

Validation of Propagation Velocity through TDR Test in HVDC Submarine Cables

정 채 균[†] · 박 준 우* · 문 경 희** · 양 병 모** · 강 지 원***

(Chae-Kyun Jung · Jun-Woo Park · Kyoung-Hee Moon · Byeong-Mo Yang · Ji-Won Kang)

Abstract - This paper performs TDR real test for measurement of propagation velocity on # 1 Pole of HVDC submarine cable section between Jeju and Haenam, and then measured velocity is compared with theoretical value and velocity provided from manufacturer. The measured velocity is also validated from theoretical process based on CIGRE simplified approach. In this paper, the fault location algorithm using multi-scale correlation of SWT(stationary wavelet transform) and travelling wave is additionally proposed for HVDC submarine cable system, it includes fault signal filter for noise cancellation. Finally, the measured velocity is validated from proposed fault location algorithm test once more.

Key Words : HVDC, Fault location, Submarine cable, TDR, Wavelet transform, Velocity

1. 서 론

해저케이블은 해저에 포설되므로 케이블 길이가 길어지고 육상 케이블에 비해 더 좋은 전력 품질이 요구된다. 또한 깊은 해저에 포설되는 특성상 조류 등의 영향을 받아 케이블에 매우 큰 압력이 작용할 위험이 있어 외상에 대한 방호의 목적으로 금속성 외장이 필요하며, 육상과는 달리 선박에 의해 포설되는 특수 기술이 요구된다[1]. 이러한 특수한 포설환경을 고려할 때 해저케이블에서 고장발생시 신속하고 정확한 고장점 탐지는 복구시간 단축을 위해 필수적이다. 현재 국내에서도 제주~해남간에는 사이리스터 밸브를 이용한 직류 Bipole 방식을 이용해 해수귀로 방식으로 전력을 공급하는 ±180 kV HVDC 해저케이블이 1998년부터 운전 중에 있다. 그러나 2012년에는 공급능력 809 MW, 최대수요 약 682 MW로 제주지역의 적정 예비율 유지의 어려움으로 전력수급에 차질이 예상되고 있으며, 특히 제주지역 전력계통 특성상 대용량 발전기 탈락에 따른 주파수 저하, 기존의 HVDC 케이블 고장에 따른 광역정전 가능성 등으로 인해 진도~제주간 200 MW 2회선 2단계 HVDC 해저케이블 건설을 계획하고 있다[2-3]. 이처럼 HVDC 해저 케이블은 제주 지역을 중심으로 증설되고 있는 상황이나 장거리 DC 해저 케이블 고장시 신속한 고장복구에 필수적인 고장점 탐지 기술 등은 종래의 육상 케이블에 적용하고 있는 방법을 그

대로 적용하고 있는 실정이다. 실제로 2006년 4월에 발생한 제주~해남간 해저케이블에서 발생한 고장사례에서도 볼 수 있듯이, 해저케이블 구간 고장으로 제주 지역에 광역정전이 발생하였고, 고장점 탐지 지연으로 복구 시간 및 과도한 복구 비용이 발생하기도 하였다. 특히, 제주~해남간 해저케이블 구간은 약 100 km의 공장을 가지는 장거리 케이블인 관계로 고장 발생시 신속한 고장점 탐지가 어려우며, 육안으로 고장지점 확인이 불가능하기 때문에 고장점 탐지 과정에서 오차가 발생할 경우 복구 시간은 길어질 수밖에 없다.

따라서 본 논문에서는 장거리 해저케이블의 신속하고 정확한 온라인 고장점 탐지를 위해 SWT(Stationary Wavelet Transform)를 이용한 고장신호 필터를 거쳐 출력되는 신호를 이용해 고장점을 탐지할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제시되는 고장점 탐지 알고리즘은 고장 발생시 케이블 양단에서 멀티스케일 웨이블릿 계수의 상호관계를 이용해 진행파를 포함한 과도신호가 양단 모션에서 반사되는 시점의 Time Delay를 이용해 고장점을 탐지하는 기법으로 TDR 시험법과 마찬가지로 정확한 전파속도의 적용은 고장점까지의 계산 오차를 줄이기 위해 필수적이다. 그러나 제주~해남간 해저케이블의 전파속도는 제조사에서 제시한 전파속도와 기존 사고 발생시 측정된 값이 서로 상이하여 실제 고장발생시 적절한 전파속도 값 적용 하는데 많은 혼선이 우려되고 있는 상황이다. 따라서 본 논문에서는 해저케이블의 정기 예방진단 기간을 이용해 Cable test van(Teleflex MX) 장비를 이용해 제주~해남간 #1 Pole의 설계통을 대상으로 TDR 시험을 수행하였으며, 기존의 전파속도와 비교 및 이론적 검증과정, 온라인 고장점추정 기법의 적용을 통해 적정 전파속도 값을 선정하였다.

2. 제주-해남간 해저케이블 특성

제주~해남간 해저케이블은 Bipole 방식의 해수귀로 방식으로 전압은 DC ±180 kV 이며, 총 전송용량은 300

* 정 회 원 : 한전 전력연구원 연구원
 ** 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원
 *** 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원 · 공박
 † 교신저자, 정 회 원 : 한전 전력연구원 연구원 · 공박
 E-mail : chekyun@kepri.re.kr

접수일자 : 2009년 8월 24일

최종완료 : 2009년 9월 7일

※ 본 논문은 본 학회 2009년 하계학술대회 학술위원회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회 심사 후 본 논문지에 게재 되었음.

