

부호 제거기를 활용한 STDR/SSTDR 기법의 탐지 성능 개선

박 소 령[°]

Detection Performance Improvement of STDR/SSTDR Schemes Using Sign Eliminator

So Ryoung Park[°]

요 약

이 논문에서는 STDR(sequence time-domain reflectometry)이나 SSTDR(spread-spectrum time-domain reflectometry) 방식에서 인가 신호 제거 기법을 사용하여 케이블의 고장 위치를 탐지할 때, 제거기 앞단에 부호기(sign detector)를 추가하여 복원된 부호를 제거하는 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 케이블 선로나 측정 회로에 의해 변형된 신호를 수열의 형태로 복원시킨 후 제거하기 때문에 부호기를 쓰지 않은 경우보다 인가 신호 부분을 효과적으로 제거할 수 있고, 결과적으로 고장에 의한 반사 신호 부분의 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 특히, 원거리 고장에서 제안한 고장 탐지 기법이 기존의 기법에 비해 오탐지율을 크게 낮출 수 있음을 모의실험으로 보였다.

Key Words : time-domain reflectometry (TDR), sequence TDR (STDR), spread-spectrum TDR (SSTDR), correlation, sign detector, cable fault

ABSTRACT

This paper proposes an advanced detection technique for cable fault by eliminating the sign of reference signal in STDR(sequence time-domain reflectometry) and SSTDR(spread-spectrum time-domain reflectometry). The proposed fault-detection technique can eliminate the reference signal more effectively than the conventional one since the sign detector can approximately recover the distorted reference signal by cable and connector, and consequently, can detect the reflected signal by fault more effectively than the conventional one. Especially, it is shown that the error rate of proposed technique can be significantly lower than the conventional one in the case of far fault simulation.

I. 서 론

케이블 배선 시스템은 가정, 건물, 공장, 발전소 등의 민간 및 사회 설비에서부터 방공무기체계 등의 군 수 설비까지 모든 곳에서 사용되고 있기 때문에, 케이

블 배선 시스템의 결함은 경제, 사회, 산업, 보안 등에서 큰 손실을 야기할 수 있다. 특히, 원거리에 설치된 케이블의 점검은 많은 인력과 시간이 소요되거나 직접적인 점검이 불가능할 수 있고, 방공 유도무기체계와 같이 레이더, 교전통제소, 발사대 그리고 미사일

※ 본 연구는 2013년도 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 연구비 지원 및 2016년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 수행되었습니다.

•° First and Corresponding Author: The Catholic University of Korea, School of Information, Communications, and Electronics Engineering, Communication Signal Processing Lab., srpark@catholic.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-05-086, Received May 4, 2016; Revised May 13, 2016; Accepted May 16, 2016

등 다수 장비가 한 체계로 구성되어 있을 경우에는 케이블의 작은 고장이 무기 체계 전체 운용에 큰 문제로 확산될 수 있다. 따라서 케이블 사고를 예방하기 위하여 고장을 초기에 검출하고 고장의 위치와 종류를 추정하는 기법이 필요하다.

케이블의 고장을 탐지하고 고장의 종류와 위치를 추정하는 기법으로는 시간 영역의 상관(correlation)을 이용하는 TDR(time domain reflectometry) 방식이 대표적이다. 주파수 영역 상관을 이용하는 FDR(frequency domain reflectometry)이나 시간-주파수 영역의 상관을 모두 이용하는 TFDR(time-frequency domain reflectometry) 방식도 있으나, 이 두 방식은 주파수 영역에서 스펙트럼을 분석하기 위해 계산량이 크게 증가하기 때문에, 계산량이 적으면서도 다양한 활용이 가능한 TDR 방식이 케이블 고장 탐지에 많이 쓰이고 있다¹⁻³⁾.

TDR 방식은 특정 형태의 신호를 케이블에 인가(injection)한 뒤 고장 위치에서 반사되어 돌아오는 신호를 탐지하는 가장 간단한 기법으로, 인가하는 신호의 형태에 따라 탐지 성능이 달라질 수 있다. 가장 기본적인 TDR 방식은 인가 신호로 펄스를 사용하는데, 펄스가 감쇠에 취약하기 때문에 원거리 고장에 대한 탐지 성능이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 인가 신호로 자기상관(autocorrelation) 성질이 좋은 수열(sequence)을 사용하는 STDR(sequence TDR) 방식과, 더 나아가 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있도록 하기 위해 수열에 정현파 변조를 적용한 SSTDR(spread-spectrum TDR) 방식이 제안되었고, STDR과 SSTDR 방식에서 다양한 길이와 종류의 수열을 사용하였을 때의 고장 위치 탐지 성능에 대한 연구도 진행되었다³⁻⁵⁾.

