

웨이블렛 변환을 이용한 HVDC 케이블 고장점 표정 알고리즘

論 文

57-8-2

A Fault Location Algorithm Using Wavelet Transformation for HVDC Cables

權寧珍[†] · 姜想熙^{*}

(Young-Jin Kwon · Sang-Hee Kang)

Abstract - In this paper, a fault location algorithm using wavelet transform is proposed for HVDC cable lines. The arriving instants of the first and second fault-induced backward travelling waves can be detected by using wavelet transform. The fault distance is estimated by using the time difference between the two instants of backward travelling waves and the velocity of the travelling wave. To distinguish between the backward wave from fault point and the backward wave from the remote end, polarities of backward waves are used. The proposed algorithm is verified varying with fault distances and fault resistances in underground cables of VSC(voltage source converter) HVDC system and CSC(Current Source Converter) HVDC respectively. Performance evaluations of the proposed algorithm shows that it has good ability for a fault location of HVDC cable faults.

Key Words : HVDC, Fault location, Underground cable, Travelling wave, Wavelet transform

1. 서 론

HVDC(High Voltage Direct Current)는 송전 효율과 안정도가 우수하고, 주파수가 서로 다른 교류시스템 간에도 전력수송이 가능하다는 장점이 있으며, 특히 케이블 송전일 경우 충전전류의 영향이나 유전손이 없다는 장점이 있다. 이러한 장점들과 최근 전력변환장치 성능 및 제어기술 향상, 장거리 송전 증가 등으로 HVDC를 이용한 전력전송이 늘어나고 있는 추세이다. 국내에도 제주-해남 구간에 해저케이블을 이용한 HVDC 송전시스템을 도입하여 운용중에 있으며 최근 신재생 에너지를 사용한 분산전원 계통연계 분야에도 적용되고 있다. HVDC 시스템은 송전용량이 크고 송전선로가 장거리이므로 고장 발생시 신속한 복구를 위해 고장지점을 정확하게 찾는 것이 중요하며 특히, 해저 케이블 전송의 경우 고장지점을 찾고 복구하는 데 많은 시간이 소요됨으로 정확한 고장지점 검출은 더욱 더 중요하게 된다.

교류시스템에서 진행파를 이용하는 방법은 전압 위상각 0도 근처 고장일 때 진행파의 크기가 매우 작아 검출하기 어렵다는 문제점이 있으나 직류시스템에서는 이런 영향이 없으므로 교류시스템보다 진행파 사용이 유리하다.[1] HVDC 시스템에도 진행파를 이용한 송전선로 보호 알고리즘과 고장점 검출 알고리즘들이 제안되었는데 진행파를 검출하기 위한 방법으로 전류차분을 이용한 방법[2], 상호상관함수(Cross correlation)를 이용한 방법[3,4], 웨이블렛을 이용한

방법 등이 사용되었다.[5-9] 웨이블렛을 이용 방식 [5-7]에서는 모함수를 달리 적용하여 진행파 검출 성능을 높였고, [8]에서는 진행파 검출 레벨에 영향을 미치는 노이즈에 대응하는 방법을 제안하였으며, [9]에서는 웨이블렛 에너지 함수를 이용하는 알고리즘 등이 제안되었다. 또한 판단정보만 사용하는 방법들[5-9]의 불확실성을 줄이고 정확한 고장점 표정을 위해 GPS와 통신 시스템을 사용한 양단 데이터 이용 방법들[10,11]도 일부 제안 되었다.

지금까지 HVDC 고장점 표정에 관한 연구들은 주로 가공선로를 대상으로 하였으며 HVDC 시스템은 전류원 HVDC를 사용하는 경우가 대부분 이었다. 따라서 본 논문에서는 연구된 사례가 거의 없는 전류원 HVDC와 전압원 HVDC 시스템 지중 케이블 고장점 표정 알고리즘을 제안하고자 한다. 계전점에서 후진파의 웨이블렛 변환 결과로부터 첫 번째 후진파와 연이어 입사된 두 번째 후진파의 시간차를 측정하고 두 후진파의 부호를 이용하여 발생한 고장이 선로중간 이전 구간인지 이후 구간 인지를 구분하여 고장거리를 추정하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC로 전류원, 전압원 HVDC 케이블 고장모의 후 알고리즘을 검증한 결과 정확하고 신뢰성 있게 고장점을 추정할 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 진행파 이론

선로 정수가 L, C 뿐인 길이가 무한대인 선로의 전파방정식의 해는 식 1, 2와 같다. 식 1에서 $f_1(t-x/u)$ 는 양의 방향으로 진행되는 진행파(전진파)이고 $f_2(t+x/u)$ 는 음의 방향으로 진행되는 진행파(후진파)이다. 따라서 계전기 설치점에서 측정된 전진파 $S_f(t)$ 와 후진파 $S_B(t)$ 는 식 3, 4와 같이

* 正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

† 교신저자, 正會員 : 明知大 工大 電氣工學科 博士課程

E-mail : yjkwon@mju.ac.kr

接受日字 : 2008年 4月 17日

最終完了 : 2008年 6月 18日

나타낼 수 있다. 본 논문에서는 후진파의 웨이블릿 변환 결과를 고장점표 정알고리즘에 사용하였다.