MW(150 MW × 2 Pole)이고 # 1 Pole과 # 2 Pole의 총 선로길이는 각각 101.7 km와 100.3 km이다. 또한 케이블은 프랑스 알카텔사에서 제조한 CUMI 800 mm²를 사용하고 있으며 케이블 구조와 도체 외경 및 전기적 상수는 각각 그림 1과 표 1에서 나타내었다.

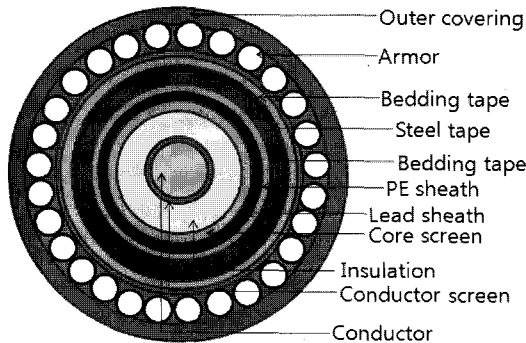


그림 1 CUMI 800 mm² 해저케이블 구조
Fig. 1 Submarine cable structure of CUMI 800 mm²

표 1 CUMI 800 mm² 해저케이블 외경 및 전기적 상수
Table 1 Dimension and electrical parameter of submarine cable of CUMI 800 mm²

	두께 (t[mm])	외경 (D[mm])	비고
Conductor	-	32.6	저항률 = 1.724[μΩ · cm]
Conductor Screen	0.6	33.8	-
Insulation	9.5	52.8	유전율 = 4.3
Core Screen	0.45	53.6	-
Lead Sheath	2.7	59.1	저항률 = 20.4[μΩ · cm]
PE Sheath	3.2	65.5	유전율 = 2.3
Bedding Tape	0.35	66.2	-
Reinforcement(Steel Tape)	2*0.3	67.4	-
Bedding Tape(PP)	1.2	69.8	-
Armor (Galvanized Steel, 37Wire Ø6)	6.15	82.1	저항률 = 10[μΩ · cm]
Outer Covering	4.1	90.3	유전율 = 2.2

본 논문에서는 #1 Pole을 대상으로 TDR 실증시험을 실시하였으며, 실증시험 결과를 바탕으로 정확한 전파속도를 측정하고 이를 검증하는 과정을 거쳐 장거리 해저케이블에서 신속하고 정확한 온라인 고장점 탐지를 위해 제안된 고장점 탐지 알고리즘에 적용하였다. 고장점 탐지 알고리즘 테스트는 EMTP/ATP 모델링 결과를 바탕으로 하였으며, 고장은 각각 전원단으로부터 4 km, 20 km, 40 km, 60 km, 80 km, 100 km 지점에서 도체-시스간에 지락고장이 발생하는 것으로 가정하였다. 여기서 고장신호의 샘플링 주파수는 1 MHz이다.

3. 해저케이블 TDR 실증시험

본 논문에서는 그림 2와 같은 Cable Test Van(Teleflex MX)을 이용해 제주~해남간 #1 Pole 해저케이블에서 TDR 실증시험을 실시하였다. 실증시험은 해남 변환소에서 실시

하였으며 그림 3의 TDR 시험 회로도에서처럼 제주 변환소 말단을 각각 개방하고 접지한 상태에서 전파속도를 측정하였다.