한편, STDR과 SSTDR 방식에서 인가 신호의 형태에 대한 연구와 더불어, 시간 상관을 계산하기 전후에 특별한 신호처리를 수행하여 탐지 성능을 개선하는 연구도 지속되어 왔다. [5]에서는 첫 번째 시간 상관 후에 최대 상관의 위치에서 발생하는 인가 신호 파형을 제거함으로써 고장 위치에서 반사되어 되돌아오는 신호의 탐지 성능을 높이는 인가 신호 제거 기법이 제안되었다. 그러나 케이블 선로, 접속 및 측정 회로 등의 영향으로 인가한 신호가 변형되므로 제대로 제거되지 못하는 경우가 발생할 수 있는데, 인가 신호가 제거되지 않고 남아있으면 반사 신호를 검출하는 성능을 떨어뜨리는 요인이 된다. 이와 달리, [6]에서는 STDR에서 시간 상관을 계산하기 전에 반사 신호의 부호(sign)만을 남김으로써 수열을 복원하고, 결과적

으로 반사신호 위치에서 시간 상관 값을 크게 만들어 탐지 성능을 향상시키는 기법을 제안하였고, [7]에서는 이를 SSTDR로 확장하는 방법을 제안하였다. 이러한 부호기 추가 기법은 원거리 고장에서 고장 탐지 성능을 크게 향상시켰으나, 고장 위치가 가까워 인가 신호와 반사 신호가 중첩되면 부호기를 통과할 때 중첩된 부분의 정보가 손실되기 때문에 오히려 성능이 감소하는 경우가 발생한다.

이 논문에서는 STDR이나 SSTDR 방식에서 인가 신호 제거 기법을 사용할 때, 제거기 앞단에 부호기를 추가한 후 인가 신호의 부호를 제거하는 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 케이블이나 측정 회로에 의해 변형된 신호를 수열의 형태로 복원시킨 후 제거하기 때문에 인가 신호 부분이 부호기를 쓰지 않은 경우보다 효과적으로 제거될 수 있고, 결과적으로 고장에 의한 반사 신호 부분의 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. II장에서는 기존의 STDR/SSTDR 방식, 인가 신호 제거 기법 및 부호기 추가 기법, 제안한 고장 탐지 기법을 차례대로 설명하고, III장에서는 모의실험으로 탐지 성능을 비교하며, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 케이블 고장 탐지 기법

이 장에서는 기존의 STDR과 SSTDR 방식을 간단히 요약하고 제안한 고장 탐지 기법을 설명한다.

2.1 STDR/SSTDR 및 인가 신호 제거 기법

그림 1에 STDR/SSTDR 방식의 블록다이어그램을 보였다. STDR 방식은 자기상관 성질이 우수한 수열을 -1과 +1의 펄스 형태 신호로 케이블에 인가한 뒤, 시간 상관을 이용하여 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 신호를 탐지하는데, 반사 신호의 도착 시간으로 고장의 위치를 추정하고 반사 신호의 위상으로 고장의 종류를 추정하는 방식이다. SSTDR 방식은 수열에 정현파를 곱하여 변조된 형태의 신호를 케이블에 인가하는 점만 STDR과 다르고, 고장을 탐지하는 부

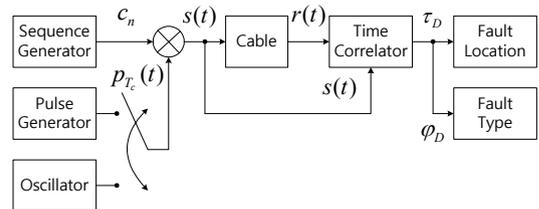


그림 1. STDR/SSTDR의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of STDR/SSTDR

분은 STDR과 동일하다^[3].

길이가 N 인 이진 수열(binary sequence) $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$, $c_n \in \{-1, 1\}$ 를 사용한 STDR과 SSTDR 방식에서, 인가 신호(injected signal or reference signal) $s(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n p_{T_c}(t - nT_c) \quad (1)$$

여기서, 수열에 곱하는 파형은 STDR에서는

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

이고, SSTDR에서는

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_c t), & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (3)$$

이며, T_c 는 칩 구간(chip duration), f_c 는 변조 주파수 이다^[5].

신호 인가 후 전력선에서 관측된 신호(observed signal)를 $r(t)$ 라 하자. 고장이 있을 때에는 $r(t)$ 에 인가 신호와 고장 지점 반사 신호가 포함되어 있을 것이다. 인가 신호 $s(t)$ 와 관측 신호 $r(t)$ 의 시간 영역 상관 함수는 다음과 같다.

$$C_{sr}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} s(t)r^*(t+\tau)dt \quad (4)$$

고장이 있으면 인가 신호가 존재하는 시간 τ_1 과 인가 신호의 형태가 반영된 고장 지점 반사 신호가 존재하는 시간 τ_2 에서 상관 함수의 절대 값이 크게 나타나기 때문에, 신호를 인가한 지점에서 고장 지점까지의 거리 d 는 시간 차 $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 와 케이블의 신호 전파 속도(velocity of propagation) v_p 를 사용하여

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

와 같이 구할 수 있다. 고장 유형은 고장 지점의 상관 함수의 위상

$$\varphi_D = \angle C_{sr}(\tau_2) \quad (6)$$

이 $\varphi_D \approx 0$ 이면 단선, $\varphi_D \approx \pi$ 이면 합선 고장이라 판단할 수 있는데, 그 까닭은 3.1절 케이블의 전송 채널 모형에서 자세히 설명한다.