$$V(x,t) = [f_1(t-x/u) + f_2(t+x/u)] \quad (1)$$

$$I(x,t) = \frac{1}{Z_0} [f_1(t-x/u) - f_2(t+x/u)] \quad (2)$$

여기서, u : 전파속도 ($\frac{1}{\sqrt{LC}}$), Z_0 : 특성 임피던스 ($\sqrt{L/C}$)

$$2f_1(t) = V(t) + Z_0 I(t) = S_F(t) \quad (3)$$

$$2f_2(t) = V(t) - Z_0 I(t) = S_B(t) \quad (4)$$

2.2 웨이블릿 변환

전력계통 고장으로 발생하는 진행파는 기본파와 그 고조파가 결합된 성분을 포함하는 비주기 과도특성을 나타낸다. 따라서 고정 주파수 도메인의 페이지 해석방법이나 시간영역 해석방법으로는 정확한 결과를 얻을 수 없다. 반면, 웨이블릿 변환은 스케일이 주파수에 따라 변하는 가변 윈도우 특성을 가짐으로 비주기 과도신호를 다루는데 유리하다. 연속신호 $x(t)$ 의 웨이블릿 변환은 식 5와 같이 정의된다. 입력신호 $x(t)$ 는 모함수 $g(\frac{t-b}{a})$ 에 의해 변환되며 여기서 a 와 b 는 Scaling(Dilation)과 Translation(Time Shift)에 대한 상수이고, 식 5를 이산 웨이블릿 변환 DWT(Discrete Wavelet Transform)으로 나타내면 식 6과 같다.[12]

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g(\frac{t-b}{a}) dt \quad (5)$$

$$DWT(m,k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] \cdot g(\frac{k-na_0^m}{a_0^m}) \quad (6)$$

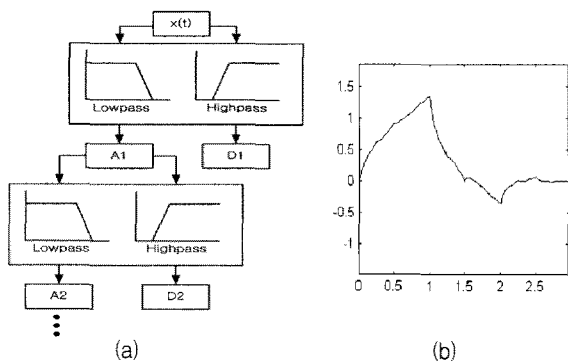


그림 1 (a) 필터뱅크와 (b) Db2 모함수
Fig. 1 Filterbank and Db2 mother wavelet

이산 웨이블릿 변환은 그림 1(a)와 같이 여러개의 고역통과(Highpass) 필터와 저역통과(Lowpass) 필터로 구성된 필터뱅크로 구현 할 수 있다.[13] 본 논문에서 그림 1(b)와 같은 Db2(Daubechies 2) 웨이블릿 모함수를 사용하였는데 Db2 모함수는 Haar 모함수를 제외하고 데이터 윈도우 길이가 가장 짧아 고장발생시 과도신호의 주파수가 높은 경우에도 잘 대응 할 수 있고, 모함수의 모양이 급격하게 변하는 형태이므로 입력신호의 변화시점 검출과 변화방향을 판별하

는데 유리하다. 따라서 본 논문에서는 후진파의 Db2 웨이블릿 변환 D1 계수 값을 이용하여 후진파의 입사시점 검출과 부호를 판별하였다.

2.3 HVDC 케이블 고장시 진행파 특성

2.3.1 고장점과 HVDC 모선의 반사계수

고장저항을 포함하는 선로 고장시 고장점 반사계수 k_{rf} 와 투과계수 k_{tf} 는 식 7과 같다. 따라서 반사계수 부호는 항상 음(Negative)이고 투과계수 부호는 항상 양(Positive)이므로 고장점에서 반사파는 부호가 바뀌고, 투과파는 부호변화가 없다.

$$k_{rf} = -\frac{Z_0}{2R_f + Z_0}, \quad k_{tf} = \frac{2R_f}{2R_f + Z_0} \quad (7)$$

여기서, Z_0 : 선로의 특성임피던스, R_f : 고장저항

$$k_{rb} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (8)$$

HVDC 모선 특성임피던스를 Z_2 , 선로 특성임피던스를 Z_1 이라 하면 모선 반사계수 k_{rb} 는 식 8과 같다. 전류원 HVDC는 일반적으로 선로 종단에 수십~수백[mH]의 리액터가 설치되는데 계전점이 리액터 앞단에 위치하게 되면 리액터를 포함한 모선 특성임피던스 Z_2 는 선로 특성임피던스 Z_1 에 비해 상대적으로 큰 값으로 모선 반사계수는 양이다. 반면 전압원 HVDC 시스템의 선로 종단에는 대용량 DC 링크 커패시터가 설치되는데, 이렇게 커패시터로 종단 된 선로는 과도시에 단락회로와 같이 동작한다.[3] 따라서 전압원 HVDC 시스템 모선 반사계수는 항상 음이 된다. 이와 같은 전압원과 전류원에 따른 모선에서의 후진파 부호조건 조건을 이용하여 측정된 후진파가 고장점에서 입사한 후진파인지 상대단 모선으로부터 반사되어 온 후진파인지를 구분하였다.

