

# 웨이브렛 변환을 이용한 철도 고압배전선로의 고장검출기법

## Fault Detection Technique in Railway High Voltage Distribution Lines using Wavelet Transform

정호성\*      한문섭\*      이장무\*      김주락\*\*      이한민\*\*  
Jung Ho-Sung   Han Moon-Seob   Lee Chang-Mu   Kim Joorak   Lee Han-Min

---

### ABSTRACT

This paper proposes technique to detect ground fault in railway high voltage distribution lines. Overcurrent relay technique is widely used for detecting one line ground fault that occurs most frequently in railway high voltage distribution lines. However, ground fault in distribution line is usually high impedance fault with arc. Because the fault current magnitude measured in substation is very small, the conventional overcurrent relay can't detect the high impedance ground fault.

Therefore this paper proposes the advanced technique using wavelet transform. It extracts D1 component from fault signals and detects fault comparing magnitude of D1 component in each phase.

To evaluate this proposed technique, we model distribution system using PSCAD/EMTDC and extract various fault data. In conclusion this technique can detect ground fault including high impedance fault regardless of fault distance, fault impedance etc.

---

### 1. 서론

철도에서의 고압배전선로는 역사조명 및 동력설비 그리고 열차의 안전운행을 위한 신호보안설비의 전력을 공급해 주는 설비로 열차의 안전운행 및 철도 이용자의 서비스 향상을 위한 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 각종 전력기기의 전자화, 자동화로 인해 양질의 전력공급이 요구되며 철도 이용자에 대한 보다 향상된 서비스를 제공하기 역사내 전기에너지의 사용이 급증하고 있어 이에 대한 전력공급의 신뢰성 확보가 매우 중요하다.

이러한 철도 고압배전선로에서 가장 빈번히 발생하고 있는 1선 지락고장을 검출하기 위해 과전류 계전기법이 널리 이용하고 있다. 하지만 배전선로에서 발생하는 지락고장은 대부분 아크를 동반한 고저항 지락고장으로 변전소에서 계측되는 고장전류의 크기가 작아 과전류 계전기법으로는 고장검출에 어려움이 있다. 이러한 고저항 지락고장을 검출하지 못하는 경우에는 아크로 인한 화재 발생 등으로 인해 전력설비의 파손 및 인명 피해를 야기할 수 있다[1].

---

\* 한국철도기술연구원 전기·신호연구본부 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 전기·신호연구본부 주임연구원, 정회원

따라서 본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 다양한 형태의 고조파가 함유된 과도신호로부터 고장을 검출하는 기법을 제시하였다. 웨이브렛 변환은 분석하고자 하는 주파수 영역에 따라 각기 다른 크기의 시구간 윈도우를 적용할 수 있어 국부적인 분석을 통한 특징추출에 매우 효과적이다. 제안한 기법을 평가하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 철도 고압배전계통을 모의하고 다양한 고장데이터를 추출하였다. 추출된 고장데이터를 적용하여 제안한 고장검출기법과 기존의 과전류 계전기법과의 고장검출 성능을 비교하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 웨이브렛 변환을 이용한 특징추출

웨이브렛 변환은 푸리에 변환과 달리 분석하고자 하는 주파수 영역에 따라 스케일(scale)과 쉬프트(shift) 기법을 이용하여 고주파수 영역에 대해서는 짧은 윈도우 크기로 저주파수 영역에 대해서는 긴 윈도우 크기로 과도신호를 분석함으로써 시간영역에서 다양한 주파수 정보를 추출할 수 있다. 따라서 식 (1)과 같이 이산 웨이브렛 변환을 이용함으로써 고조파가 함유된 과도신호의 분석에 효과적이다[2].

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum S[n] \cdot \Psi\left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right] \quad (1)$$

여기서,  $a_0^m$ 는 스케일에 대한 변수이며, 쉬프트를 나타내는 변수는  $na_0^m$ 이며, 그리고  $1/\sqrt{a_0^m}$ 는 모함수와 같은 크기를 유지하기 위한 에너지 정규화 성분이다.

웨이브렛 변환을 이용하여 과도현상을 분석하는데 있어서는 중요한 요소로는 모함수(mother wavelet)의 선택과 다중분해의 단계수를 결정하는 것이다. 웨이브렛 모함수는 Harr, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets 등이 있으며, 그 종류에 따라서 형태와 특성이 다르므로 다양한 고장신호로부터 특징추출과 고조파성분 제거 능력을 비교하여 최적의 모함수를 선택해야 한다. 또한 분해 단계수는 원신호의 샘플링 주파수에 따라 영향을 받게 되는데 그림 1은 샘플링 주파수에 따라 웨이브렛 변환으로 추출된 성분과 각 성분의 주파수 대역을 나타낸 것이다.