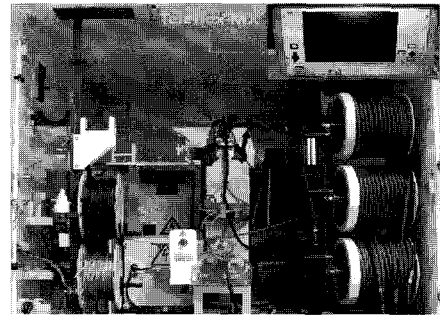


그림 2 Cable Test Van
Fig. 2 Cable Test Van

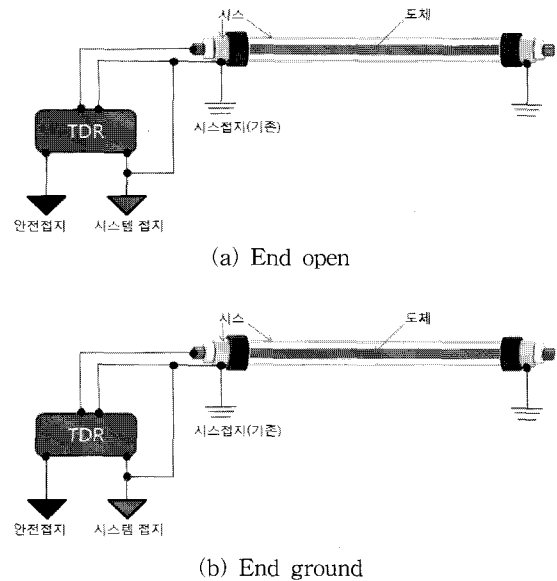


그림 3 TDR 시험 회로도
Fig. 3 Circuit diagram of TDR test

전파속도 실증시험 결과 그림 4에서처럼 #1 Pole의 전파속도(v/2)는 68.6 m/μs, 즉 전파속도(v)는 137.2 m/μs로 측정되었다. 그러나 표 1에서와 같이 해저케이블의 절연체인 MI paper에 대한 유전율 4.3을 식 (1)을 이용해 전파속도를 계산하면 144.67 m/μs로 실측값에 비해 5.44 %의 오차를 보인다. 아울러 케이블 제조사인 알카텔사에서 제시한 전파속도(v)는 141 m/μs로 실측값 대비 2.77 %를 보이며, 참고문헌 [4]에서 제시한 전파속도(v)도 141.4 m/μs로 서로 상이한 결과를 보인다. 그림 5에서는 본 논문에서 측정한 전파속도와 이론 값 및 케이블 제조사에서 제시된 전파속도를 서로 비교하여 나타내었다.

$$v = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon}} \tag{1}$$

여기서, v_c는 300[m/μs]의 광속이며, ε은 절연체 비유전율이다.

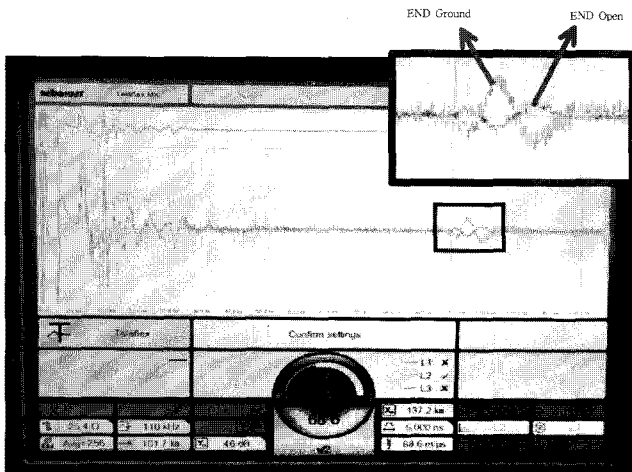


그림 4 TDR 시험을 통한 전파속도 측정
Fig. 4 Measurement of propagation velocity through TDR test

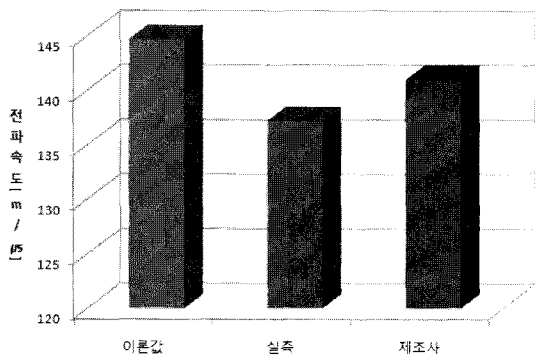


그림 5 전파속도 비교
Fig. 5 Comparison of propagation velocity

그림 6에서는 전파속도 변화에 따른 고장점까지의 거리 계산 결과와 오차를 보여준다. 여기서, 실제 고장 발생지점은 전원단으로부터 20 km 지점이다. 그림에서처럼 전파속도가 137 m/μs에서 오차율 0.09 %로 정확한 고장점이 계산 되었으나, 전파속도가 120 m/μs일 경우 계산거리는 23.91 km로 오차율 3.91 %를 보여 전파속도가 감소할수록 계산 거리가 증가하면서 오차율도 상승하는 경향을 보이고 있으며, 전파속도가 150 m/μs로 증가할 경우도 계산 거리가 17.175 km로 오차율 2.825 %를 보여 전파속도가 증가할수록 계산 거리가 감소하면서 오차율 또한 상승한다. 이 처럼 진행파를 이용한 고장점 탐지 방법에서 정확한 고장점 탐지를 위해서는 선로의 전파속도가 중요한 요소로 작용을 하게된다. 그러나 그림 5에서처럼 제조사가 제공하는 전파속도와 TDR 실증시험을 통한 전파속도, 이론 값이 서로 상이한 값을 보여 실제 제주~해남간 HVDC 해저케이블에서 고장발생시 전파속도 값 적용에 있어 많은 혼선이 발생할 것으로 우려된다. 따라서 본 논문에서는 케이블의 반도체층이 유전율에 미치는 영향을 검토한 CIGRE WG 21-05의 Prject Memo "The effect of lossy insulation (paper-oil) and semiconductive layers on wave propagation in cables"[5]의 연구결과를 이용해 실측값과 이론값의 오차 원인을 분석하였다.