2.3.2 HVDC 시스템 케이블 고장시 진행파

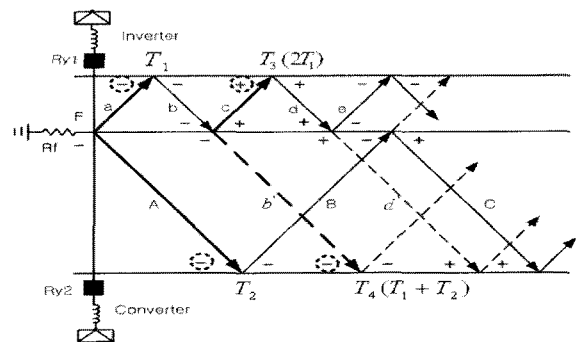


그림 2 전류원 HVDC 시스템 격자 다이어그램
Fig. 2 Lattice diagram of CSC HVDC system

그림 2는 전류원 HVDC 시스템 케이블 고장시 격자 다이어그램이다. 인버터단 계전점 Ry1에서 보면 고장은 선로종단 이전구간 고장으로 첫 번째 입사된 음의 후진파 a가 T_1 에서 부호변화 없이 반사된다. 이 후진파는 고장점에서 부

호가 바뀌어 반사되어 T_3 에서 검출됨으로 고장거리는 T_1 과 T_3 의 시간차로 구하며 이때 두 후진파의 부호는 반대이다. 한편 컨버터단 계전점 Ry2에서 바라본 고장은 선로중간 이후 구간 고장이므로 T_2 에서 검출된 후진파 A의 재입사 후진파 C가 검출되기 이전에 상대단으로부터 반사되어 온 후진파 b가 T_4 에서 먼저 검출된다. 이 경우 T_2 와 T_4 의 시간차를 이용하며, 이때 두 후진파의 부호는 음으로 같은 조건이 된다. 만약 고장저항이 없다면 고장점에서 진행파는 전반사가 일어남으로 중간이전 구간이나 중간이후 구간에 상관없이 첫 번째 후진파는 음이고 두 번째 후진파는 양으로 반대가 된다.

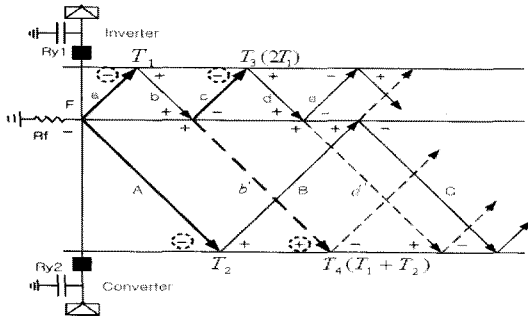


그림 3 전압원 HVDC 시스템 격자 다이어그램
Fig. 3 Lattice diagram in VSC HVDC system

그림 3은 전압원 HVDC 케이블 고장시 격자 다이어그램이다. 전류원 HVDC와 반대로 전압원 HVDC는 모선 반사 계수가 음이고 고장점의 반사계수도 음임으로 고장점과 모선에서 반사될 때마다 진행파의 부호가 바뀐다. 따라서 중간이전 구간 고장의 경우 부호가 같은 연속된 후진파 a, c의 검출시점 T_1 과 T_3 를 사용하고, 중간이후 구간고장에서는 후진파 A의 검출시점 T_2 와 상대단으로부터 진행해 온 후진파 b의 검출시점 T_4 를 사용하고 이때 두 후진파의 부호는 반대이다.

2.4 HVDC 시스템의 고장점 검출 알고리즘

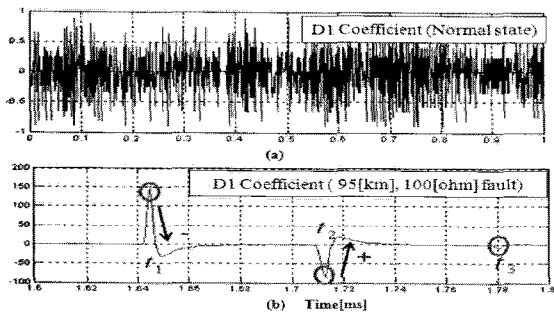


그림 4 (a) 정상상태 D1 계수값, (b) 원단 고저항 고장시 D1 계수값
Fig. 4 (a) D1 Coefficient in case of a normal state, (b) D1 Coefficient in remote end fault with a fault resistance

그림 4는 웨이블릿 변환 D1 계수값으로 (a)는 정상상태 값이고, (b)는 원단 고저항 고장시 값이다. (b)에서 원으로

표시된 시점은 절대값이 최대치 일 때고, 화살표는 0을 기준으로 계수값의 부호변화 방향이다. 본 논문에서는 D1 계수 절대값 최대치 시점을 후진파 입사시점으로 하였고, 변화방향을 후진파의 부호로 사용하였다. 즉, t_1 시점의 진행파는 음이고, t_2 시점의 진행파는 양이다. 그림 (a)에서는 D1 계수값이 ± 1 범위이고, 그림 (b)에서는 t_1, t_2 에서 절대값의 최대치가 151, -82 이다. 원단 고저항 고장시 발생하는 진행파의 크기가 가장 작는데 이 값은 정상상태 값에 비해 매우 큰 값이므로 고장점 검출 임계값은 정상상태 값 범위인 ± 1 에 여유율을 두어 ± 15 로 설정하였다.