샘플링 주파수가  $f_s$ 인 경우에 첫 번째 분해를 통해서 추출된 D1성분의 주파수 대역은  $f_s/2 \sim f_s/4$ [Hz]이며, A1성분은  $f_s/4 \sim 0$ [Hz]이 된다. 두 번째 분해 단계에서 A1성분을 분해하여 추출한 D2성분은  $f_s/4 \sim f_s/8$ [Hz]대역의 신호가 되며, A2성분은  $f_s/8 \sim 0$ [Hz]대역의 신호가 된다. 이와 같이 반복적인 분해를 통해 원하는 성분의 신호를 추출할 수 있기 때문에 샘플링 주파수와 원하는 신호의 주파수 성분의 크기를 비교하여 분해 단계수를 결정하여야 한다.

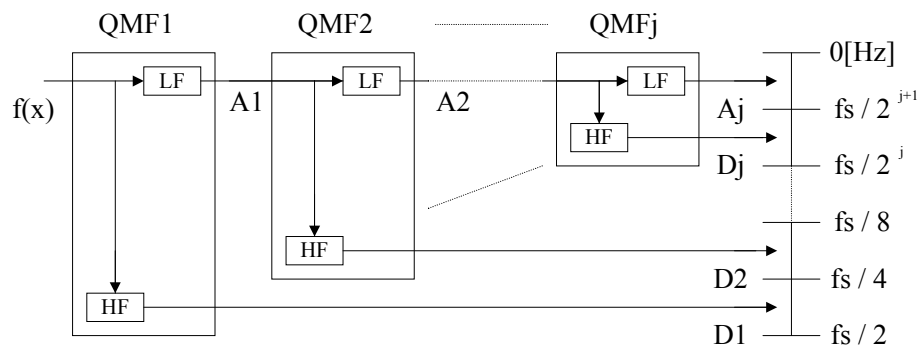


그림 1. 웨이브렛 변환의 주파수 대역

본 논문에서는 다양한 고장검출 능력을 비교 평가해 본 결과, 모함수는 이산 웨이브렛 분석이 가능한 Daubechies중에서 절점을 5개 가진 db5로 선정하였다. 그리고 샘플링 주파수는 3840[Hz](64샘플/주기)로 선정하였으며, 3단계 분해를 통해 저주파수 영역인 D1, D2, D3성분과 고주파수 영역인 A3성분을 추출하였다. 그림 2는 철도 고압배전계통에 발생한 1선 지락고장의 한 예로, 웨이브렛 변환을 통해 얻는 각 성분과 성분의 주파수 영역을 나타냈었다[3].

