

인가신호 제거를 이용한 STDR의 케이블 고장 검출 성능 향상

전정채^{*}, 김택희¹

¹한국전기안전공사 전기안전연구원

Cable Fault Detection Improvement of STDR Using Reference Signal Elimination

Jeong-Chay Jeon^{*}, Taek-Hee Kim¹

¹Electrical Safety Research Institute, KESCO

요약 케이블에 인가되는 신호로 의사잡음 수열을 사용하여 인가신호와 반사신호의 시간 상관 분석을 실시하여 케이블 고장을 검출하는 STDR (sequence time domain reflectometry)은 노이즈 환경에 강하고, 단선, 합선을 포함한 간헐적 고장의 검출이 가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 고장 위치의 거리가 멀거나 경미한 고장의 경우 반사신호의 감쇄가 크고 상관계수가 작아지게 되어, 케이블 고장 판별이 어렵거나 측정 거리 오차가 커진다. 또한 위상과 피크치 검출에 의한 고장 탐지 자동화가 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 STDR의 고장 검출 성능을 향상시키기 위해 케이블에 인가되는 인가신호의 상관계수의 최댓값을 검출하고, 다음으로 인가신호를 제거하여 반사신호의 상관계수의 최댓값을 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 저압 전력 케이블에서의 고장 검출 실험을 통해 성능을 입증하였다. 그 결과 제안된 방법은 신호가 감쇄되더라도 전통적인 STDR보다 고장 여부의 정확한 구분과 위치의 추적이 가능하였다. 또한 기준신호 제거와 상관계수의 정규화를 통해 위상과 최대값 검출 방법을 사용함으로써 자동 고장 판별과 거리 계산에 오류가 발생하지 않았다.

Abstract STDR (sequence time domain reflectometry) to detect a cable fault using a pseudo noise sequence as a reference signal, and time correlation analysis between the reference signal and reflection signal is robust to noisy environments and can detect intermittent faults including open faults and short circuits. On the other hand, if the distance of the fault location is far away or the fault type is a soft fault, attenuation of the reflected signal becomes larger; hence the correlation coefficient in the STDR becomes smaller, which makes fault detection difficult and the measurement error larger. In addition, automation of the fault location by detection of phase and peak value becomes difficult. Therefore, to improve the cable fault detection of a conventional STDR, this paper proposes the algorithm in that the peak value of the correlation coefficient of the reference signal is detected, and a peak value of the correlation coefficient of the reflected signal is then detected after removing the reference signal. The performance of the proposed method was validated experimentally in low-voltage power cables. The performance evaluation showed that the proposed method can identify whether a fault occurred more accurately and can track the fault locations better than conventional STDR despite the signal attenuation. In addition, there was no error of an automatic fault type and its location by the detection of the phase and peak value through the elimination of the reference signal and normalization of the correlation coefficient.

Keywords : Cable fault, Correlation coefficient, Reference Signal, Signal attenuation, STDR

본 논문은 2013년 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jeong-Chay Jeon(KESCO)

Tel: +82-63-716-2851 email: cameleon@kesco.or.kr

Received January 13, 2016

Revised (1st February 23, 2016, 2nd February 29, 2016, 3rd March 2, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

1. 서론

전력 케이블은 부적절한 설치와 물리적, 전기적 및 환경적 요인 등 다양한 요인에 의해 절연손상, 단선, 합선 등의 고장이 발생하게 된다[1][10]. 케이블 고장은 정전, 화재 등으로 이어지고 재산피해, 정보손실, 생산차질 등의 문제가 발생된다. 따라서 케이블의 고장 발생 초기에 그 위치를 정확히 검출하여 고장 복구 시간의 단축, 비용의 절감 및 과급사고를 줄이는 것이 중요하다.