그림 2는 길이가 15인 m-수열을 사용한 STDR 방식의 인가 신호, 관측 신호, 상관 함수를 차례대로 보인 것이다. 단선(open circuit) 고장의 지점이 신호 인가 지점으로부터 120m 떨어진 위치이고 전파속도는 2×10^8 m/s 일 경우이다. 그림의 첫 행은 크기가 1이고 수열의 칩 구간이 $0.06 \mu\text{s}$ 인 STDR 인가 신호 $s(t)$ 이며, 둘째 행은 $\tau_1 = 0.1 \mu\text{s}$ 에 신호를 인가한 후 관측된 신호 $r(t)$ 이고, 마지막 행은 상관 함수의 절대 값 $|C_{sr}(\tau)|$ 이다. 인가 시점을 $\tau_1 = 0.1 \mu\text{s}$ 로 두었기 때문에 식 (5)에 의하면 $\tau_D = 1.2 \mu\text{s}$ 이므로 τ_2 는 $1.3 \mu\text{s}$ 가 되어야 한다. 하지만 반사 신호가 케이블을 통과하면서 감쇠되고 왜곡되어서 인가 신호 $s(t)$ 의 형태와 달라졌기 때문에, 상관 함수 그래프에서 두 번째 크기의 극대값이 나오는 곳이 $\tau_2 = 1.275 \mu\text{s}$ 가 되어, 실제 고장 지점과는 15m의 거리 오차가 발생한다.

그림 3은 [5]에서 제안하는 인가 신호 제거 기법의 수신부 구조이다. 먼저, 상관 함수 $C_{sr}(\tau)$ 의 절대 값이 가장 큰 위치를 τ_1 으로 두고, 즉,

$$\tau_1 = \arg \max |C_{sr}(\tau)| \quad (7)$$

을 얻고, 다음과 같이 $r(t)$ 에서 인가 신호를 제거한다.

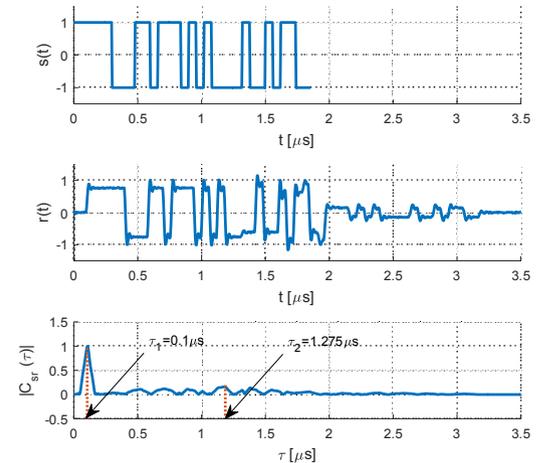


그림 2. STDR의 인가 신호 $s(t)$, 관측 신호 $r(t)$, 상관 함수 $C_{sr}(\tau)$ 의 절대 값

Fig. 2. Injected signal $s(t)$, observed signal $r(t)$, and absolute correlation $|C_{sr}(\tau)|$ in STDR

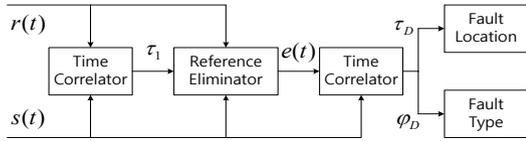


그림 3. 인가 신호 제거 기법의 수신부 구조
Fig. 3. Receiver structure of the elimination technique of reference signal

$$e(t) = r(t) - s(t - \tau_1) \quad (8)$$

그 뒤, $e(t)$ 와 $s(t)$ 의 상관 함수

$$C_{se}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} s(t) e^*(t + \tau) d\tau \quad (9)$$

에서

$$\tau_2 = \arg \max |C_{se}(\tau)| \quad (10)$$

을 얻어 $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 을 계산하는 기법이다⁵⁾.