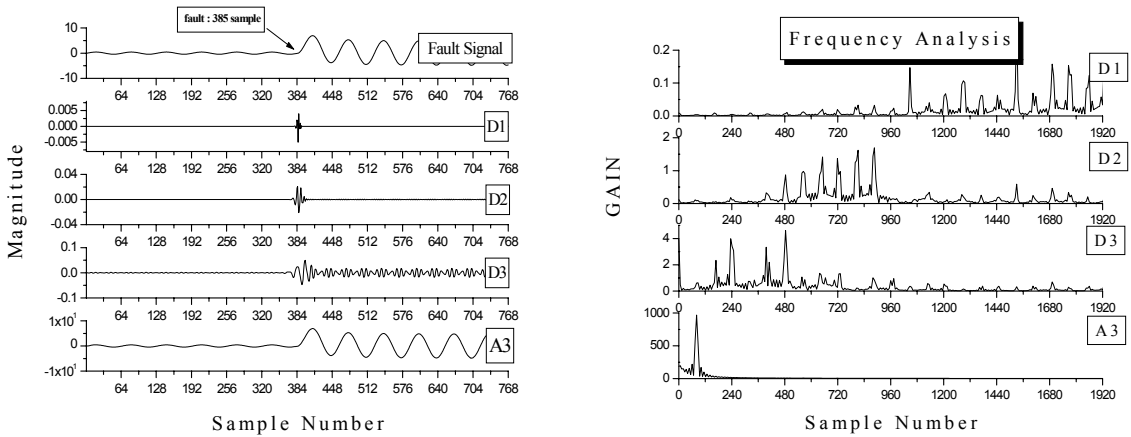


그림 2. 3단계 웨이브렛 변환과 주파수 분석

고주파 성분인 D1성분은 고장발생 시점에서 크게 반응하였으며, 저주파 성분인 A3성분은 고장 신호에서 고조파 성분이 제거되었음을 알 수 있다. 또한 가장 고주파수 성분인 D1성분은 1920 ~ 960[Hz]대역의 신호로, D2성분은 960 ~ 480[Hz], D3성분은 480 ~ 240[Hz], 그리고 가장 저주파수 영역인 A3성분은 240[Hz] ~ 직류분 신호로 분해됨을 알 수 있다.

## 2.2 고장검출 기법

철도 고압배전선로에서 가장 빈번하게 발생하는 고장은 1선 지락고장이다. 직접접지 배전계통에서의 지락고장의 경우에는 과전류 계전기법을 이용하여 고장을 검출하고 있다. 하지만 철도 고압 배전선로에서 발생하는 지락고장은 아크를 동반한 고저항 지락고장이 대부분이다. 이러한 고저항 지락고장은 고장전류의 크기가 작아 변전소에서 고장검출이 어려워진다. 또한 아크를 동반하기 때문에 전력설비에 고장이 진전될 뿐만 아니라 화재 발생 등으로 인한 인명, 재산 피해를 초래할 수 있다. 따라서 고장전류의 크기뿐만 아니라 웨이브렛 변환을 통해 추출한 성분을 이용하여 고장을 검출하도록 하였다.

변전소에서 계측되는 각 상의 전류가 일정 이상으로 증가하게 되면 웨이브렛 변환을 통해 추출한 고주파 성분인 D1성분의 크기를 비교한다. D1성분은 고장신호에 대해 반응을 가장 민감하므로 보다 신속한 고장검출이 가능해진다. 식 (2)와 같이 한 주기 D1성분의 절대값의 합이 설정값을 초과하게 되면 Transient 상태로 판별한다. 여기서 설정값인  $\alpha_t$ 는 0.01로 선정하였다.

$$\sum^{1 \text{ cycle}} |D1| > \alpha_t \Rightarrow \text{Transient} \quad (2)$$

Transient 상태가 되면 식 (3)과 같이 각 상의 D1성분의 크기를 비교하여 한 상의 크기가 다른 두 상의 크기보다 크게 되면 Fault상태로 판별하도록 하였다. 여기서 설정값인  $\alpha_f$ 는 5로 선정하

였다. 단, 일시적인 부하변동이나 개폐스위치의 동작 등으로 인한 오동작을 최소화하기 위하여 설정값보다 높은 진 후 1/8주기(8샘플)가 유지되면 최종적으로 고장으로 판별하였다. 8샘플 이내에 설정값 이하로 값이 내려가는 경우에는 count를 리셋한다.

$$\left[ \frac{\sum_{1\text{ cycle}} |D1_R|}{\sum_{1\text{ cycle}} |D1_S|} > \alpha_f \right] \text{ AND } \left[ \frac{\sum_{1\text{ cycle}} |D1_R|}{\sum_{1\text{ cycle}} |D1_T|} > \alpha_f \right] \Rightarrow \text{Fault} \quad (3)$$

그림 3은 고장검출을 위한 순서도이다. 고장전류의 크기와 웨이블릿 변환을 통해 추출한 각 상의 D1성분의 크기를 비교함으로써 고장을 검출할 수 있다.

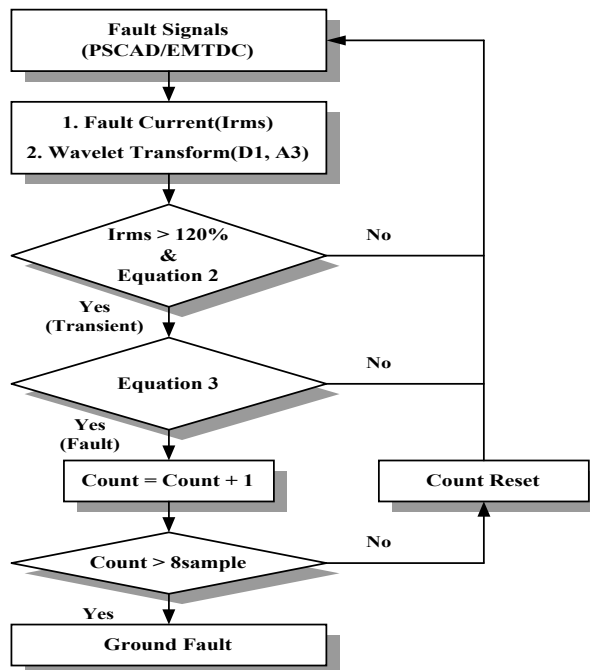


그림 3. 고장검출 알고리즘 순서도

### 2.3 모델계통

철도 고압배전선로에서의 지락고장을 시뮬레이션 하기 위해서 철도청에서 운영중인 수도권의 고압배전선로를 그림 4와 같이 표준화하였으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하였다[4].