전압원은 연속된 후진파의 부호가 같을 경우 전류원은 연속된 후진파의 부호가 다를 경우 식 9를 사용하여 고장거리를 계산하며 이 경우 고장은 고장 고장저항이 없는 전 구간의 고장이거나 고장저항이 있는 중간 이전 구간 고장이다. 반면 두 후진파의 부호가 앞의 경우와 반대 조건인 경우는 식 9를 사용하며 이 경우 고장은 고장 고장저항을 포함하는 중간 이후 구간 고장이다. 두 후진파의 부호와 고장구간, 고장저항에 따른 고장거리 계산식을 전압원과 전류원으로 구분하여 정리하면 표 1과 같고, 알고리즘 순서도는 그림 5와 같다.

$$\text{고장점 표정식 A} : \frac{v \times (T_3 - T_1)}{2} \tag{9}$$

$$\text{고장점 표정식 B} : l - \frac{v \times (T_4 - T_2)}{2} \tag{10}$$

여기서, v = 케이블 진행파 속도, l = 전체선로길이

표 1 조건에 따른 HVDC 고장점 표정식
Table 1 Fault location equation according to condition

| 구분 | 고장구간 고장저항 | 중간이전 | | 중간이후 | | |
|-----|--------------|----------|---|------|---|---|
| | | 유 | 무 | 유 | 무 | |
| 전압원 | 부호 | 첫 번째 후진파 | - | - | - | - |
| | | 두 번째 후진파 | - | - | + | - |
| | 표정식 | A | A | B | A | |
| 전류원 | 부호 | 첫 번째 후진파 | - | - | - | - |
| | | 두 번째 후진파 | + | + | - | + |
| | 표정식 | A | A | B | A | |

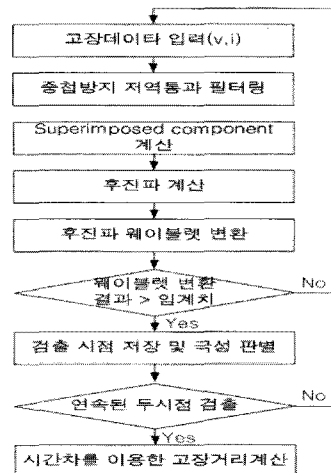


그림 5 알고리즘 순서도
Fig. 5 Flow chart of Algorithm

2.5 사례 연구

2.5.1 모델 계통

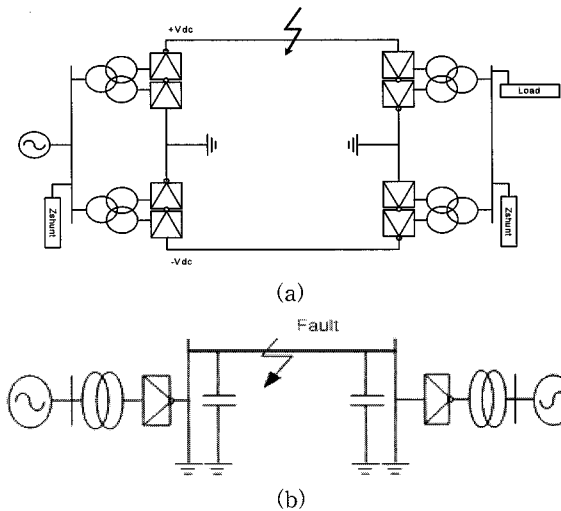


그림 6 (a) 전류원 HVDC, (b) 전압원 HVDC
Fig. 6 (a) CSC HVDC system, (b) VSC HVDC system

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 EMTDC/PSCAD를 이용하여 전류원 HVDC는 제주-해남간 시스템과 유사한 계통으로 그림 6 (a)와 같이 이중전원(bipolar), ±175[kV], 280[MW] 정격으로 모델링하였고, 전압원 HVDC는 그림 6 (b)과 같이 단일전원(monopole), 100[MW], 110[kV]으로 모델링 하였다. 샘플링 주파수는 500[kHz]하였고 한샘플 간격을 거리로 환산하면 0.1482[km]이다. 모든 고장은 고장점에서 도체, 시스, 아모르가 모두 접지되는 지락 고장으로 모의하였고 알고리즘 오차는 식 11과 같이 계산하였다.

$$Error(\%) = \left| \frac{\text{계산된거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \right| \times 100 \quad (11)$$

제주-해남간 해저케이블은 절연체로 유침지 절연방식인 MI(Mass impregnated) Cu 800[mm²] 케이블을 사용하고 어구나 선박뺏 등에 의한 손상으로부터 케이블을 보호하기 위해 제주해협 전 구간에 걸쳐 지질별로 1.3~3.0[m]로 매설하거나 소단(Berm)과 특수 콘크리트 매트릭스로 케이블을 덮어 보호하고 있다.[13] 위 조건과 유사하게 모델링하기 위하여 본 논문에서는 표 2의 케이블 정수를 사용하여 길이 100[km], 매설 깊이 2[m]로 모델링 하였다.