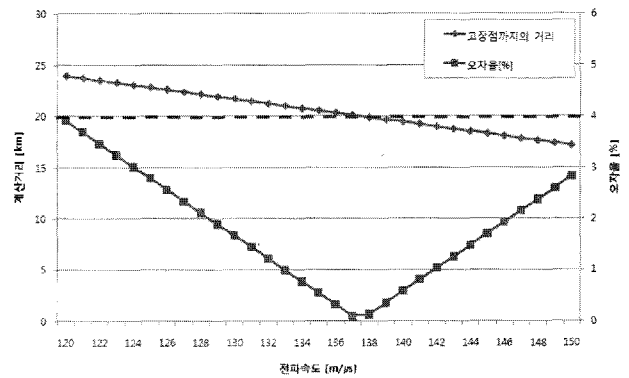


그림 6 전파속도 변화에 따른 고장점까지의 거리 계산 결과 및 오차율
Fig. 6 Calculation results and error rate of distance to fault point according to change of propagation velocity

참고문헌 [5]의 CIGRE WG 21-05에서는 케이블이 내부 반도체층과 외부 반도체층이 케이블의 유전율에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 특히 Simplified approach를 통해 반도체층을 고려한 절연층의 유전율을 계산하는 방법을 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 케이블의 반도체층을 고려한 Simplified approach를 통해 TDR 실증시험을 통해 실측한 전파속도를 검증하는 과정을 거쳤다. 먼저 CUMI 800 mm의 일반적인 절연체 커패시턴스는 식 (2)와 계산되어 0.53631 μF/km를 갖는다. 그러나 Simplified approach에 의해 내부 반도체층과 외부 반도체층의 영역까지 절연체 영역을 확장하여 유전율을 계산한 결과 식 (3)에서 처럼 유전율은 4.81로 상승하게 된다.

$$\frac{\times \times \times}{\times \times \times} \quad [\mu F/km] \quad (2)$$

$$\frac{\times \times \times}{\times \times \times} \quad (3)$$

여기서, r₁은 도체 외반경, r₂는 내부 반도체층 외반경, r₃는 절연체 외반경, r₄는 외부 반도체층 외반경 이다.

식 (2)에서 계산된 커패시턴스는 0.53631 μF/km로 해저케이블의 절연체 커패시턴스 0.54 μF/km와 거의 일치하였고, 반도체층을 고려한 유전율의 경우도 식 (3)에서처럼 4.81로 식 (1)에 의해 전파속도로 환산하면 136.79 m/μs가 되어 0.41 m/μs의 오차에 불과했다. 또한 실측된 전파속도를 유전율로 환산하면 4.78로 CIGRE에서 제시된 Simplified approach에 의해 계산된 식 (3)의 결과와 비교해 0.03의 오차에 불과해 실증시험에 의해 실측된 전파속도와 유전율은 Simplified approach에 의한 이론값과 거의 일치하는 것으로 판단할 수 있으며, 이 결과를 바탕으로 본 논문에서는 고장점 추정 알고리즘 검증을 위해 실측값인 137.2 m/μs의 전파속도를 적용하였다.

표 1에서는 식 (1)에 의해 계산된 전파속도 이론 값과 CIGRE에서 제시된 Simplified approach에 의한 이론 값, TDR 실증시험을 통해 실측된 전파속도와 유전율을 상호 비교하여 나타내었다.

4. HVDC 해저 케이블 고장점 추정 알고리즘

4.1 HVDC 해저 케이블 진행파 특성

현재 국내에서 주로 사용하고 있는 고장점 탐지 방법은 휘스톤 브리지의 원리를 이용한 머레이 루프(Murray Loop) 방법과 본 논문에서 실증시험을 통해 전파속도를 측정된 TDR(Time Domain Reflectometer) 방법이 있다. 그러나 머레이 루프법은 최소 1상의 건전상이 존재하여야 하며, 고장 저항이 높을 경우 귀로 전류가 작아서 검류계가 정확하지 않거나, 측정오차가 커지는 단점이 있으며, TDR 방법은 폭이 넓은 펄스를 단거리 케이블에 적용할 경우 정확한 고장점 추정이 어려울 수 있으며, 폭이 너무 짧으면 실제 고장점이 아닌 분기점에서 반사파가 발생하여 파형분석이 다소 어려워지는 문제가 발생할 수 있다. 이외에도 ARM(Arc Reflection Method)을 이용하는 방법, Pin pointing법, Searching Coil법 등의 다양한 방법 등이 고장점 탐지를 위해 적용되고 있으나, 이 모든 방법은 오프라인에서 수행되는 것으로 고장 발생 후 선로를 완전히 계통에서 분리한 후 적용되며, 고장점 탐지에 비교적 긴 시간이 소요될 뿐 아니라 측정자의 숙련도 또한 측정오차에 영향을 미칠 수 있어 실제 적용에 많은 문제점으로 지적되고 있다[6-7].

이처럼 국내에서 기존에 적용하고 있는 모든 고장점 추정 방법은 대부분 오프라인에서 적용하는 방식이나, 본 논문에서는 웨이브렛 기법을 적용한 고장신호 필터[6-7]와 그림 7의 Bewely lattice diagram으로 도식화된 진행파 특성에서처럼 양단에서 측정된 첫 번째 신호 도달시간의 지연시간을 이용해 고장거리를 환산하게 된다. 양단정보를 이용하는 방법은 A S/S 및 B S/S에 첫 번째 도달하는 신호인 TA_{p1} 과 TB_{p1} 의 지연시간을 이용해 고장거리를 환산하게 된다. 일반적으로 판단정보를 이용하는 방법도 있으나, 해저 케이블은 장거리 케이블로 신호의 감쇄현상을 고려할 때 두 번째 신호를 탐지하기가 어려울 수 있어, 두 번째 도달 신호부터 나타나는 감쇄현상을 무시할 수 있는 양단정보를 이용한 고장점 탐지 방법이 유리할 것으로 사료된다. 이 방법은 고장구간을 판별할 필요가 없다는 장점이 있으나, 양단간의 시간 동기화가 필수적이다. 양단간의 데이터 통신은 GPS를 이용할 수 있으며, 최종적으로 고장점까지의 거리는 식 (4)에 의해 환산된다.

$$(4)$$

여기서, X는 고장점까지의 거리이며, L은 총 선로길이이다.