케이블의 고장 위치를 검출하기 위해 레이더 원리를 이용한 반사파 계측법(Refletometry)이 자주 사용된다[2-4]. 반사파 계측법에서는 전송선로를 따라 진행되는 전자파는 특성 임피던스가 변화할 때 반사가 발생하게 되는데, 전송선의 특성 임피던스 보다 큰 임피던스 지점에서는 동 위상, 작은 임피던스 지점에서는 역 위상의 반사가 발생하고, 반사된 신호를 검출하는 데 걸리는 시간을 측정하여 케이블 고장 위치까지의 거리를 계산한다[2-4].

다양한 종류의 반사파 계측법이 연구되고 있지만, 현장에서 사용되는 장비의 대부분은 케이블에 인가되는 신호 펄스를 사용하고 반사신호를 시간 영역에서 분석하는 TDR(Time Domain Refletometry)이 사용된다[5].

TDR은 사용자가 반사되는 신호의 파형을 보고 고장 유형과 거리를 분석하기 때문에 거리가 멀거나 노이즈 환경에서 반사파형이 변형될 경우, 사용자의 숙련도에 따라 고장을 잘못 판단하거나 오차가 커질 우려가 있다[6].

이러한 TDR의 문제를 극복하기 위해 디지털 통신에 사용되는 대역확산 기술을 응용하여 케이블에 인가되는 신호로 수열을 사용하는 STDR 기법이 개발되었다[7-8].

STDR은 의사잡음 수열(Pesudo-noise sequence : PN 수열)을 케이블에 인가하고 반사된 신호를 시간 상관 분석을 실시하고, 위상과 상관계수의 최댓값을 찾아 고장 여부를 판단하고 위치를 계산함으로써 TDR 방식의 신호 감쇄와 노이즈 문제를 해결하였다[8-9].

하지만 고장 거리가 더 멀어져 신호 감쇄가 크거나 경미한 고장으로 인해 반사신호가 작게 될 경우 상관계수의 크기가 작아 다른 신호들과의 구분이 어려워지고, 위상과 최댓값 검출에 의한 케이블 고장 여부와 위치를 자동으로 구하는데 있어 오류가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 STDR의 고장 검출 성능을 향상시키기 위해, 먼저 케이블 인가신호의 상관계수의 최댓값을

검출하고, 다음으로 인가신호를 제거하여 반사신호의 상관계수 최댓값을 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 저압 전력 케이블 고장 검출 실험을 통해 그 성능을 입증하였다.

2. STDR의 분석

STDR은 Fig. 1과 같이 PN 수열을 케이블에 인가한 뒤 고장 지점에서 반사되는 신호의 도착시간과 위상을 관측하여 고장 위치와 고장 유형을 탐지하게 된다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 STDR 에서 길이가 N 인 수열 $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ 를 사용한 인가신호 $s(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다[8].

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n p_{t_c}(t - nt_c), \tag{1}$$

STDR에서는 수열에 곱해지는 신호가 식 (2)와 같이 1과 0으로 구분된다.

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \tag{2}$$

여기서, t_c 는 1 또는 -1 값을 갖는 PN 수열의 칩 구간(Chip duration)으로 불린다.

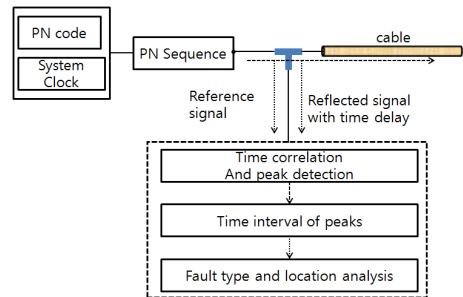


Fig. 1. The principal of conventional STDR

식 (2)의 신호를 케이블에 인가하게 되면 케이블의 특성 임피던스 변화지점에서 일정한 시간 지연 후에 반사가 발생하게 된다. 이때, 반사된 신호 $r(t)$ 는 케이블 시험 환경에 따라 노이즈를 포함하게 되며 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_k s(t - \tau_k) + g(t) \tag{3}$$

여기서, a_k 는 인가된 신호와 관련하여 반사된 신호

$a_k s(t - \tau_k)$ 의 크기이며, τ_k 는 인가된 신호가 케이블 고장 위치에서 반사되기까지의 지연 시간이며 $g(t)$ 는 노이즈 신호이다.