그림 4는 그림 2의 관측 신호에 [6]에서 제안하는 인가 신호 제거 기법을 적용한 결과이다. 그림의 첫 행은 그림 2의 관측 신호 $r(t)$ 이고, 둘째 행은 인가 신호를 제거한 $e(t)$ 이며, 마지막 행은 $s(t)$ 와 $e(t)$ 의 상관 함수의 절대 값 $|C_{se}(\tau)|$ 이다. 신호가 케이블에 인가되면서 형태가 왜곡되어 $e(t)$ 에 제거되지 못한

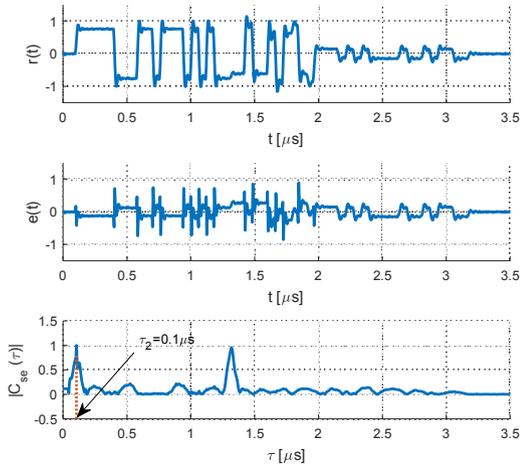


그림 4. STDR에 인가 신호 제거 기법을 적용하였을 때, 관측 신호 $r(t)$, 제거 신호 $e(t)$, 상관 함수 $C_{se}(\tau)$ 의 절대 값
Fig. 4. Observed signal $r(t)$, eliminated signal $e(t)$, and absolute correlation $|C_{se}(\tau)|$ in STDR with the elimination technique of reference signal

$s(t)$ 의 정보가 남아있기 때문에, 고장 지점의 상관 값보다 신호 인가 지점의 상관 값이 여전히 더 커서 $\tau_2 = 0.1 \mu s$ 가 되는 경우에는 고장의 위치를 올바르게 얻지 못할 수 있다.

2.2 제안한 고장 탐지 기법

앞 절에서 설명한 인가 신호 제거 기법에서 제거되지 못한 $s(t)$ 의 정보가 $e(t)$ 에 남아있는 이유는 $r(t)$ 에서 인가 신호 부분이 $s(t)$ 와 다르게 변형되었기 때문이다. 이에 인가 신호 제거 이전에 $r(t)$ 를 부호기에 통과시켜서 변형된 인가 신호를 부호의 형태로 복원한 후 제거하는 기법을 제안한다.

그림 5는 이 논문에서 제안하는 기법의 블록다이어그램이다. 첫 번째 상관기 부분까지는 기존의 인가 신호 제거 기법과 같다. 즉, 인가 신호 지점인 τ_1 은 식 (7)과 같이 얻는다. 두 번째 상관기 이전에 부호기를 추가하여 $s(t)$ 와 $r(t)$ 의 부호인

$$z_s(t) = \begin{cases} +1, & s(t) > 0 \\ 0, & s(t) = 0 \\ -1, & s(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$z_r(t) = \begin{cases} +1, & r(t) > 0 \\ 0, & r(t) = 0 \\ -1, & r(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

를 얻는데, 이때 STDR이라면 $z_s(t) = s(t)$ 가 된다. 그 뒤,

$$e_z(t) = z_r(t) - z_s(t - \tau_1) \quad (13)$$

과 같이 $z_r(t)$ 에서 인가 신호 부호를 제거하고, $z_s(t)$ 와 $e_z(t)$ 의 상관 함수

$$C_{z_s e_z}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} z_s(t) e_z^*(t + \tau) d\tau \quad (14)$$

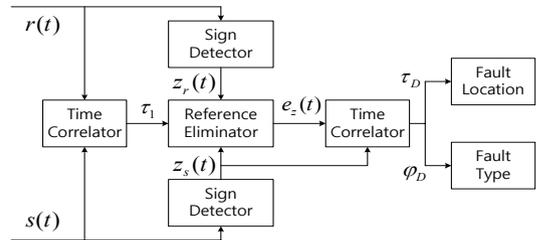


그림 5. 제안한 고장 탐지 기법의 수신부 구조
Fig. 5. Receiver structure of proposed technique

에서

$$\tau_2 = \arg \max |C_{z_s e_z}(\tau)| \quad (15)$$

를 얻어 $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 을 계산한다.

그림 6은 그림 2의 관측 신호 $r(t)$ 에 제안하는 기법을 적용한 결과이다. 그림의 첫 행은 관측 신호가 부호기를 통과한 신호 $z_r(t)$ 이고, 둘째 행은 $z_r(t)$ 에서 인가 신호의 부호를 제거한 $e_z(t)$ 이며, 마지막 행은 상관 함수 $|C_{z_s e_z}(\tau)|$ 이다. 그림 4에서와 달리, 그림의 둘째 행에서 인가 신호 부분이 거의 제거되어 셋째 행의 상관 함수가 $\tau_2 = 1.305\mu\text{s}$ 에서 가장 크기 때문에 $\tau_D = 1.005\mu\text{s}$ 를 얻고, 식 (5)의 방법으로 $d = 121\text{m}$ 를 계산하면 오차 범위 1% 이내에서 고장 위치를 찾을 수 있다.