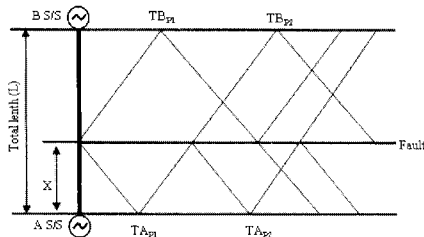


그림 7 해저케이블 고장시 진행파 특성

Fig. 7 Travelling wave characteristics in case of submarine cable fault

4.2 노이즈 제거를 위한 고장신호 필터

일반적으로 지중케이블 계통에서 발생하는 과도현상은 외부 환경적인 영향 등에 의한 간섭으로 높은 주파수 영역의 노이즈가 발생되므로 노이즈와 과도신호를 판별하기가 매우 어렵다. 즉, 그림 9(a)에서처럼 기존 단순 웨이브렛 적용으로는 고장점에서 반사되는 과도신호를 원활히 검출할 수 없으며, 이는 결국 정확한 고장점 추정에 심각한 영향을 미친다. 따라서 노이즈를 제거하는 방법은 진행파를 이용한 고장점 추정에 있어 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

본 논문에서는 고장 발생시 나타나는 과도신호에 대한 Multi-scale 웨이브렛 분석을 통해 검출된 신호의 상호관계(correlation)를 이용해 노이즈를 제거하는 고장신호 필터를 제시하였다. 고장신호 필터는 Multi-scale Correlation을 이용한 기법으로 첫 번째와 두 번째 스케일에서의 Detail 성분은 그림 8에서처럼 직접 곱하여 $C=D_1 \times D_2$ 를 생성하고, 다음으로 C_{new} 의 Correlation 방정식을 얻는다. 마지막으로 C_{new} 와 D_1 의 절대값의 대소비교를 통해 새로운 Detail 성분인 D_{1_new} 에서는 노이즈 성분은 제거되고 각각 양단에 첫 번째 도달하는 신호만 남게 된다. 그림 8에서는 노이즈가 제거되는 과정을 상세히 나타내었다.

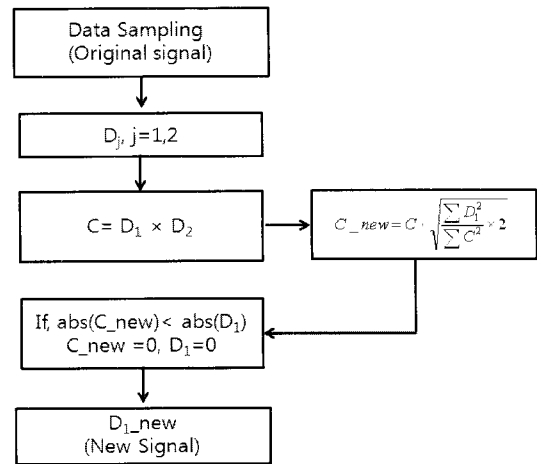
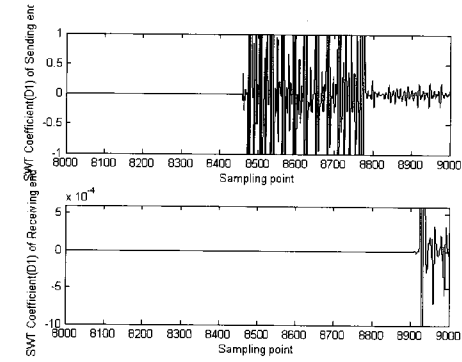


그림 8 노이즈 제거를 위한 고장신호 필터

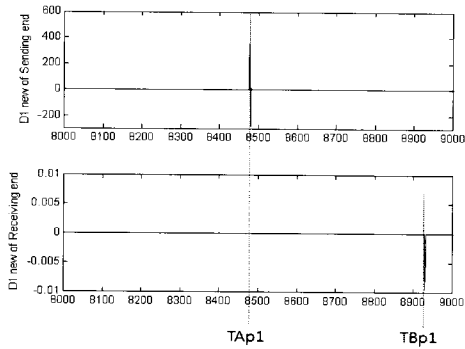
Fig. 8 Fault signal filter for noise cancellation

4.3 고장점 추정 결과

그림 9에서는 20 km지점에서 고장시 노이즈 제거 과정과 고장신호 필터 적용 후 검출된 신호의 파형을 보여준다. 그림 9(a)에서처럼 웨이브렛 1단계 신호인 D_1 에서는 신호에 상당한 노이즈가 포함되어 있으나 그림 9(b)에서처럼 노이즈 제거를 위한 고장신호 필터를 거쳐 각 양단의 첫 번째 도달신호인 TA_{p1} 과 TB_{p1} 의 다른 신호는 제거되는 것을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 검출된 양단 모선의 TA_{p1} 과 TB_{p1} 시간을 식 (4)의 고장거리 계산식에 적용하면 식 (5)와 같이 고장점까지의 거리가 계산된다. 여기서 전파속도는 TDR 실증시험을 통해 측정된 $137.2 \text{ m}/\mu\text{s}$ 를 적용하였으며, 고장점까지의 거리는 20.04 km 로 계산되어 오차는 0.0003% 로 매우 정확하게 계산되는 것을 알 수 있다.



