. 이 시간 영역 반사파 계측 장비는 결함 부분에서 신호의 반사에 의해 생기는 위상 변화로부터 결함 유무를 진단하고 신호 인가시 위상 변화 부분과 결함 부분에서 반사에 의해 발생하는 위상 변화 부분의 시간지연을 계산하여 도선의 결함 위치를 계산한다.

3.2 실험 조건

1) 대상 동축 케이블 선정

대상 동축 케이블은 구매의 용이성에 의해 케이블 TV용 통신 케이블로 사용되는 5C-2V, 5C-FBT를 선정하였다.

2) 기준 신호 선정

5C 계열의 동축 케이블은 통상 케이블 방송용으로 사용되는 케이블이므로 방송 주파수 대역과 유사한 160~300 [㎒] 주파수 대역을 선정하였다. 5C 계열의 동축 케이블에 사용된 기준 신호의 시간폭은 230 [㎒]의 신호가 10 주기 이상 포함될 수 있도록 60 [ns]로 선정하였다. 또한, AWG610 임의 파형 발생기의 최대 V_{pp}가 2 [V]이므로 V_{pp}를 2 [V]로 선정하였다.

3) 결함 부분의 위치 선정

결함 부분의 위치에 대해서는 40, 30, 20, 10 [m] 총 4가지 경우를 선정하였다. 케이블의 길이를 정확히 측정하기 위해 케이블을 반듯이 편 상태에서 오차가 ±1 [㎜]인 50 [m] 줄자를 사용하여 측정하였다.

4) 결함의 종류

- 손상(damage) : 해당 위치에서 1㎝ 너비로 절연체를 벗기고 열을 가해 생성
- 단선(open) : 해당 위치에서 결함 부분을 잘라서 생성
- 단락(short) : 단선 상태에서 절연체와 내부 도체를 연결하여 생성

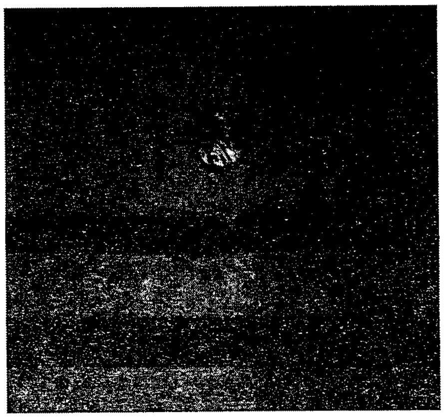


그림 10 손상된 5C-2V 케이블
Fig. 10 Damage of 5C-2V cable

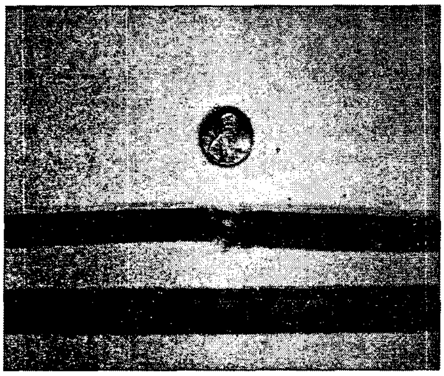


그림 11 손상된 5C-FBT 케이블
Fig. 11 Damage of 5C-FBT cable

그림 10과 그림 11은 결함의 종류가 손상인 실제 5C-2V, 5C-FBT 동축 케이블들을 나타낸다.

3.3 실험 결과 및 분석

표 1의 TFDR 실험 결과에서는 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법으로 실험하였을 때 5C-2V 동축 케이블의 경우 오차율이 최소 0.0260 [%]에서 최대 0.2987 [%]를 보이며, 5C-FBT 동축 케이블의 경우 오차율이 최소 0.0220 [%]에서 최대 0.2980 [%]를 보인다. 표 3의 TDR 실험 결과에서는 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법으로 실험하였을 때 5C-2V 동축 케이블의 경우 오차율이 최소 0.3935 [%]에서 최대 0.7338 [%]를 보이며, 5C-FBT 동축 케이블의 경우 오차율이 최소 0.5456 [%]에서 최대 0.7282 [%]를 보인다.