그림 7은 그림 1, 3, 5의 고장 탐지 기법에 해당하는 신호와 상관 함수를 SSTDR 방식에서 나타낸 것이다. 수열의 한 칩에 정현파 한 주기를 곱한 것만 제외하고 그림 2, 4, 6의 설정과 모두 동일하다. STDR에서의 결과인 그림 2, 4, 6과 비슷하게, 기본 상관 함수인 $|C_{sr}(\tau)|$ 에서는 고장 위치에서 상관 값이 크지 못하고, 인가 신호를 제거한 뒤의 상관 함수인 $|C_{se}(\tau)|$ 에서는 τ_1 에서의 상관 값이 고장 위치에서의 상관 값보다 커질 수 있으며, 제안한 기법에서의 상

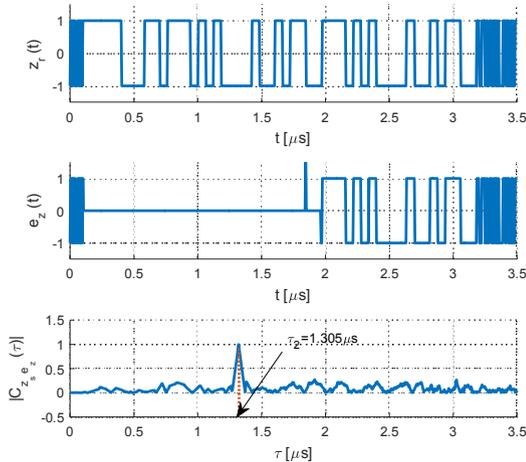


그림 6. 제안한 고장 탐지 기법에서, 관측 신호의 부호 $z_r(t)$, 제거 신호 $e_z(t)$, 상관 함수 $C_{z_s e_z}(\tau)$ 의 절대 값 Fig. 6. The sign $z_r(t)$ of observed signal, eliminated signal $e_z(t)$, and absolute correlation $|C_{z_s e_z}(\tau)|$ in proposed technique

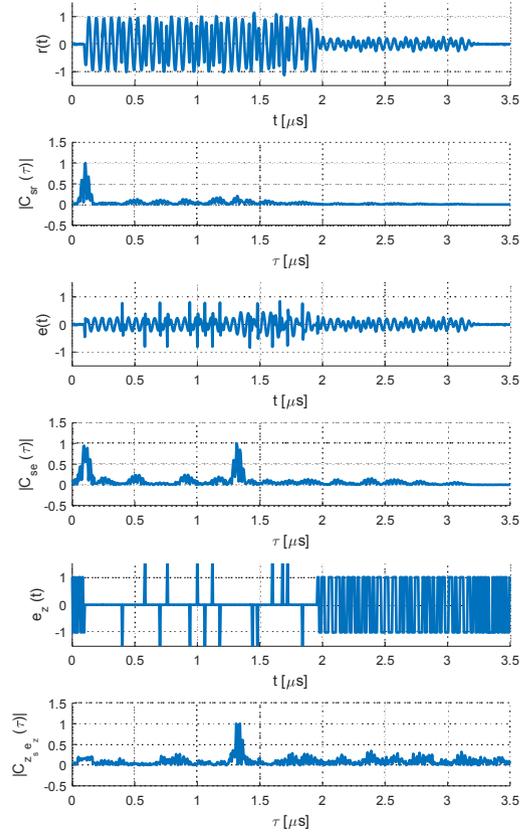


그림 7. SSTDR에서 그림 1, 3, 5의 고장 탐지 기법에 해당하는 신호와 상관 함수 Fig. 7. Signals and correlations of the detection techniques of Figs. 1, 3, and 5 in SSTDR

관함수인 $|C_{z_s e_z}(\tau)|$ 에서는 고장 위치에서 상관 값이 뚜렷하게 커져서 고장 위치를 가장 잘 찾을 수 있다.

III. 케이블 고장 탐지 모의실험

이 장에서는 고장의 위치와 종류를 바꾸어가며 기존 고장 탐지 기법과 제안한 기법을 사용하였을 때의 고장 탐지 성능을 모의실험으로 살펴본다.

3.1 케이블의 전송 채널 모형

관측 신호 $r(t)$ 는

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) \quad (16)$$

과 같이 인가 신호 $s(t)$ 가 충격응답(impulse response)이 $h(t)$ 인 시스템을 통과하고 AWGN

(additive white Gaussian noise) $n(t)$ 가 더해진 형태로 나타낼 수 있다. 충격응답 $h(t)$ 의 푸리에 변환인 전달함수(transfer function) $H(f)$ 는 크기 감쇠(attenuation), 고장 지점 반사(reflection), 시간 지연(delay), 다중경로(multipath)를 종합적으로 고려하여

$$H(f) = \sum_{i=1}^{L_p} \underbrace{\rho_i}_{\text{reflection coefficient}} \underbrace{e^{-\alpha(f)l_i}}_{\text{attenuation portion}} \underbrace{e^{-j2\pi f(l_i/v_p)}}_{\text{delay portion}} \quad (17)$$

과 같이 모형화할 수 있다^{1,8,9}. 여기서, L_p 는 경로의 수, l_i 는 i 번째 경로의 길이, $\alpha(f)$ 는 주파수에 따른 감쇠성분, ρ_i 는 i 번째 경로의 반사계수(reflection coefficient)를 나타낸다.

