

## HVDC 케이블 고장점 표정 알고리즘

권영진, 이동규, 강상희  
명지대학교 차세대전력기술연구센터

### Fault Location Algorithm for HVDC Cables

Young-Jin Kwon, Dong-Gyu Lee, Sang-Hee Kang  
Next-generation Power Technology Center Myong-ji University

**Abstract** - For a safe operation of HVDC systems, the fault location and clearance of faults in the HVDC lines are important. Past methods for fault location on HVDC cable depend on existence of assistance cables and fault resistance, broken cable and environment of fault location. For complement these problems, in this paper, fault location method using traveling wave and cross correlation function is proposed for HVDC cables. Voltage controlled source and current controlled source HVDC were modeled by EMTDC/PSCAD. The proposed algorithm were verified varying with fault distance, fault resistance.

#### 1. 서 론

HVDC(High Voltage Direct Current) 송전 방식은 장거리 송전의 경우 교류 시스템보다 수송 전력이 크고 서로 다른 주파수로 동작하는 교류 시스템 연계 시 전력 수송이 가능하다. 이러한 HVDC 송전의 장점과 전력변환장치의 성능향상으로 HVDC 송전 방식을 채택하여 송전하는 경우가 많이 늘어나고 있다. 국내의 경우도 제주-해남 구간에 해저 케이블을 이용한 HVDC 송전 시스템을 채택하고 있으며 풍력이나 태양광을 이용한 분산전원의 계통 연계선로에 사용이 검토되고 있다. HVDC의 사용이 증가하면서 HVDC 송전선의 고장분석 및 고장대비에 대한 노력도 커지고 있다. 그 중 케이블을 이용한 HVDC 시스템에서 지락 및 단락, 단선 등과 같은 고장에 대한 여러 고장점 표정 알고리즘들이 꾸준히 연구되어 왔다[1]. 케이블의 고장점을 찾는 방법 중 썬치코일법은 고장저항이 수 옴 이하가 아니면 검출이 불가능하며, 방전탐지법은 매설케이블의 경우 직류전압 2[kV], 길이 2.5 [m]정도까지 탐지할 수 있고, 방전에 의한 케이블의 전달파와 다른 매설물의 영향을 받기 쉬운 단점이 있다. 가장 많이 사용되는 머레이 루프법은 다른 양호한 고압 케이블이 고장 케이블 근처에 있으면 이 케이블에 의한 유도전압 때문에 영점 조정이 힘들다는 단점이 있다. 이와 같이 기존의 측정방법들은 케이블의 단선 고장 및 보조도체의 유무, 고장 저항의 고저에 따라서 적용방법과 정확도가 다르게 되며 측정하고자 하는 위치에서 주변 케이블이나 설비로부터의 영향은 오차의 원인이 되어왔다.

본 논문에서는 HVDC 케이블의 고장(도체와 시스 간의 단락고장)으로 인해 발생하는 진행파와 상호상관함수(Cross Correlation Function)를 이용한 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 즉, 고장점으로부터 입사된 후진파의 입사 시간과 재입사되는 후진파의 입사 시간을 상호상관함수를 이용하여 찾고 두 시점의 시간차와 후진파의 속도를 통해 고장거리를 계산하였다. 전압형, 전류형 HVDC 및 케이블을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하고 케이블 고장을 모의 후 고장거리, 고장저항을 변화에 대해 알고리즘 성능을 검증하였다.

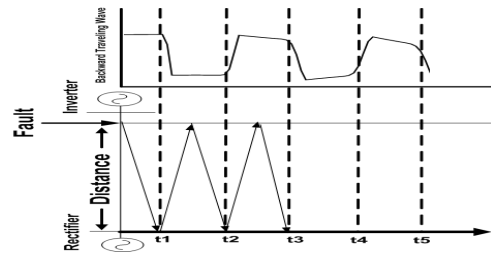
#### 2. 본 론

##### 2.1 진행파와 고장위치

선로에서 고장이 발생하면 전압, 전류의 변화된 성분으로 인하여 후진파가 발생하고, 이 후진파는 관측점 뒤의 불연속점(모선)에서 반사되어 전진파로 바뀌어 관측점을 떠나 선로를 따라 진행하다가 다시 고장점에서 반사하여 관측점으로 돌아오게 된다. 즉, 고장점까지의 거리를 계산하는 데는 관측점을 떠난 전진파가 얼마만큼의 시지연을 가지고 후진파로서 다시 관측점에 도달하는가를 측정하여 정의[2]하고 있다.