다음으로 식 (4)와 같이 인가신호 $s(t)$ 을 시간 τ 만큼 이동하여 반사신호 $r(t)$ 와의 시간 상호 상관 분석을 실시하고 최댓값을 구하게 된다.

$$C_{time, sr}(\tau) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t)r(t-\tau)dt \quad (4)$$

여기서, T_s 는 인가신호 $s(t)$ 의 시간 폭, 즉 주기를 의미한다.

그리고 인가신호와 반사신호의 상관계수의 최댓값들의 차이에 의해 신호가 인가되어 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는데 걸리는 시간을 구하고 식(5)을 이용하여 케이블 고장 위치까지의 거리 D 를 계산한다[6].

$$D = \frac{v_p \times \tau_D}{2} \quad (5)$$

여기서, v_p 는 전력 케이블에 인가되는 신호의 전파속도 (Velocity of propagation, VOP)를 의미하고 τ_D 는 케이블에 신호가 인가된 지점에서부터 고장 지점에서 반사되어 되돌아오기까지 걸린 시간이다.

이러한 STDR에 있어 케이블의 고장 거리가 멀어 신호 감쇄가 크거나 경미한 고장으로 인해 반사신호가 작게 될 경우 상관계수의 크기가 작아 다른 신호들과의 구분이 어려워지고, 위상과 최댓값 검출에 의한 케이블 고장 여부와 위치를 계산하는데 있어 오류가 발생하게 된다.

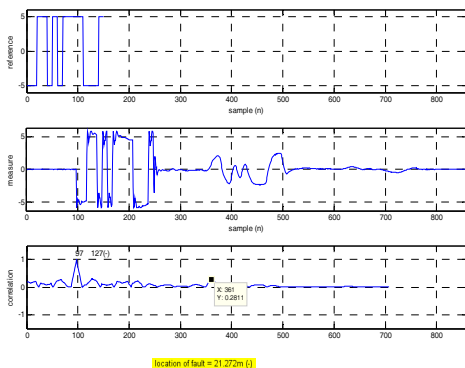


Fig. 2. Cable fault location using STDR

Fig. 2에는 보편적인 STDR의 경우 200m 위치의 합선 고장 검출의 결과이다. 첫 번째 파형은 케이블에 인가된 PN 수열이고, 두 번째 파형은 케이블 단선으로 인해

반사된 파형이다. 마지막으로 세 번째 파형은 식(4)를 이용하여 시간 상관 분석을 실시하여 반사된 지점을 자동으로 찾고 고장 유형과 거리를 계산한 결과이다.

Fig. 2의 세 번째 파형에서 361번째 샘플 지점이 고장 위치지만, 인가신호 부근의 127번째 샘플 지점의 신호로 인해 고장 검출에 에러가 발생하였다. Fig. 2의 두 번째 파형과 같은 반사신호 파형의 형태와 위치를 보고 고장의 유형과 거리를 계산할 수 있지만, 오차를 동반하게 되며, 성능 열화가 더 심할 경우는 고장 유형 판별에 있어 오류가 발생하게 된다.

3. 인가신호 제거

본 논문에서는 Fig. 3에서와 같이 인가신호의 위치를 먼저 구하고, 인가신호를 제거한 후 반사신호의 위치를 구하는 방식으로 STDR의 케이블 고장 거리 탐지 성능을 개선하고자 한다.