(a) 노이즈 제거 이전(D₁)



(b) 노이즈 제거 이전(D_{1_new})

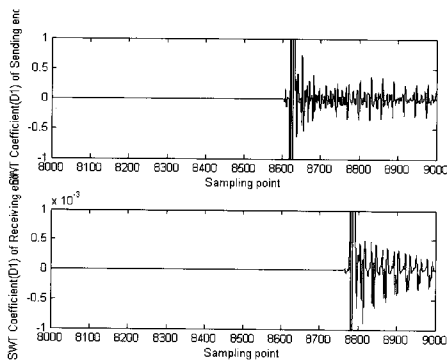
그림 9 20km 지점 고장시 노이즈 제거 과정

Fig. 9 Noise cancellation procedure in case of 20km fault

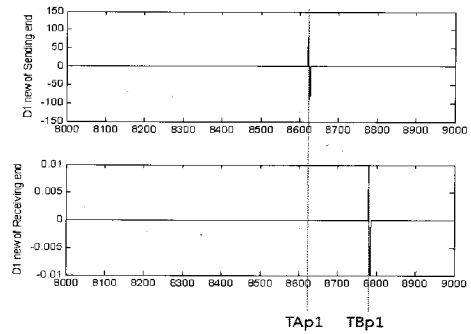
$$\frac{101.7 + 1.372 \times 10^5 \cdot (0.008475 - 0.008924)}{2} = 20.24 \text{ km} \quad (5)$$

$$\text{Error} = \frac{|20.04 - 20|}{101.7} = 0.0003\% \quad (6)$$

그림 10에서는 40 km지점에서 고장시 노이즈 제거 과정과 고장신호 필터 적용 후 검출된 신호의 파형을 보여준다. 그림 10(a)에서도 D₁에 다량의 노이즈가 포함되어 있는 것을 알 수 있으나, 그림 10(b)에서처럼 노이즈 제거를 위한 고장신호 필터를 거치면서 양단 모선에서 명확히 TA_{p1}과 TB_{p1}시간이 검출된다. 여기에서도 137.2 m/μs의 전파속도를 적용한 결과 식 (7)에서처럼 고장점까지의 거리는 40.08 km로 계산되어 오차는 0.07 %로 매우 정확하게 계산된다.



(a) 노이즈 제거 이전(D₁)



(b) 노이즈 제거 이전(D_{1_new})

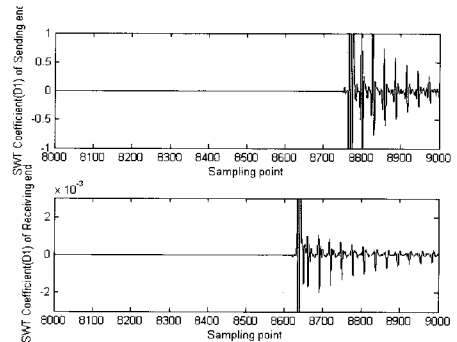
그림 10 40km 지점 고장시 노이즈 제거 과정

Fig. 10 Noise cancellation procedure in case of 40km fault

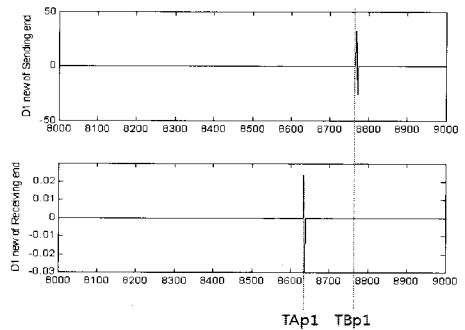
$$\frac{101.7 + 1.372 \times 10^5 \cdot (0.008621 - 0.008778)}{2} = 40.08 \text{ km} \quad (7)$$

$$\text{Error} = \frac{|40.08 - 40|}{101.7} = 0.07\% \quad (8)$$

그림 11과 그림 12에서는 각각 60 km 지점과 80km 지점에서 고장시 노이즈 제거 과정과 고장신호 필터 적용 후 검출된 신호의 파형을 보여준다. 그림 11(b)와 그림 12(b)에서처럼 노이즈 제거를 위한 고장신호 필터를 거치면서 양단 모선에서 명확히 TA_{p1}과 TB_{p1}시간이 검출되는 것을 알 수 있으며, 137.2 m/μs의 전파속도를 적용한 결과 식 (9)와 식 (11)에서처럼 각각 고장점까지의 거리는 60.11km와 80.14km로 정확하게 계산된다.