반사계수는 전력선의 특성 임피던스 Z_C 와 i 번째 신호 반사 지점의 종단 임피던스 Z_i 를 사용하여

$$\rho_i = \frac{Z_i - Z_C}{Z_i + Z_C} \quad (18)$$

과 같이 정의할 수 있다¹¹. 고장 형태가 단선(open circuit)인 경우의 종단 임피던스는 ∞ 로 가정하여 반사계수는 1이 되고, 합선(short circuit)인 경우의 종단 임피던스는 0으로 가정하여 반사계수는 -1이 된다. 케이블 심선의 일부가 끊어지고 일부는 연결된 반단선(partial disconnection) 고장인 경우에는 끊어진 정도에 따라 종단 임피던스를 Z_C 와 ∞ 사이로 모형화할 수 있으므로 반사계수가 0과 1사이의 값이 된다. 식 (6)에서 살펴본 상관 함수의 위상이 $\varphi_D \approx 0$ 이면 상관 함수가 양의 값을 가지므로 반사계수가 양인 경우와 같고, $\varphi_D \approx \pi$ 이면 상관 함수가 음의 값을 가지므로 반사계수가 음인 경우와 같다.

보기를 들어, 200m 길이의 케이블 한 끝에서 신호를 인가하고 인가 지점에서 150m 떨어진 위치에 반단선 고장이 있다고 가정하면 $L_p = 3$, $\rho_1 = 1$ (인가 신호), $\rho_2 = -0.5$ (반단선 고장 지점 반사 신호), $\rho_3 = 1$ (케이블 종단 반사 신호)인 세 가지 경로로 모형화할 수 있다.

3.2 고장 탐지 성능 모의실험 결과

이 논문에서는 MATLAB[®] 시뮬레이션으로 고장 탐지 성능을 모의실험 하였고, 표본화 주파수는 $f_s = 200\text{MHz}$, 케이블 전파속도는 $v_p = 2 \times 10^8\text{m/s}$, 신호

대잡음비는 20dB, 감쇠성분 $\alpha(f)$ 는 지중 전력 케이블의 감쇠성분을 활용하였다¹⁰. 또한, 케이블의 고장 유형을 단선일 때와 합선일 때의 두 종류로 설정하고, 길이 15($m = 4$)인 m-수열을 사용할 때 고장 위치의 변화에 따른 고장 오탐지율을 비교하였다. 수열의 길이와 종류에 따라 탐지 성능이 다르지만⁵, 제안하는 기법을 적용하였을 때의 성능 변화 추이는 이진 수열을 사용한 경우라면 크게 다르지 않기 때문에 한 가지 수열을 사용한 모의실험 결과만을 논문에 넣었다.

또한, 이 논문에서 고장 오탐지율은 실제 고장 위치와 추정된 고장 위치 간의 거리 오차가 2%를 초과하거나 고장 종류를 잘못 추정한 비율을 얻은 것이다. 보기를 들어, 100m 단선 고장에 대한 모의실험에서는 거리 오차가 $\pm 2\text{m}$ 를 초과하는 경우가거나 추정된 고장 위치에서 상관 값이 음수인 경우에 오탐지라고 판단하였다.

그림 8~11은 STDR에서 단선, 합선 고장, SSTDR에서 단선, 합선 고장의 오탐지율을 차레대로 얻은 것이다. 그림마다 위쪽 그래프는 0~100m의 비교적 근거리 성능, 아래쪽 그래프는 100~500m의 원거리 성능을 나타내었고, 기본 STDR/SSTDR^[3]의 오탐지율은 점선(적색), 인가 신호 제거 기법을 사용한 STDR/SSTDR^[5]의 오탐지율은 채선(황색), 제한한 고장 탐지 기법의 오탐지율은 실선(흑색)으로 나타내었다.

먼저, 모든 고장 탐지 기법에서 8m 이내 근거리 고장의 오탐지율이 높은 것은 두 가지 원인을 생각할 수 있다. 하나는 거리가 매우 가까워 수열이 많이 겹쳐 있을수록 상관 함수의 최댓값 부분도 서로 겹쳐지므로 반사 신호 위치의 상관 값을 구분하기 어려워지기 때문이다. 다른 하나는, 앞서 설명한 실험 설정에 따르면 표본 하나 차이가 0.5m의 거리 차이를 나타내는데, 오차 허용 범위인 8m 이내의 2%는 0.16m 이하의 거리 차이를 의미한다. 따라서 케이블 채널을 통과하면서 발생한 약간의 시간 지연이 근거리에서는 오차 허용 범위를 벗어나기 때문이다.