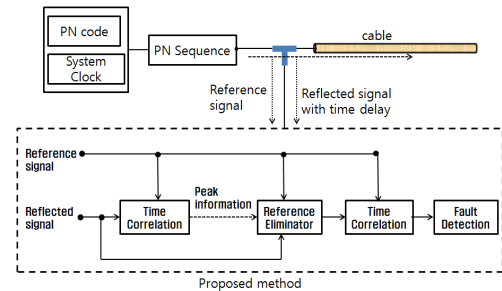


Fig. 3. STDR using the proposed method

제안된 방법은 먼저 Fig. 3과 같이 식(4)를 이용하여 인가신호와 반사신호의 시간 상관 분석기법을 이용하여 인가신호의 최댓값의 위치 τ_1 를 찾아 인가신호의 위치를 구한다.

다음으로 반사된 신호 $r(t)$ 로부터 인가신호 $s(t)$ 를 제거하여 $b(t) = r(t) - s(t - \tau_1)$ 를 만들고, 식 (6)을 이용하여 $b(t)$ 와 $s(t)$ 의 시간 상호 상관 분석을 실시하여 반사된 신호의 상관계수 최댓값 τ_2 를 찾는다. 인가신호가 제거된 고장점 반사파 신호는 정규화 효과로 인해 상관계수 최대값이 1에 가까워 고장 구분이 명확해지고, 측정 오차가 작아지는 효과를 볼 수 있다.

$$C_{time, sr}(\tau) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t)b(t-\tau)dt \quad (6)$$

마지막으로 인가신호와 반사신호 상관계수 최댓값간의 시간 차이 $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 를 계산하고, 케이블 고장위치까지의 거리를 식 (5)을 이용하여 계산하게 된다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 방법

제안된 방법을 적용한 STDR과 전통적인 STDR를 이용한 케이블 고장 위치 검출 실험을 위해 Fig. 4와 같이 NI사의 임의파형 발생장치 모듈, 디지털 오실로 스코프 모듈 그리고 제어용 PC로 구성된 실험 시스템을 구축하였다.

케이블 인가되는 PN sequence는 길이 7(M=3)인 최대 길이 수열(Maximum Length sequence, M 수열)을 사용하였고, 1chip의 길이는 10sample로 하여 최종 수열의 길이가 70sample이 되게 하였다. 이러한 인가신호는 NI사의 LabView를 이용하여 개발된 프로그램을 통해 생성하고 임의파형 발생장치를 제어하여 케이블에 인가되며, 반사된 신호는 디지털 오실로 스코프 모듈을 이용하여 측정하게 된다.

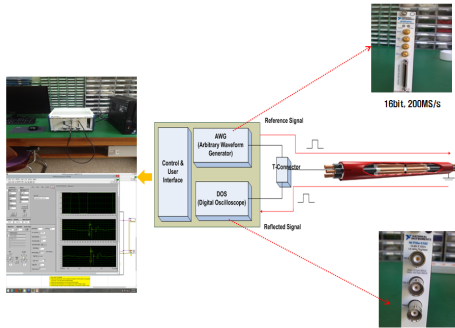


Fig. 4. Experimental system setup

케이블에 신호를 인가하고 반사된 신호를 수신하기 위한 임의파형 발생장치 및 오실로 스코프에 연결된 케이블 접속점까지의 신호선의 길이는 약 2m이고, 그 연결은 Fig. 3과 같이 T-connector를 이용하였다. 기존의 STDR과 본 연구에서 제안된 인가신호 제거 방법을 적용한 STDR의 시간 상관 분석 프로그램을 MATLAB을 이용하여 개발하였고, LabView 프로그램과 연계되도록 하였다.

실험 대상 케이블은 저압 전력 케이블로 가장 많이 사용되는 케이블인 CV2C6SQ를 사용하였고, 그 길이는 각각 59.9m, 120m, 152.5m로 하고, VOP 측정을 실시한 결과 1.905×10^8 m/s로 나타났다.