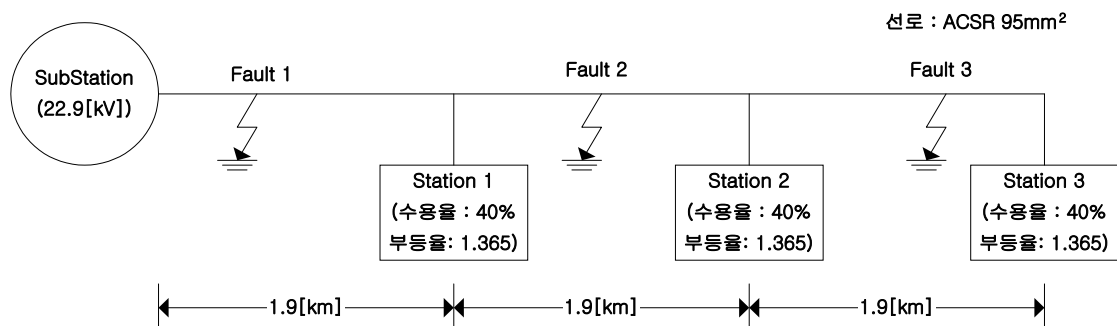


그림 4. 모델 계통

모델 계통은 22.9[kV] 직접접지 배전계통으로 하나의 변전소에서 1.9[km]간격인 3개의 역사에 전력을 공급하고 있으며, 각 역사는 수용율 40[%], 부등을 1.365로 적용하였다. 또한 고장은 변전소 부근과 선로 중간부분, 그리고 선로 말단부근에서 발생하도록 하였으며 각각의 고장발생시 고장저항, 고장발생각 등을 변화시키면서 데이터를 추출하였다.

## 2.4. 고장검출 결과

### 2.4.1 고장에 따른 D1 성분의 크기 변화

그림 5는 Fault 2 지점에서 고장저항이 50[Ω]인 A상 고저항 지락고장이 발생한 경우로 고장검출을 위해서 제시한 식(3)에서 같이 고장 발생시의 각 상의 D1성분의 크기를 비교한 것으로 A상에서 D1성분의 합이 B, C상에서 발생한 D1성분보다 10배 정도로 크게 나타나 A상 1선 지락고장임을 판별할 수 있다.