표 2 HVDC 케이블 정수
Table 2 HVDC cable parameters

| Contents | Outer radius[m] | Resistivity [ohm*m] | Relative permittivity |
|------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Conductor | 0.01165 | 10 ⁻⁸ | |
| Insulator1 | 0.03295 | | 4.1 |
| Sheath | 0.03595 | 10 ⁻⁸ | |
| Insulator2 | 0.04195 | | 2.3 |
| Armour | 0.0495 | 10 ⁻⁸ | |
| Insulator3 | 0.0509 | | 1.0 |

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \times 3 \times 10^5 [km/s] \quad (12)$$

해저 HVDC 케이블은 포설 특성상 중간 접속점이 없으므로 본 논문에도 시스와 아모르를 케이블 종단에서만 접지하였다. 시스와 아모르가 접지되었기 때문에 HVDC 케이블을 단심케이블과 같은 형태로 가정하고 케이블 전파속도를 계산하였다. 송전선로의 전파속도는 단위길이 당 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C)에 의해 정해지지만 단심케이블의 경우 전파속도는 식 12와 같이 절연물 유전율(ε)의 평방근에 반비례하고, 일반적으로 가공선의 절반내지 7할 정도밖에 되지 않는다. 따라서 케이블 전파속도는 식 12에 표 2의 첫 번째 절연물 유전율 4.1을 대입하여 계산된 값 148,159[km/s]를 사용하였다.

2.5.2 전압원 HVDC 고장점 표정 결과

모든 결과는 고장저항이 10[ohm]일 때를 기준으로 나타내었다. 전압원 HVDC 케이블 고장시에는 진행파 특성이 그림 7과 같이 전류신호에 계단파 형태로 나타난다. 5[km] 고장은 중간이전 구간 고장으로 그림 8에서 보는 것처럼 t1 시점의 첫 번째 후진파와 t2 시점의 두 번째 후진파 부호가 음으로 같고 고장거리 계산식 식 A가 사용되었다.

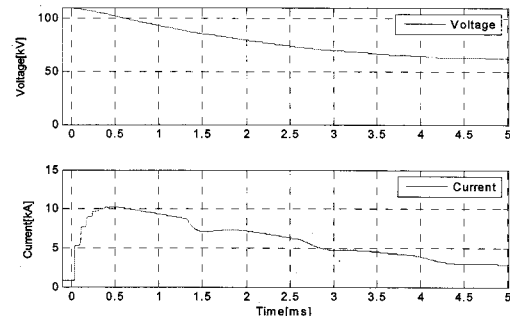


그림 7 5[km], 10[ohm] 고장시 전압, 전류
Fig. 7 Voltage, current of 5[km], 10[ohm] fault

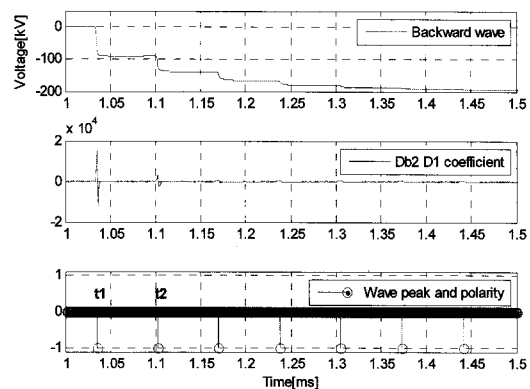


그림 8 5[km], 10[ohm] 고장시 알고리즘 결과
Fig. 8 Algorithm results of 5[km], 10[ohm] fault

그림 9, 10은 95[km] 고장시 결과이다. t2 시점에서 양의 후진파가 검출 됐는데 이것은 케이블 중간이후 구간 고장이므로 고장점(-)→상대단 반사(+)->고장점 투과(+)->계전점

입사(+) 순의 후진파가 검출된 것이고 고장 거리는 계산식 B를 이용하여 계산된다. t3, t4 시점의 후진파는 고장점과 상대단을 각각 2회, 3회 왕복한 후 계전점에 도착한 후진파로 부호가 모두 양이다.

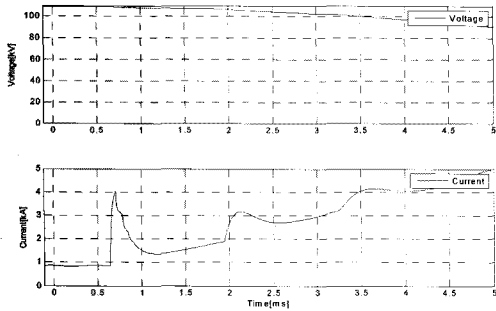


그림 9 95[km], 10[ohm] 고장시 전압, 전류
Fig. 9 Voltage, current of 95[km], 10[ohm] fault

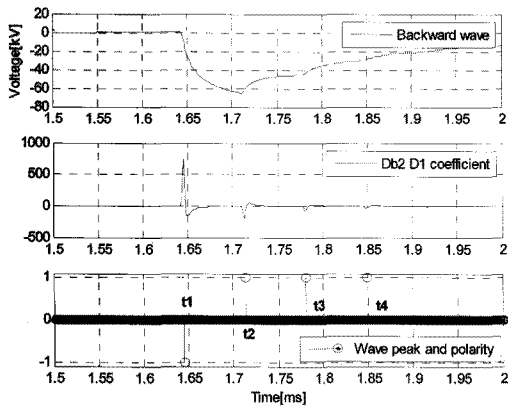


그림 10 95[km], 10[ohm] 고장시 알고리즘 결과
Fig. 10 Algorithm results of 95[km], 10[ohm] fault