(a) 노이즈 제거 이전(D₁)



(b) 노이즈 제거 이전(D_{1_new})

그림 11 60km 지점 고장시 노이즈 제거 과정

Fig. 11 Noise cancellation procedure in case of 60km fault

$$\frac{101.7 + 1.372 \times 10^5 \cdot (0.008767 - 0.008632)}{2} = 60.11 \text{ km} \quad (9)$$

$$\text{Error} = \frac{|60.11 - 60|}{101.7} = 0.108 \% \quad (10)$$

$$\frac{101.7 + 1.372 \times 10^5 \cdot (0.008913 - 0.008486)}{2} = 80.14 \text{ km} \quad (11)$$

$$\text{Error} = \frac{|80.14 - 80|}{101.7} = 0.13 \% \quad (12)$$

표 2에서는 각각 TDR 실증시험을 통해 측정된 전파속도와 이론값, 제조사에서 제공한 전파속도를 적용한 제주~해남간 HVDC 해저 케이블에서 고장위치 별 고장점 추정 결과를 나타내었다. 표에서처럼 CIGRE Simplified approach에 의해 검증된 TDR 실측에 의한 전파속도를 적용한 고장점 추정 결과는 오차거리가 0.004 km ~ 0.14 km로 매우 정확하게 계산되는 반면, 이론값과 제조사가 제공한 전파속도를 적용할 경우에는 각각 최대오차가 2.7986 km와 1.469 km로 오차거리가 커지는 것을 알 수 있다. 장거리 케이블 일 뿐 아니라 육안으로 고장지점 탐지가 불가능한 HVDC 해저 케이블의 특성을 고려할 때 정확한 고장점 탐지는 매우 중요하며, 이를 위해 정확한 전파속도의 적용 또한 필수적이다. 따라서 향후 제주~해남간 해저 케이블 구간에서 고장발생시 정확한 고장점 추정을 위해 본 논문을 통해 검증된 137.2 m/μs의 전파속도를 적용해야 될 것으로 사료된다. 이는 137.2 m/μs의 전파속도를 본 논문에서 제시한 HVDC 해저 케이블 고장점 추정 기법에 적용한 결과에서 검증되었다. 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘은 기존의 TDR처럼 고장발생 후 선로에 펄스를 주입하여 고장점을 탐지하는 방법이 아니라 고장이 발생하는 즉시 고장신호를 탐지하여 고장점을 탐지하는 온라인 기법으로 고장복구 시간을 최소화 할 수 있으며, 인공 펄스에 비해 신호의 크기가 커 신호 검출이 유리하고, 고장신호에 포함된 노이즈 성분은 고장신호 필터에 의해 효과적으로 제거 되므로 정확도 측면에서 기존의 TDR보다 훨씬 유리하다.

표 2 전파속도에 따른 HVDC 해저 케이블 고장점 추정 결과

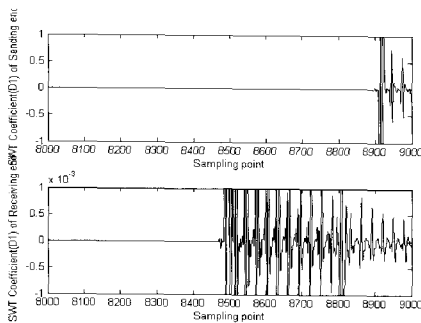
Table 2 Fault location results of HVDC submarine cable according to propagation velocity

고장 위치	TAp1[s]	TBp1[s]	전파속도		
			실측값 (137.2 m/μs)	이론값 (144.67 m/μs)	제조사 (141 m/μs)
			계산거리 (오차거리)	계산거리 (오차거리)	계산거리 (오차거리)
4 km	0.008358	0.009041	3.996 km (0.004 km)	1.445 km (2.555 km)	2.698 km (1.302 km)
20 km	0.008475	0.008924	20.04 km (0.04 km)	18.371 km (1.629 km)	19.195 km (0.815 km)
40 km	0.008621	0.008778	40.08 km (0.08 km)	39.493 km (0.507 km)	39.781 km (0.219 km)
60 km	0.008767	0.008632	60.11 km (0.11 km)	60.615 km (0.615 km)	60.367 km (0.367 km)
80 km	0.008913	0.008486	80.14 km (0.14 km)	80.737 km (0.737 km)	80.953 km (0.953 km)
100 km	0.009059	0.008341	100.1 km (0.1 km)	102.786 km (2.786 km)	101.469 km (1.469 km)