그림 1은 HVDC 송전선에 고장저항이 0[ohm]인 지락고장 발생 시 후진파의 이동 시간과 거리를 보여주고 있다. 시간 t1에서 고장으로 인해 발생한 후진파가 Rectifier에 도달하면 2차 매질의

임피던스가 특성임피던스에 비해 매우 크므로 전반사가 일어나 크기는 같고 부호는 반대인 전진파로 반사되어 간다. 이 전진파가 고장점에 도착하면 2차 매질의 임피던스인 고장저항이 0[ohm]이므로 크기와 부호가 같게 되어 반사한다. 반사된 진행파는 다시 후진파가 되어 시간 t2에 Rectifier로 도착하고 시간 t1에서와 같은 원리로 반사한다. 이렇게 후진파가 계전점으로 도착하는 순간에 전압이 크기는 같고 방향은 반대로 변하므로 고장 전압이 마치 구형파 형상을 이루게 되며 전압이 바뀌는 시점을 검출하여 시간을 측정하면 식(1)과 같이 고장 거리를 구할 수 있다. 케이블의 전파 속도는 식(2)에 의해 결정되며 일반적으로 가공선의 절반내지 7할 정도 밖에 되지 않는다. 본 논문에서 모의한 HVDC 케이블의 전파 속도는 148.026[km/ms]이며 이 전파 속도를 식 (1)에 대입하여 고장거리를 계산하였다.



〈그림 1〉 후진파의 이동 시간과 거리의 관계

$$Distance = \frac{v \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (1)$$

여기서, Distance = 고장거리, v = 진행파의 속도

$$v_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad , \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{LC \times \epsilon}} \quad (2)$$

여기서, v<sub>o</sub> = 가공지선의 전파속도      v<sub>c</sub> = 지중케이블의 전파속도  
L = 단위길이당인덕턴스      C = 단위길이당캐패시턴스  
ε = 절연물의유전율

##### 2.2 상호상관함수를 이용한 후진파 입사시점 검출

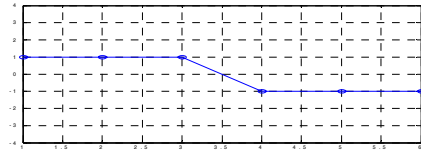
상호상관함수는 두 신호가 얼마나 상관 되었는가, 즉 두 신호의 유사성의 정도를 알 수 있다. 상호상관함수는 샘플링된 신호 X와 시지연 τ후의 나타나는 신호 Y와의 유사성의 정도를 나타낸다. 이 함수는 식(3)과 같다.[2-4]

$$\Phi_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M Y(k\Delta t + \tau) X(k\Delta t) \quad (3)$$

여기서, Δt : 샘플 간격의 시간, N: 윈도우당 샘플수

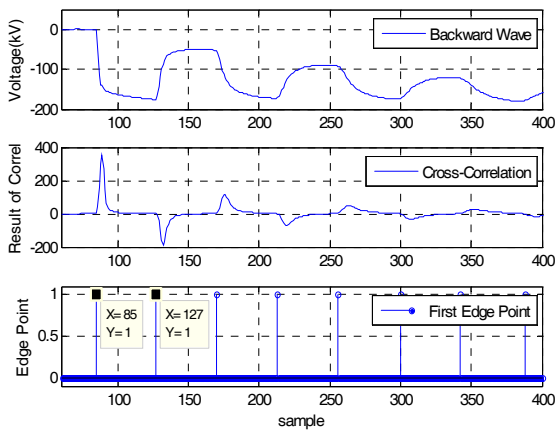
본 논문에서는 HVDC 선로 고장시 발생하는 후진파가 계전점으로 입사시 나타나는 형상과 유사한 형태의 기준함수를 정하고 후진파와 이 기준함수의 상호상관함수를 구하여 후진파의 입사시점을 찾는 방법을 제안하였다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 기준 함수를 보여준다. 기준 함수의 윈도우가 긴 경우 근거리 고장 시 발생하는 후진파의 입사 주기가 짧으므로 한 윈도우 안에 2개 이상의 입사 시점이 포함 될 수 있다. 이 경우 상호상관함수

의 최대치가 연속될 수 있으므로 정확한 시간 계산이 어렵다. 반면 윈도우가 너무 짧을 경우에는 작은 변화에 민감하게 되므로 적절한 윈도우 개수 선택이 필요하다. 이러한 특성을 고려하여 기준 함수의 윈도우 개수를 6개로 선정하고 1에서 -1로 변하는 함수를 선택하였다.



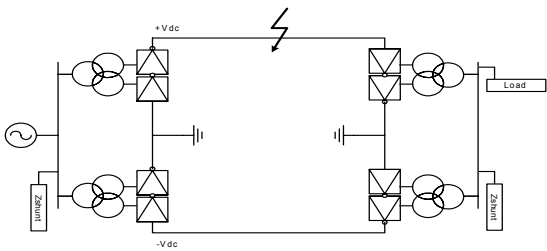
〈그림 2〉 기준 함수

상호상관함수의 결과를 통해 후진파의 입사시점을 찾는 방법은 상호상관함수의 결과에 일정 경계값을 적용하여 경계값 이상이 되는 시점을 찾는 것이다. 그림 3은 이와 같은 방법을 사용했을 경우 상호상관함수의 결과를 보여준다. 그림 3의 위에서부터 아래로 고장으로 인해 발생한 후진파, 후진파와 기준 함수의 상호상관함수 결과, 그리고 상호상관함수의 결과가 최초 경계값을 넘는 시점의 검출결과이다.