표본화율은 25MS/s이고 고장 거리의 계산은 식 (5)에서 케이블 접속점까지 신호 인가선의 길이 2m를 빼주어야 되므로, 식 (7)을 프로그램에 적용하여 자동으로 계산하여 그래프 하단에 표시하도록 하였다.

$$D = \frac{VOP \times \text{샘플 차} / \text{표본화율}}{2} - \text{신호케이블 길이} [m] \quad (7)$$

4.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 59.9m 위치에 있는 단선 고장 검출 실험 결과이다. 보편적인 STDR의 경우는 Fig. 5(a)와 같이 측정거리가 62.77m로 계산되었고, 오차는 4.79%로 나타났다. 하지만 제안된 방법을 적용한 STDR의 경우는 Fig. 5(b)처럼 측정거리가 58.96m로 계산되어 오차가 1.7%로 보편적인 STDR보다 다소 작아졌다. 59.9m 케이블 합선 고장 검출 실험 결과는 Table 1에서와 같이 보편적인 STDR과 제안된 방법을 적용한 STDR 모두 정확히 합선을 검출하였고, 측정거리도 58.96m(오차 1.7%)로 동일한 결과를 보였다. 하지만 제안된 방식의 경우 반사와 지점의 상관계수 값이 1이 되어 고장구분이 명확해짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 120m 위치에 있는 합선 고장 검출 실험 결과이다. 보편적인 STDR은 Fig. 6(a)과 같이 측정거리가 116.21m로 계산되어 오차가 약 3.16% 발생하였다. 하지만 제안된 STDR의 경우는 Fig. 6(b)과 같이 측정거리가 119.92m로 오차가 약 0.07%로 좋아졌으며, 반사신호의 상관계수 크기가 거의 1에 가까워 고장구분이 명확해짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 152.5m 위치에 있는 단선 고장의 실험 결과이다. 보편적인 STDR과 제안된 방법 모두 단선을 정확히 검출하였고, 측정거리는 150.4m로 계산되어 오차는 약 1.38%였다.

합선 고장의 경우는 Table 1에서와 같이 보편적인 STDR은 158.02m로 계산되어 오차가 약 3.62%로 다소 높게 나타났지만, 제안된 STDR의 경우는 154.21m로 계산되어 오차가 약 1.12%로 보편적인 방법보다 고장 위치 측정 오차가 매우 줄어드는 결과를 보여주었다.

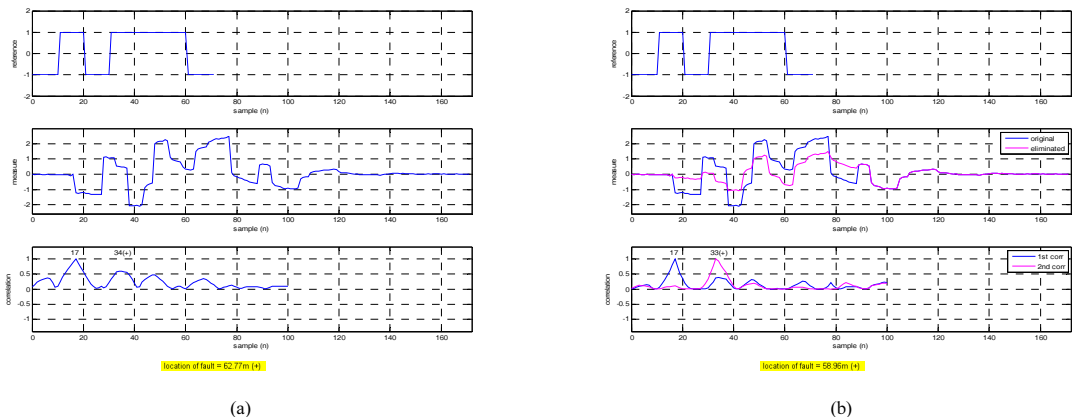


Fig. 5. Experimental results for CV2C6SQ cable open fault at 59.9m using STDR (a) The conventional method (b) The proposed method