이 결과들로부터 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법이 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법보다 오차율의 편차가 적으며 또 더 나은 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 그림 12와 그림 13은 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법과 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법을 비교하기 위해 결함의

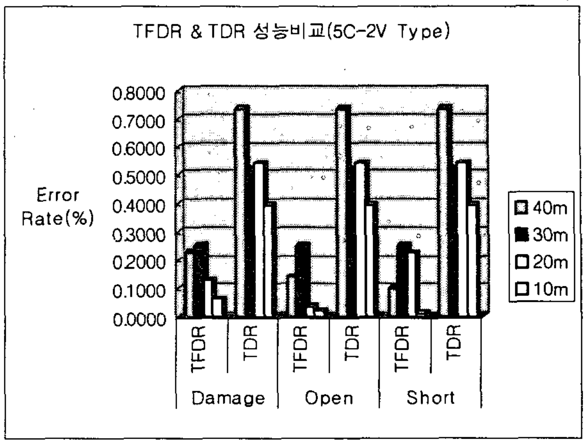


그림 12 TFDR과 TDR의 성능 비교 그래프(5C-2V)
Fig. 12 Performance comparison graph between TFDR and TDR(5C-2V)

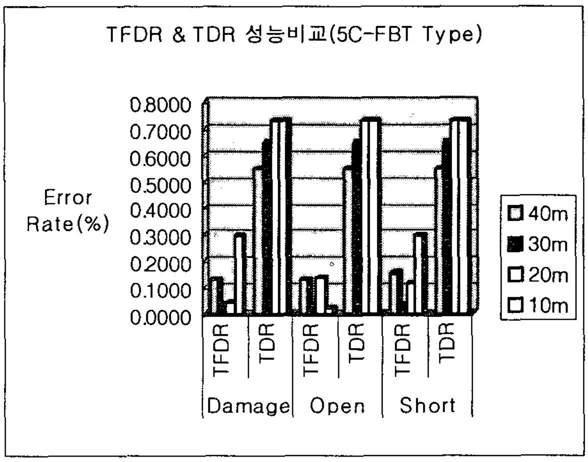


그림 13 TFDR과 TDR의 성능 비교 그래프(5C-FBT)
Fig. 13 Performance comparison graph between TFDR and TDR(5C-2V, 5C-FBT)

표 1 5C-2V, 5C-FBT 시간-주파수 영역 반사파 계측 실험 결과 및 시간 영역 반사파 계측 실험 결과
Table 1 Results of TFDR and TDR experiments about 5C-2V, 5C-FBT coaxial cable

도선 / 결합부 길이		TFDR						TDR					
		5C-2V	Error (m)	Error Rate(%)	5C-FBT	Error (m)	Error Rate(%)	5C-2V	Error (m)	Error Rate(%)	5C-FBT	Error (m)	Error Rate(%)
40m	damage	40.0902	0.0902	0.2255	39.9487	0.0513	0.1282	40.2935	0.2935	0.7338	39.7818	0.2182	0.5456
	open	40.0556	0.0556	0.1390	39.9478	0.0522	0.1305	40.2935	0.2935	0.7338	39.7818	0.2182	0.5456
	short	40.0640	0.0640	0.1600	39.9387	0.0613	0.1533	40.2935	0.2935	0.7338	39.7818	0.2182	0.5456
30m	damage	30.0424	0.0424	0.1413	29.9877	0.0123	0.0410	30.1570	0.1570	0.5233	29.8059	0.1941	0.6470
	open	30.0750	0.0750	0.2500	29.9901	0.0099	0.0330	30.1570	0.1570	0.5232	29.8059	0.1941	0.6470
	short	30.0896	0.0896	0.2987	29.9893	0.0107	0.0357	30.1570	0.1570	0.5232	29.8059	0.1941	0.6470
20m	damage	20.0258	0.0258	0.1290	20.0084	0.0084	0.0420	20.1079	0.1079	0.5393	19.8544	0.1456	0.7282
	open	19.9930	0.0070	0.0350	20.0275	0.0275	0.1375	20.1079	0.1079	0.5393	19.8544	0.1456	0.7281
	short	19.9948	0.0052	0.0260	20.0227	0.0227	0.1135	20.1079	0.1079	0.5393	19.8544	0.1456	0.7281
10m	damage	9.9937	0.0630	0.6400	10.0294	0.0294	0.2940	10.0394	0.0394	0.3935	9.9272	0.0728	0.7281
	open	10.0020	0.0020	0.0200	10.0022	0.0022	0.0220	10.0394	0.0394	0.3935	9.9272	0.0728	0.7280
	short	10.0106	0.0106	0.1060	9.9702	0.0298	0.2980	10.0394	0.0394	0.3935	9.9272	0.0728	0.7280