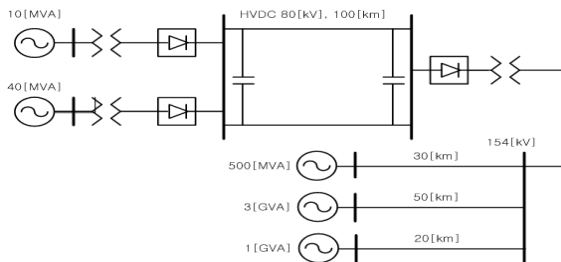


〈그림 3〉 상호상관함수를 이용한 후진파 입사시점 검출

### 2.3. 모델 계통



〈그림 4〉 전류형 HVDC 모델



〈그림 5〉 전압형 HVDC 모델

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 전압원 HVDC와 전류원 HVDC를 PSCAD/EMTDC로 모의하여 알고리즘을 검증하였다. 전류원 HVDC는 국내 실제 계통인 제주-해남 HVDC 시스템과

유사한 계통으로 이중전원 송전방식이며 정상 운전 시 전압 175[kV], 전류 800[A]로 280[MW]전력을 송전하도록 그림 4와 같이 모델링 하였고, 전압원 HVDC는 단일 전원 송전방식으로 정상 운전전압 80[kV]에 송전용량 50[MW]의 전력을 전송하도록 그림 5와 같이 모델링 하였다. 케이블은 모두 100[km]로 실제 제주-해남 간 해저케이블에 사용하고 있는 Cu 800[mm<sup>2</sup>] 케이블로 매설 깊이를 2[m], 도체의 단면적을 800[mm<sup>2</sup>]로 하고 시스(Sheath)와 아모르(Amore)를 각각 한 층씩 모델링하였다.

### 2.4 알고리즘 검증결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 HVDC 케이블 선로의 고장(도체와 시스 간 단락)을 모의하였으며 계전점에서의 62.5[kHz]의 주파수로 샘플링하여 제안한 알고리즘을 검증하였다. 식(4)를 이용하여 오차를 계산하였고, 표 1은 HVDC 방식과 고장저항, 고장거리에 따른 고장점 표정 결과 및 오차이다.

$$Error(\%) = \left| \frac{\text{계산된거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \right| \times 100 \quad (4)$$

〈표 1〉 HVDC 형태, 고장거리, 고장저항에 따른 고장점 표정결과

HVDC 형태	고장 저항	0[ohm]		10[ohm]		20[ohm]	
		고장 거리 (km)	결과 (km)	오차 (%)	결과 (km)	오차 (%)	결과 (km)
전압형 HVDC	10[km]	9.47	0.53	10.66	0.66	10.66	0.66
	30[km]	30.79	0.79	30.79	0.79	30.79	0.79
	50[km]	50.92	0.92	54.47	4.47	54.47	4.47
	70[km]	72.24	2.24	71.05	1.05	72.24	2.24
	90[km]	92.37	2.37	74.88	4.88	93.55	3.55
전류형 HVDC	5[km]	4.737	0.3	4.737	0.3	5.921	0.9
	25[km]	24.868	0.1	24.868	0.1	24.868	0.1
	50[km]	49.737	0.3	49.737	0.3	50.921	0.9
	75[km]	74.605	0.4	75.789	0.8	76.974	0.2
	95[km]	94.737	0.3	95.921	0.9	95.921	0.9

### 3. 결론

기존에 사용된 고장점 표정 방법들의 경우 고장저항의 고저에 따라 정확도가 달라졌으며 인근 케이블이나 주변 설비에 영향을 받아 정확한 고장점 표정이 어려웠다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 HVDC 케이블 고장으로 인해 발생하는 진행파 중 후진파의 도착시점과 재입사되는 시점을 상호상관함수를 이용하여 찾고 두 시점의 시간차와 진행파의 속도를 이용하여 고장거리를 계산하였다. 사례연구를 통해 제안된 알고리즘을 검증한 결과 전압원 HVDC는 오차율 5%, 전류원 HVDC의 경우 오차율 1% 이내의 정확도를 보임을 확인하였다. 따라서 제안한 알고리즘은 고장저항과 케이블 주변 환경에 영향을 받는 다른 고장점 표정 알고리즘보다 정확하게 고장점을 찾을수 있음을 확인하였다.

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었으며(차세대전력기술연구센터) 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 [2단계 BK21 사업]의 지원비를 받았다

### [참고 문헌]

- [1] Barry Clegg, "Underground Cable Fault Location", McGraw-Hill Book Company, 1993
- [2] E.H. Shehab-Eldin and P.G. McLaren, "Travelling Wave Distance Protection-Problem Areas and Solutions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp. 894, 1988
- [3] Christopoulos, C. Thomas, D.W.P. Wright, A., "Signal processing and discriminating techniques incorporated in a protective scheme based on travelling waves", IEE Proceedings Vol.136, No.5, pp. 279~288, 1989
- [4] P. K. Dutta and P. B. Dutta Gupta, "Microprocessor-Based UHS Relaying For Distance Protection Using Advanced Generation Signal Processing", IEEE Transactions on power Delivery, Vol.7, No.3, pp. 1121~1128, 1992