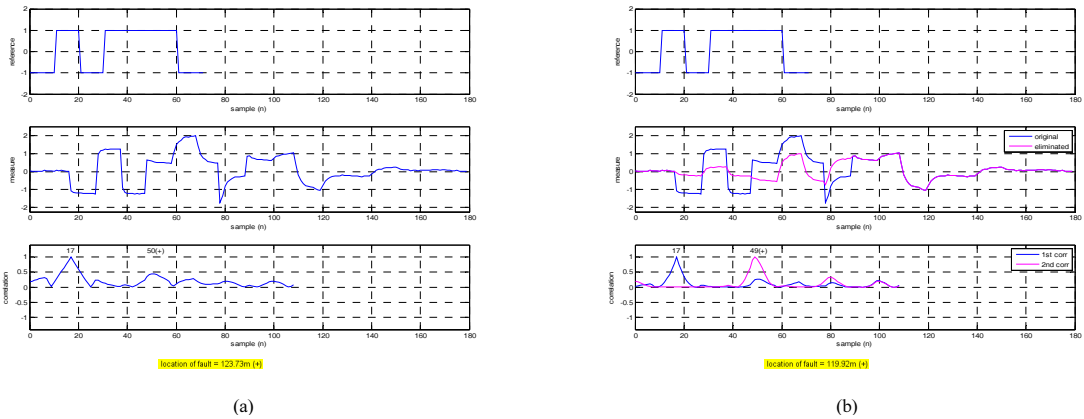


Fig. 6. Experimental results for CV2C6SQ cable open fault at 120m using STDR (a) The conventional method (b) The proposed method

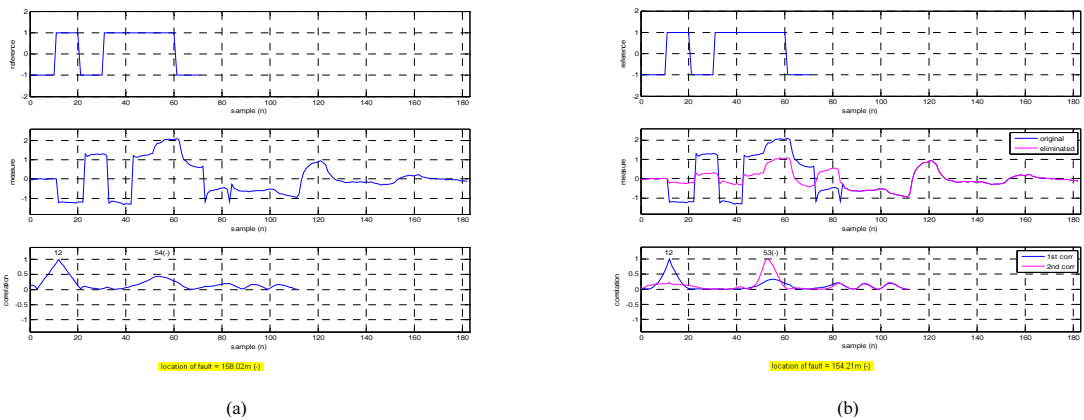


Fig. 7. Experimental results for CV2C6SQ cable short fault at 152.5m using STDR (a) The conventional method (b) The proposed method

Table 1. Experimental results of cable fault detection using the conventional and proposed STDR

Fault Distance and type		Conventional STDR		Proposed STDR	
		Measurement Distance(m)	Error (%)	Measurement Distance(m)	Error (%)
59.9m	Open	62.77	4.79	58.96	1.7
	Short	58.96	1.7	58.96	1.7
120m	Open	123.73	3.11	119.92	0.07
	Short	116.21	3.16	119.92	0.07
152.5m	Open	150.4	1.38	150.4	1.38
	Short	158.02	3.62	154.21	1.12

보편적인 STDR의 경우, 고장은 검출되었지만, 반사 파형이 반사신호가 늘어져 오차가 커지게 되었다. 그리고 고장 거리가 더욱 멀어지게 되면, 반사신호의 상관계수가 매우 작아져 고장 종류와 위치 탐지가 자동으로 계산하는 것이 어렵게 된다.