2.5.3 전류원 HVDC의 고장점 표징 결과

그림 11에서 보듯이 전류원 HVDC 케이블 고장시에는 후진파 특성이 전압에 구형파 형태로 나타난다. 25[km] 고장은 중간이전 고장이므로 그림 12에서 t1 시점 첫 번째 후진파 부호는 음이고 고장점에서 반사되어 재입사된 t2 시점 후진파 부호가 양이므로 계산식 A가 사용되었다. t4 시점 후진파는 상대단에서 반사되어 온 후진파로써 고장점(-)→상대단 반사(-)→고장점 투과(-)→계전점(-) 순의 진행파이다.

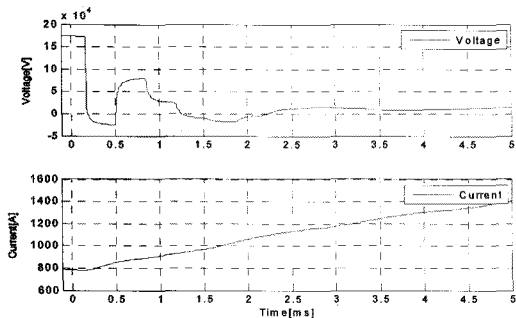


그림 11 25[km], 10[ohm] 고장시 전압, 전류
Fig. 11 Voltage, current of 25[km], 10[ohm] fault

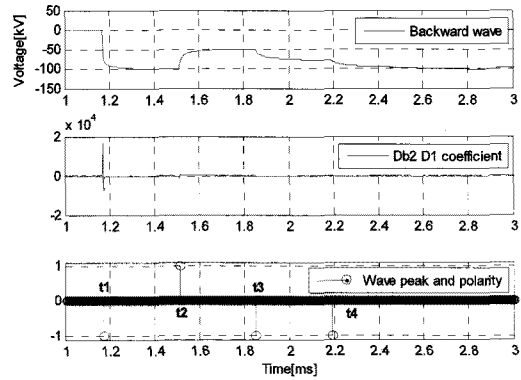


그림 12 25[km], 10[ohm] 고장시 알고리즘 결과
Fig. 12 Algorithm results of 25[km], 10[ohm] fault

그림 13, 14는 75[km] 고장시 결과로 그림 14에서 t2, t3 시점의 후진파는 상대단에서 반사되어 온 후진파들이다. 따라서 첫 후진파 검출시간 t1과 상대단 반사 후진파 검출 시간 t2를 계산식 B에 적용하여 고장거리를 계산하였다. t3 시점 후진파는 상대단과 고장점을 두 번 왕복한 후 계전점에 도착한 후진파이고, t4 시점 후진파는 고장점(-)→계전점 반사(-)→고장점 반사(+)-> 계전점 입사(+)-> 순의 후진파이다.

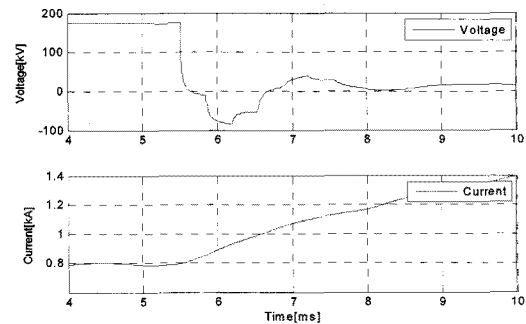


그림 13 75[km], 10[ohm] 고장시 전압, 전류
Fig. 13 Voltage, current of 75[km], 10[ohm] fault

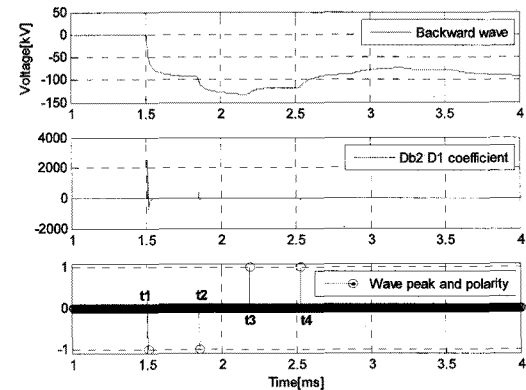


그림 14 75[km], 10[ohm] 고장시 알고리즘 결과
Fig. 14 Algorithm results of 75[km], 10[ohm] fault

그림 15와 16은 전류원 HVDC 인버터 후단 교류계통 선로 1 선지락 고장시 전압, 전류 및 알고리즘 결과이다. 전류원 HVDC 케이블 양단 리액터 때문에 외부에서 발생한 진행파가 케이블 쪽으로 투과되지 못해 알고리즘은 케이블 고장으로 인

식하지 않았으며 전압원 HVDC도 같은 조건의 외부고장에 대해서 고장으로 인식하지 않는 동일한 결과를 보였다.