이제, STDR의 탐지 성능인 그림 8과 9를 좀 더 자세히 살펴보자. STDR에서는 식 (2)의 사각 파형과 $T_c = 0.02\mu\text{s}$ 를 사용하였다. 단선과 합선 고장에서 모두, 기본 STDR은 약 130m보다 원거리의 고장을 찾아내지 못하고, 기존의 인가 신호 제거 기법은 약 200m보다 원거리의 고장을 찾아내지 못하는 반면, 제안한 기법은 약 320m까지의 원거리 고장을 탐지하고 있음을 볼 수 있다.

다음으로, SSTDR의 탐지 성능인 그림 10과 11을

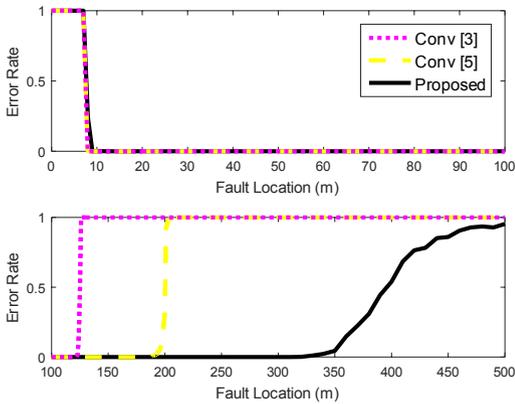


그림 8. STDR에서 단선 고장일 때 여러 고장 탐지 기법의 오탐지율
 Fig. 8. Error rates of several detection techniques when the fault type is an open circuit in STDR

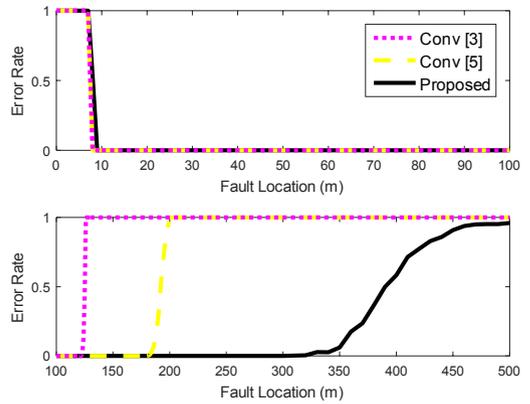


그림 9. STDR에서 합선 고장일 때 여러 고장 탐지 기법의 오탐지율
 Fig. 9. Error rates of several detection techniques when the fault type is a short circuit in STDR

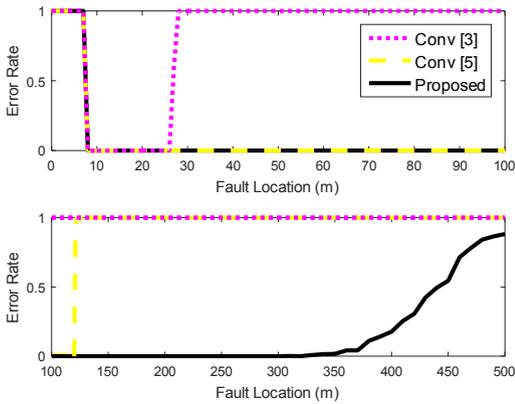


그림 10. SSTDR에서 단선 고장일 때 여러 고장 탐지 기법의 오탐지율
 Fig. 10. Error rates of several detection techniques when the fault type is an open circuit in SSTDR

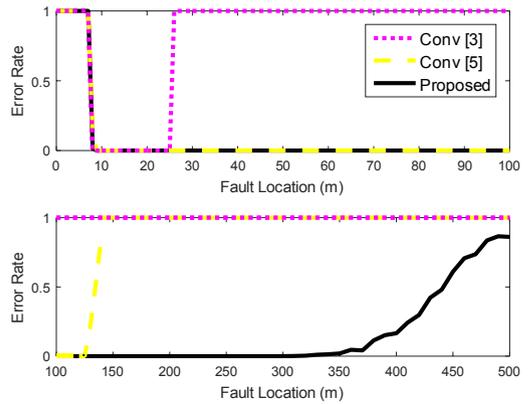


그림 11. SSTDR에서 합선 고장일 때 여러 고장 탐지 기법의 오탐지율
 Fig. 11. Error rates of several detection techniques when the fault type is a short circuit in SSTDR

살펴보자. SSTDR에서는 식 (3)의 정현파 과형에서 $T_c = 0.06\mu s$ 와 $f_c = 1/T_c$ 를 사용하였다. 단선과 합선 고장에서 모두, 기본 SSTDR은 약 27m보다 원거리의 고장을 찾아내지 못하고, 기존의 인가 신호 제거 기법은 약 120~150m보다 원거리의 고장을 찾아내지 못하는 반면, 제안한 기법은 약 320m까지의 원거리 고장을 탐지하고 있음을 볼 수 있다.