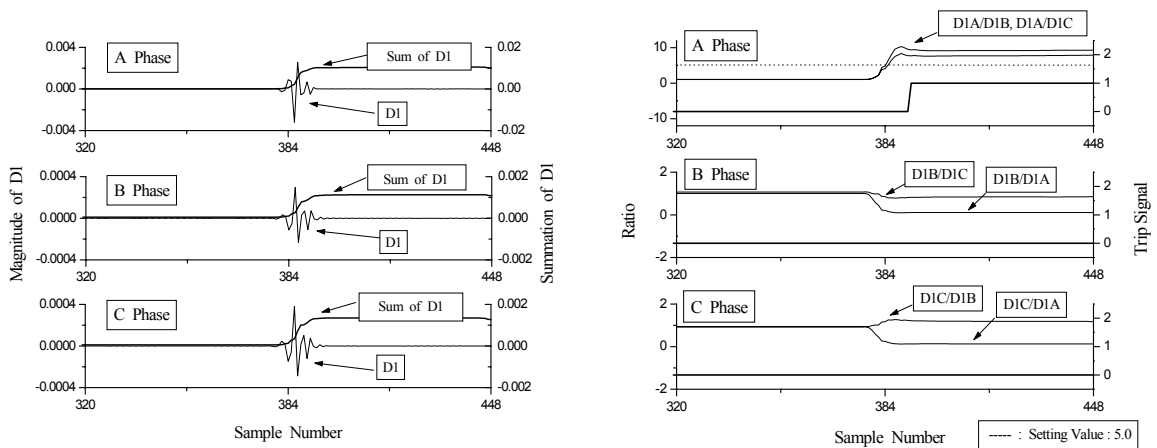


그림 5. 각 상에서의 D1성분의 비교

### 2.4.2 고장조건 변화에 따른 고장검출

그림 4에서 제시된 Fault1, Fault2, 그리고 Fault3에서 고장이 발생한 경우에 고장전류의 크기 (Irms)와 A상과 B, C상의 D1 성분의 비, 그리고 제안한 기법과 기존의 과전류 계전방식에서의 고장 발생 후 고장검출 속도를 비교하였다. 고저항 지락고장에 대한 고장검출 능력을 비교하기 위해 고장저항은 0, 30, 50, 100[Ω]으로 하였으며, 과전류 계전방식에서는 부하전류(311.2[A])의 200% 이상의 전류가 감지되는 경우에 동작하도록 하였다.

i) Fault 1 : 변전소와 첫 번째 역 사이에 발생한 고장(변전소에서 0.3[km]에서 고장 발생)

고장저항[Ω]	고장전류(Irms) [A]	Da/Db [ratio]	Da/Dc [ratio]	제안 기법 [sample]	과전류계전방식 [sample]
0	8728.6	44.66	131.13	21	26
30	732.4	114.1453	326.3520	29	61
50	564.7	158.9244	146.1466	33	부동작
100	437.9	271.3371	58.0217	41	부동작

ii) Fault 2 : 첫 번째 역과 두 번째 역 사이에 발생한 고장(변전소에서 2.55[km]에서 고장 발생)

고장저항[Ω]	고장전류(Irms) [A]	Da/Db [ratio]	Da/Dc [ratio]	제안 기법 [sample]	과전류계전방식 [sample]
0	3235.3	10.9197	8.8429	25	29
30	696.8	11.8091	9.9074	29	65
50	548.4	11.9178	10.2670	33	부동작
100	431.8	11.9036	10.7144	41	부동작

iii) Fault 3 : 두 번째 역과 세 번째 역 사이에 발생한 고장(변전소에서 4.8[km]에서 고장 발생)

고장저항[Ω]	고장전류(Irms) [A]	Da/Db [ratio]	Da/Dc [ratio]	제안 기법 [sample]	과전류계전방식 [sample]
0	2185.8	9.9397	8.0278	25	29
30	674.2	10.5825	8.8175	29	65
50	538.4	11.3703	9.6978	33	부동작
100	428.1	13.5030	11.7237	45	부동작

위의 결과에서 알 수 있듯이 고장저항이 작은 지락고장에서는 기존의 과전류 계전방식에서도 지락고장을 정확하게 검출할 수 있었다. 하지만 고장저항의 크기가 50[Ω] 이상이 되는 경우에는 고장전류의 크기가 부하전류의 200% 이내에 수렴함으로 인해 고장을 검출할 수 없었다. 이에 반해 제안한 기법에서는 고장저항의 크기와 상관없이 고속으로 지락고장을 검출함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 철도 고압배전선로에서 발생하는 지락고장을 검출하기 위한 기법을 제시하였다. 기존의 과전류 계전방식으로는 배전선로에서 발생하는 고저항 지락고장에 대해 고장을 검출하지 못하는 경우가 발생하였다. 하지만 본 논문에서 제안한 웨이블릿 변환을 통해 추출한 D1성분을 이용한 기법에서는 고장거리, 고장저항의 크기에 영향받지 않고 보다 신뢰성 있는 고장검출이 가능하였다. 또한 웨이블릿 변환을 통해 추출된 저주파인 A3성분은 고장신호의 고조파 성분이 제거되어 추후 별도의 필터를 이용하지 않고도 고장점 표정기법에 적용할 수 있다고 판단된다.

향후에는 비접지 계통이나 저항접지 계통에서의 고장검출 기법에 대한 적용 가능성을 검토해야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1 交流電氣鐵道における保護技術調査専門委員會(1996년), “交流電氣鐵道における保護技術”, 日本電氣學會
2. V.M.Reddy, S.S.Rad, F.J.Mercede(1998년), “On The Use of Wavelets for the Detection and Analysis of Power System Transients”, IEEE, pp.1293~1299
3. 정호성, 최상열, 신명철(2002년), “최소자승법을 이용한 적응형 데이터 윈도우의 거리계전 알고리즘”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 8, pp. 371-378
4. 한국철도기술연구원(2003년), “전철·전력계통 시설물 성능향상 기술개발”, 철도청