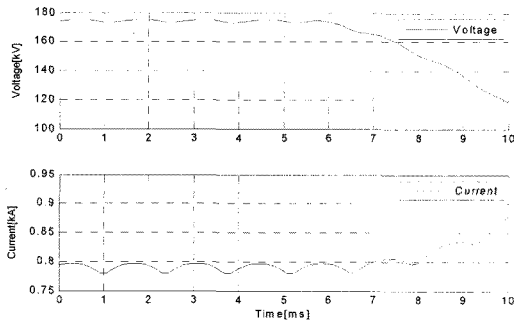


그림 15 교류계통 고장시 전압, 전류

Fig. 15 Voltage, current of a AC system fault

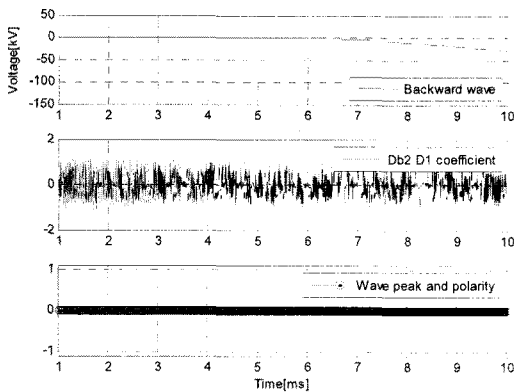


그림 16 교류계통 고장시 알고리즘 결과

Fig. 16 Algorithm results of a AC system fault

표 3 전압원 및 전류원 HVDC 알고리즘 결과

Table 3 Algorithm results of VSC & CSC HVDC

| H V D C | 고장 거리 [km] | 고장저항[ohm] | | | | | |
|------------------|------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | | 0 | | 10 | | 20 | |
| | | 거리 [km] | 오차 [%] | 거리 [km] | 오차 [%] | 거리 [km] | 오차 [%] |
| 전 압 원 | 5 | 4.89 | 0.11 | 4.89 | 0.11 | 4.89 | 0.11 |
| | 25 | 25.04 | 0.04 | 25.04 | 0.04 | 25.04 | 0.04 |
| | 50 | 50.37 | 0.37 | 50.37 | 0.37 | 50.37 | 0.37 |
| | 75 | 75.56 | 0.56 | 74.81 | 0.19 | 74.81 | 0.19 |
| | 95 | 95.86 | 0.86 | 94.96 | 0.04 | 94.96 | 0.04 |
| 전 류 원 | 5 | 5.04 | 0.04 | 5.04 | 0.04 | 5.04 | 0.04 |
| | 25 | 25.04 | 0.04 | 25.04 | 0.04 | 25.19 | 0.19 |
| | 50 | 50.22 | 0.22 | 50.22 | 0.22 | 49.77 | 0.23 |
| | 75 | 75.56 | 0.56 | 74.81 | 0.19 | 74.81 | 0.19 |
| | 95 | 95.86 | 0.86 | 94.96 | 0.04 | 94.96 | 0.04 |

표 3은 고장거리와 고장저항 변화에 따른 표정거리와 오차이며 회색으로 표시된 부분은 고장거리 계산식 B가 사용된 경우이다. 고장저항이 없는 완전지락 고장의 경우 케이블 중간이후 구간 75, 95[km] 고장시에는 상대단에서 반사되어 온 진행파가 없으므로 고장거리 계산식 A가 사용되었다. 이 경우 고장저항이 있는 경우보다 오차가 큰 것은 두 번째 제1사 후진파가 원거리의 고장점과 계진점을 왕복하

면서 파두의 감쇄가 일어나 후진파 입사시점 검출에 오차를 유발했기 때문이다. 제안한 알고리즘은 두 HVDC 시스템에서 최대 0.86[%] 이내의 오차로 고장거리를 표정할 수 있음을 보였다.

표 4 고저항 지락 고장시 알고리즘 결과

Table 4 Algorithm results of cases having high fault resistances

| 고장 거리 [km] | 고장저항 | | | |
|------------------|---------|-------|----------|-------|
| | 50[ohm] | | 100[ohm] | |
| | 거리[km] | 오차[%] | 거리[km] | 오차[%] |
| 5 | 4.89 | 0.11 | 5.04 | 0.04 |
| 25 | 25.04 | 0.04 | 24.59 | 0.41 |
| 50 | 49.63 | 0.07 | 49.63 | 0.37 |
| 75 | 74.81 | 0.19 | 74.81 | 0.19 |
| 95 | 94.96 | 0.04 | 94.96 | 0.04 |

표 5 전압원 HVDC 1[MHz] 샘플링의 알고리즘 결과

Table 5 Algorithm results of VSC HVDC with 1[MHz] sampling rate

| 고장 거리 [km] | 고장저항 | | | | | |
|------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | 0[ohm] | | 10[ohm] | | 20[ohm] | |
| | 거리 [km] | 오차 [%] | 거리 [km] | 오차 [%] | 거리 [km] | 오차 [%] |
| 5 | 4.96 | 0.04 | 4.96 | 0.04 | 4.96 | 0.04 |
| 25 | 25.11 | 0.11 | 25.11 | 0.11 | 25.11 | 0.11 |
| 50 | 50.23 | 0.23 | 50.23 | 0.23 | 49.77 | 0.23 |
| 75 | 75.56 | 0.56 | 74.89 | 0.11 | 74.89 | 0.11 |
| 95 | 95.71 | 0.71 | 94.96 | 0.04 | 94.96 | 0.04 |