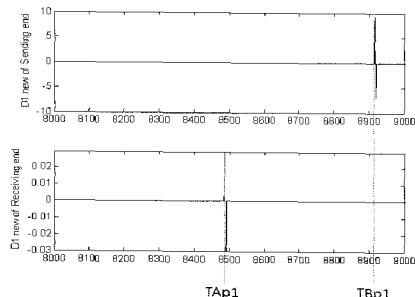
5. 결 론

본 논문에서는 제주-해남간 HVDC 해저 케이블 #1 Pole의 실제통을 대상으로 TDR 실증시험을 통해 전파속도를 측정하였으며, 이론 값 및 제조사에 제공한 전파속도와 상호 비교와 이론적 검증 과정을 거쳐 이를 장거리 해저케이블에서 신속하고 정확한 온라인 고장점 탐지를 위해 제안된 고장점 추정 알고리즘에 적용하여 전파속도를 검증하였다. 본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) TDR 실증시험결과 제주-해남간 해저케이블의 전파속도는 137.2 m/μs로 측정되어 해저케이블 절연체인 MI paper에 대한 유전율 4.3을 적용한 144.67 m/μs와는 5.44 %의 오차를 보였고, 제조사에 제공한 141 m/μs와는 2.77 %의 오차를 보여 서로 상이한 특성을 보였다.
- 2) 전파속도가 감소할수록 해저 케이블 고장점까지의 계산거리는 증가하며, 전파속도가 증가하면 고장점까지의 계산거리가 감소하는 등 진행파를 이용한 고장점 탐지 방법에서 전파속도는 정확한 고장점 탐지를 위해 매우 중요한 요소로 작용한다.
- 3) 케이블의 내부 반도체층과 외부 반도체층의 특성을 고려한 CIGRE Simplified approach에 의해 해저 케이블 유전율은 4.81로 계산되었으며, 이를 전파속도로 환산하면 136.79 m/μs가 되어 실측값 대비 0.41 m/μs에 불과 했으며, 실측된 전파속도를 유전율로 환산하면 4.78로 CIGRE Simplified approach에 의해 계산된 결과와 비교해 0.03의 오차에 불과해 실증시험에 의해 실측된 전파속도와 유전율은 CIGRE Simplified approach에 의



(a) 노이즈 제거 이전(D₁)



(b) 노이즈 제거 이전(D_{1_new})

그림 12 80km 지점 고장시 노이즈 제거 과정

Fig. 12 Noise cancellation procedure in case of 80km fault

한 이론값과 거의 일치하였다. 따라서 본 논문에서는 고장점 추정 알고리즘 검증에 위해 실측값인 137.2 m/ μ s의 전파속도를 적용하였다.

- 4) 본 논문에서는 HVDC 해저 케이블 고장점 추정 알고리즘을 위해 고장 발생시 나타나는 과도신호에 대한 Multi-scale 웨이블릿 분석을 통해 검출된 신호의 상호관계를 이용한 노이즈 제거용 고장신호 필터를 제시하였으며, 고장신호 필터를 통해 양단 모선의 첫 번째 도달 신호인 TA_{p1} 과 TB_{p1} 도달 시간이 명확히 검출된다.
- 5) TDR 실증시험을 통해 측정된 전파속도와 이론값, 제조사에서 제공한 전파속도를 적용한 제주~해남간 HVDC 해저 케이블에서 고장위치 별 고장점 추정을 실시한 결과 CIGRE Simplified approach에 의해 검증된 TDR 실측에 의한 전파속도를 적용한 고장점 추정 결과는 오차거리가 0.004 km ~ 0.14 km로 매우 정확하게 계산되는 반면, 이론값과 제조사가 제공한 전파속도를 적용할 경우에는 각각 최대오차가 2.7986 km와 1.469 km로 오차거리가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 제주~해남간 해저 케이블 구간에서 고장발생시 정확한 고장점 추정을 위해 본 논문을 통해 검증된 137.2 m/ μ s의 전파속도를 적용해야 될 것으로 사료된다.
- 6) 본 논문에서 제시한 알고리즘은 고장이 발생하는 즉시 고장신호를 탐지하여 고장점을 탐지하는 온라인 기법으로 고장복구 시간을 최소화 할 수 있으며, 신호 검출이 유리하고, 고장신호에 포함된 노이즈 성분은 고장신호 필터에 의해 효과적으로 제거 되므로 정확도 측면에서 기존의 TDR보다 훨씬 유리하다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "지중송전 케이블 시스템", 2002. 12
- [2] 이종석, 문봉수, 강원탁, 김경석, "진도-제주간 직류연계 사업을 위한 변환소 건설 개요", 2009 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7
- [3] 이종석, 문봉수, 송삼섭, 홍순명, "진도-제주간 HVDC 연계 사업 해저케이블 보호공법", 2009 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7
- [4] 문신용, 김정대, 장석한, "HVDC 해저케이블 고장점 탐지 사례 연구", 2008 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2008. 7
- [5] B. Gustavsen, "The effect of lossy insulation (paper-oil) and semiconductive layers on wave propagation in cables", CIGRE WG 21-05 Project Memo, 2002. 11
- [6] C.K.Jung, J.B.Lee, X.H.Wang, Y.H.Song, "Wavelet based noise cancellation technique for fault location on underground power cables", Electric Power Systems Research(EPSR), 2006
- [7] 정채균, 박준우, 문경희, 양병모, 강지원, 김종채, "HVDC 해저케이블 고장점 추정에 관한 연구", 2009 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7

저 자 소 개



정 채 균 (鄭彩均)

1973년 7월 14일 생, 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2006년~2007년 독일 University of Siegen Post-doc 연구원, 2007~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 연구원.

Tel : (042)865-5927

E-mail : chekyun@kepri.re.kr



박 준 우 (朴俊雨)

1975년 11월 12일생, 2002년 충남대 공대 전기공학과 졸업, 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 한전임사, 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 연구원.

Tel : (042)865-5925

E-mail : jerry@kepco.co.kr



문 경 희 (文景熙)

1968년 12월 28일생, 1993년 중앙대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 ~ 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.

Tel : (042)865-5924

E-mail : mkh@kepco.co.kr



양 병 모 (梁炳模)

1969년 4월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 1997년 한전 전력연구원 임사, 현재 한전 전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5922

E-mail : bmyang@kepco.co.kr



강 지 원 (姜地原)

1965년 1월 6일생, 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1993년 ~ 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 책임연구원.

Tel : (042)865-5920

E-mail : jwkwang@kepri.re.kr