그림 10과 11의 기본 SSTDR이 그림 8과 9의 기본 STDR보다 탐지할 수 있는 거리가 크게 줄어드는 것은, SSTDR에서는 정현파를 수열에 곱하여 변조하기 때문에 그림 7의 둘째 행 $|C_{sp}(\tau)|$ 의 그래프와 같이 인가 신호 지점의 상관 함수에서 부엽(sidelobe)이 크게 나타나서, 고장 위치의 상관 값이 부엽보다 작아지

는 지점부터는 고장을 탐지할 수 없기 때문이다. 마찬가지로 이유로, SSTDR에서 기존의 인가 신호 제거 기법의 탐지 가능 거리는 STDR에서보다 줄어든다. 반면, 제안한 고장 탐지 기법에서는 관측 신호의 부호를 복원함으로써 인가 신호를 효과적으로 제거한 뒤 상관을 취하기 때문에, 인가 신호 지점의 상관 함수 부엽 크기에 거의 영향을 받지 않을 수 있다. 따라서 제안한 기법에서는 SSTDR의 탐지 가능 거리가 STDR의 탐지 가능 거리와 거의 같다.

IV. 결론

이 논문에서는 수열 또는 변조된 수열의 시간 영역

상관을 이용하여 고장을 탐지하는 STDR/SSTDR 방식에서 인가 신호 제거 기법을 사용할 때, 제거기 앞단에 부호기를 추가하여 복원된 부호를 제거하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법의 고장 탐지 성능을 기존의 기법과 비교하기 위하여, 케이블의 고장 유형을 단선 고장일 때와 합선 고장일 때의 두 종류로 설정하고 길이 15($m=4$)인 m-수열을 사용할 때 고장 위치의 변화에 따른 고장 오탐지율을 모의실험 하였다.

제안하는 방법은 케이블 선로나 측정 시 연결 회로에 의해 변형된 관측 신호를 수열의 형태로 복원시킨 후 제거하기 때문에, 부호기를 쓰지 않은 경우보다 인가 신호 부분을 효과적으로 제거할 수 있어서 고장에 의한 반사 신호 부분의 탐지 성능을 향상시킬 수 있었다. 특히, 제안한 고장 탐지 기법은 기존의 기법에서는 고장을 탐지할 수 없는 200~300m 정도의 원거리 고장에서도 거의 오류 없이 고장을 탐지할 수 있음을 보였다.

다만, 모의실험에서 2% 이내의 거리 오차만을 탐지로 판단하였기 때문에, 제안한 기법을 포함한 모든 STDR/SSTDR 방식의 고장 탐지 기법에서 8m 이내의 근거리 고장은 대부분 오탐지로 판정되었는데, 이와 같이 매우 가까운 고장인 경우에는 절대적인 거리 오차를 기준 값으로 설정하거나 폭이 좁은 펄스를 사용하여 분해능을 높이는 방법이 있을 수 있다.

References

[1] N. H. Rahim, I. S. Chairul, S. A. Ghani, M. S. A. Khair, N. Abas, and Y. H. M. Thayoob, "Simulation of TDR circuit for the analysis of wave propagation in XLPE cable model," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power and Energy*, pp. 796-801, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, Dec. 2012.

[2] S. H. Doo, K. S. Kwak, and J. B. Park, "Estimation of fault location on a power line using the time-frequency domain reflectometry," *J. IEIE*, vol. 57, no. 2, pp. 268-275, Feb. 2008.

[3] P. Smith, C. Furse, and J. Gunther, "Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location," *IEEE Sensors J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1469-1478, Dec. 2005.

[4] R. A. Guinee, "A novel transmission line test and fault location methodology using pseudo-

random binary sequences," in *Proc. IET Irish Conf. Sign. Syst.*, pp. 350-355, Galway, Ireland, Jun. 2008.

[5] J. J. Han and S. R. Park, "Performance comparison and improvement of STDR/SSTDR applying various sequences," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 637-644, Nov. 2014.

[6] J. J. Han, S. Noh, and S. R. Park, "Performance improvement of STDR scheme employing sign correlator," *J. KICS*, vol. 40, no. 6, pp. 990-996, Jun. 2015.

[7] J. J. Han, S. R. Park, and S. Noh, "Improvement of detection performance in STDR/SSTDR using sign detector," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 16, pp. 1281-1282, Aug. 2015.

[8] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553-559, Apr. 2002.

[9] J. H. Yoo, S. H. Choe, and N. Pine, "MIMO-OFDM BPLC over statistical power line channels with cross-talk," *J. KICS*, vol. 36, no. 12, pp. 1565-1573, Dec. 2011.

[10] C. K. Lee, T. S. Yoon, and J. B. Park, "Localization of concentric neutrals corrosion on live underground power cable based on time-frequency domain reflectometry," *J. IEIE*, vol. 62, no. 2, pp. 239-245, Feb. 2013.

박 소 령 (So Ryoung Park)



1997년 2월 : 연세대학교 전자공학 공학사
 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 공학석사
 2002년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 공학박사
 2003년 3월~현재 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 교수
 <관심분야> 통계학적 신호처리, 무선통신, 다중접속 등