표 4는 고장저항이 50, 100[ohm]로 비교적 큰 경우의 결과로 최대 0.41[%] 오차로 고장거리가 정확하게 표정됨을 보였다. 표 5는 샘플링 주파수를 1[MHz]로 높였을 때 알고리즘 결과이다. 회색으로 표시한 부분이 500[kHz] 샘플링 데이터를 사용했을 때 결과보다 오차가 같거나 줄어든 경우이다. 25[km] 고장은 500[kHz]로 샘플링한 데이터를 사용했을 때보다 오차가 증가하였는데 이것은 샘플링 주파수를 높였으나 웨이블릿 변환 결과의 최대치 검출시점은 변하였음을 의미한다. 샘플링 주파수를 높였을 때 모든 경우에 대하여 오차가 작아지지 않았지만 전반적으로 오차가 감소하여 더욱 정확하게 고장 거리를 표정할 수 있음을 보였다.

3. 결 론

본 논문은 후진파의 웨이블릿 변환을 이용한 전류원, 전압원 HVDC 시스템 케이블 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 연속된 후진파 입사시점의 시간차를 측정하고, 후진파의 부호, 고장 구간, 고장저항에 따른 고장거리 계산식을 적용하여 고장점을 표정하였다. 제안한 알고리즘은 고장거리와 고장저항 변화에 대해 최대오차 0.86[%] 이내의 정확도를 보였고 고저항 지락고장에 대하여도 대응할 수 있음을 보였다. 따라서 본 논문은 HVDC 케이블 고장시 정확한 고장점을 찾고 신속한 고장 복구를 가능하게 하여 HVDC 시

스텝 운전 신뢰성 및 안정성을 향상 시키는데 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업(차세대전력기술연구센터) 및 2단계 BK21 사업 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] E.H. Shehab-Eldin, and P. G. McLaren, "Travelling Wave Distance Protection-Problem Areas and Solutions", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp. 894, 1988.

[2] Ando, M., Schweitzer, E.O., Baker R.A., Development and Field-Data Evaluation of Ingle-End Fault ocator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines-Part 2 : Algorithm and Evaluation", IEEE Transaction. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, Issue 12, pp.3531 - 3537, Dec. 1985.

[3] Naidoo, D., Ijumba, N. M., "A protection system for long HVDC transmission lines", Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE, July 11-15, pp.150 - 155

[4] Dong-Gyu Lee, Sang-Hee Kang, Ki-Chan Ryu, Soon-Ryul Nam, "A Fault Location Method for HVDC Cable Lines Based on the Fault-generated Traveling Waves", International Conference on Electrical Engineering, Hongkong, 8-12 July, 2007

[5] Rajesh, K., Yadaiah, N., "Fault Identification Using Wavelet Transform" T&D Conference and Exhibition Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, pp.1 - 6

[6] Shang, L., Herold, G., Jaeger, J., Krebs, R., Kumar, A., "High-speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique", Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, Vol. 3, pp.10-13

[7] Xiaolei Liu, Osman, A.H., Malik, O.P., "Stationary Wavelet Transform Based HVDC Line Protection", Power Symposium 2007. NAPS '07. 39th North American, pp.37 - 42

[8] Xiaolei Liu, Osman A.H., Malik, O.P., "Stationary Wavelet Transform Based HVDC Line Protection", Power Symposium 2007 NAPS '07 39th North American, Sept, 2007, pp. 37 - 42

[9] Wang Gang and Wu Min and Li Haifeng and Hong Chao, "Transient Based Protection for HVDC Lines Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition" T&D Conference and Exhibition Asia and Pacific, 2005, pp.1 - 4

[10] Dewe, M.B., Sankar, S., Arrillaga, J., "The application of satellite time references to HVDC fault location", IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 8, Issue 3, pp.1295-1302, July 1993.

[11] Ping Chen, Bingyin Xu, Jing Li, "A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines", Power System Technology 2006. PowerCon 2006. International Conference, pp.1-4, Oct. 2006.

[12] Vetterli, M., Herley, C.m "Wavelets and filter banks: theory and design", Signal Processing, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 40, Issue 9, pp.2207 - 2232, Sept. 1992.

[13] 한국전력공사, "제주-해남 HVDC #2 건설사업의타당성 검토", 한국전력공사, 2004

저 자 소 개



권영진 (權寧珍)

1974년 10월 16일생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 졸업 (석사). 2002년~현재 동 대학원 박사과정.
Tel : 031-336-3280
Fax : 031-330-6816
E-mail : yjkwon@mju.ac.kr



강상희 (朴文壽)

1962년 8월 15일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 명지대 공대 전기공학과 정교수. 차세대전력기술 연구센터연구원.
Tel : 031-336-6364
Fax : 031-330-6816
E-mail : shkang@mju.ac.kr