위치와 결함의 종류에 따른 오차을 그래프를 만든 것이다. 이 그림들로부터 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법이 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법보다 나은 성능을 보여준다는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 본 논문에서 제안하는 가우시안 포락선 모양을 가지는 첩 신호와 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘의 성능이 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법보다 우수함이 검증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 전송선로의 결함 위치를 추정하는데 있어 새롭게 제안한 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법을 적용하였다. 기존의 방법들은 전송선로의 결함 위치를 추정하는데 있어서 단순히 시간 영역이나 주파수 영역에서 신호를 해석하는 반면에 제안된 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 해석하는 방법이다. 시간과 주파수 영역에서 신호를 동시에 해석하기 위해 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 기존의 펄스 신호나 정현파를 쓰는 대신 가우시안 포락선 모양을 가지는 첩 신호를 기준 신호로 사용하여 이를 가능하게 하였다. 또한, 이 기준 신호를 대상 전송선로에 인가하고 결함 부분에서 반사되어 돌아온 신호를 시간-주파수 영역에서 해석하기 위해 위그너 시간-주파수 분포 함수와 정규화된 시간-주파수 상호 상관 함수를 사용한 시간-주파수 영역 반사파 계측 알고리즘을 제안하였다.

제안된 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 범용 계측기들로 구현된 시간-주파수 영역 반사파 계측 시스템을 이용하여 대표적인 전송선로인 실제 5C-2V, 5C-FBT 동축 케이블에 대해서 결함의 위치와 결함의 종류를 달리하며 실험을 통해 검증하였으며, 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법과 성능 비교를 위해 시간 영역 반사파 계측 장비를 이용한 실험을 똑같이 수행하여 검증하였다. 실험 결과들을 통해 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법이 기존의 시간 영역 반사파 계측 방법에 비해 결함의 위치를 추정하는데 있어서 더 우수한 성능을 가짐이 확인되었다.

본 논문에서 제안한 시간-주파수 영역 반사파 계측 방법은 전송선로의 결함 위치 추정뿐만 아니라 기존의 반사파 계측 방법을 적용해왔던 레이더나 소나 등과 같은 다양한 분야에서 적용 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] "Review of Federal programs for wire system safety,"White House NSTC, Washington, DC, 2000.

[2] Furse, C., You Chung Chung, Dangol, R., Nielsen, M., Mabey, G., Woodward, R.,"Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring, "IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Volume: 45, Issue: 2, Pages: 306-315, May 2003.

[3] Byun, D. O., Shin, H. T., Kim, W. J., Shin, J. Y., Hong, J. W.,"*Insulation deterioration diagnosis on ultra high voltage power cables*, "Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, Volume: 1, Pages: 179-182, June 1-5, 2003.

[4] Chiou-Shiun Chen, Louis E. Roemer, Michael S. Hostetler, "Cepstral Processing Using Spread Spectra for Cable Diagnostics,"IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: IM-30(1), Pages: 31-38, March 1973.