인가신호 제거 기법을 적용한 STDR의 경우는 거리가 멀어 신호가 감쇄되더라도 고장점의 반사와 상관계수 최댓값이 인가신호 제거와 정규화 효과로 인해 거의 상관계수가 1에 가까워 고장 구분이 명확해지고, 측정 오차가 작아지게 되었다.

이러한 결과들은 사용자가 고장 파형 해석에 대한 숙련도가 떨어지더라도 자동으로 계산할 수 있는 프로그램을 통해 고장 판별과 거리 계산 오류를 감소시킬 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 논문에서는 STDR의 케이블 고장 검출 성능 향상을 위해 인가신호 제거와 시간 상관 분석을 적용하였다. 제안된 알고리즘은 실제 케이블 고장 검출 실험을 통해 그 성능을 입증하였다.

인가신호 제거 방법을 사용한 STDR은 거리가 멀어 신호감쇄로 인한 반사신호가 작더라도 감쇄된 반사신호의 특성을 잘 찾을 수 있고, 정확한 고장의 구분과 위치의 자동 탐지가 가능한 것을 확인할 수 있었다.

제안된 알고리즘의 장점은 케이블의 고장과 위치를 자동으로 판별하고 사람에 의한 측정오차를 줄일 수 있다는 것이다. 기존의 TDR 및 STDR의 경우, 신호 감쇄 문제로 인해 자동 판별이 거의 불가능하여 장비 사용자의 숙련도가 매우 높게 요구되었다. 하지만 제안된 알고

리즘을 적용할 경우, 케이블 고장의 구분과 위치 계산을 프로그램으로 자동화하여 장비 사용자의 숙련도에 따른 오 탐지 발생 문제를 해결할 수 있고, 탐지 오차를 최소화 할 수 있을 것이다.

References

- [1] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident," KESCO, 2014
- [2] Agilent, "Time Domain Reflectometry Theory Application Note 1304-2," May 10, 2006
- [3] LeCroy, "Time Domain Reflectometry(TDR) and S-parameters," July 2009
- [4] JAMES A. STRICKLAND, "Time-Domain Refeltometry Measurements," Tektronix, 1970
- [5] G. H. Shirkoohi, K. Hansan, "Enhanced TDR Technique for Fault Detection in Electrical Wires and Cables," 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010
- [6] Yong-June Shin, Edward J. Powers, Tok-Son Choe, Chan-Yong Hong, Eun-Seok Song, Jong-Gwan Yook and 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, pp. 2493-2500, Dec. 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2005.858115>
- [7] Ali Grami, "Introduction to Digital Communications," Elsevier, 2015
- [8] Chirag R. Sharma, Cynthia Furse and Reid R. Harrison, "Low-Power STDR CMOS Sensor for Location Faults in Aging Aircraft Wiring," IEEE Sensors Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 43-50, Jan. 2007
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.886866>
- [9] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudo-Random Sequences and Arrays," Proc. of the IEEE, Vol. 64, No. 12, pp. 1715-1729, December 1976
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1976.10411>
- [10] K.-H. Um, K.-W. Lee, "Developing Equipment to Detect the Deterioration Status of 6.6kV Power Cables in Operation at Power Station," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 14, No. 4, pp.197-203, Aug. 31, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.4.197>

전 정 채(Jeong-Chay Jeon)

[정회원]



- 1999년 2월 : 원광대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 원광대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원

<관심분야>

계측 및 제어, 전력품질, 전기안전

김 택 희(Tack-Hee Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 원광대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 전북대학교 IT 응용시스템공학과(공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원

<관심분야>

전기안전, 신호처리