[5] Mackay, N. A., Penstone, S. R,"High-sensitivity narrow-band time domain reflectometer, "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,Volume: IM-23, Pages: 155-158, June 1974.

[6] Sasaki, O., Taniguchi, T., Ohska, T.K., Kurashige, H.,"A *high resolution* TDC *in* TKO box system,"IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume: 35, Issue: 1, Pages: 342-347, Feb. 1988.

[7] Stoica, P., Moses, R.L., Friedlander, B., Soderstrom, T.,"Maximum likelihood estimation of the parameters of multiple sinusoids from noisy measurements,"IEEE Transactions on Signal Processing, Volume: 37, Issue: 3, Pages: 378-392, March 1989.

[8] Yamada, H., Ohmiya, M., Ogawa, Y., Itoh, K.,"Superresolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer,"Antennas and IEEE Transactions on Propagation, Volume: 39, Issue: 2, Pages: 177-183, Feb. 1991.

[9] Van Hamme, H.,"Maximum *likelihood estimation* of superimposed complex sinusoids in white Gaussian noise by reduced effort coarse search (RECS),"IEEE Transactions on Signal Processing, Volume: 39, Issue: 2, Pages: 536-538, Feb. 1991.

[10] Van Hamme, H.,"High-resolution frequency-domain reflectometry by estimation of modulated superimposed complex sinusoids,"IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 41, Issue: 6, Pages: 762-767, Dec. 1992.

[11] 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, Volume: 1, Pages: 50-53, May 20-22, 2003.

[12] Hewlett Packard, "Time Domain Reflectometry," Hewlett Packard, 1998.

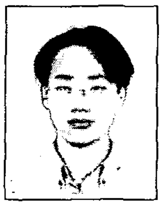
[13] Site Master,"Transmission Line and Antenna Analyzer : Datasheet", Anritsu, April 2000.

[14] Leon Cohen,"Time-Frequency Analysis,"Prentice Hall, New York, 1995.

[15] Shin, Y. J., Song, E. S., Kim, J. W., Park, J. B, Yook, J. G., Powers, E. J.,"Time-frequency domain reflectometry for smart wiring systems,"Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementation XII, Proceedings of SPIE Volume: 4791, Pages: 86-95, Dec. 2002.

[16] Shin, Y. J., Powers, E. J., Choe, T. S., Sung, S. H., Yook, J. G., Park, J. B., "Evaluation of the Load Impedance in Coaxial Cable via Time-Frequency Domain Reflectometry," Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XIII, Proceedings of SPIE, Vol. 5205, p. 38-46, Dec. 2003.

저 자 소 개



최 덕 선 (崔 德 善)
1978년 1월 2일생. 2003년 연세대학교 전기전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사).
Tel : 82+2+2123+2773
Fax : 82+2+362+4539
E-mail : tschoe@control.yonsei.ac.kr

곽 기 석 (郭 基 錫)
1973년 1월 23일생. 2000년 경기대학교 전자공학과 졸업. 2002년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.
Tel : 82+2+2123+2773
Fax : 82+2+362+4539
E-mail : kwakks@yonsei.ac.kr

윤 태 성 (尹 泰 星)
1956 년 6월 22일생. 1978년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994년3월 -1995년2월 미국 Vanderbilt 대학교 전기공학과 객원교수. 1989년 - 현재 창원대학교 전기공학과 교수
Tel : 055)279-7513,
Fax : 055)263-9956
E-mail : tsyoon@sarim.changwon.ac.kr

박 진 배(朴 珍 培)
1954년 8월 7일생. 1977년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 - 1990년 Kansas State University 공대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공박). 1990년-1991년 Kansas State University 공대 전기 및 컴퓨터공학과 조교수. 현재 연세대 공대 전기공학과 교수
Tel : 82+2+2123+2773
Fax : 82+2+362+4539
E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr