

## 154kV 지중송전케이블에서 Wavelet을 이용한 Fault Location에 관한 연구

이준성\* 이종범      문성철  
원광대학교          태광이엔씨

### A Study on Fault Location Using Wavelet in 154kV Transmission Power Cable

Jun-Sung Lee\* Jong-Beom Lee      Sung-Chall Moon  
Wonkwang Univ.                      Taikwang E&C

**Abstract** - This paper describes a fault location technique using wavelets in underground transmission cable system.

Estimation of fault location is performed using data sampled at two ends of underground system. In the case of 50% fault of total underground transmission line, fault location is calculated using sampled single-end data in underground transmission line. Traveling wave is utilized in capturing the travel time of the transients along the monitored lines between the relay and the fault point. This travel time information is provided by the wavelet.

Simulation was performed using EMTP, ATP Draw and MATLAB. The results of fault location shown in this paper will be evaluated as an effective suggestion for fault location in real underground transmission line.

#### 1. 서 론

최근 산업경제 및 국민생활의 급격한 성장으로 전력수요는 해마다 증가하고 있으며 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아짐에 따라 도심지의 가공송전선로가 갖고 있는 한계성을 극복하기 위해 지중송전 선로의 건설은 해마다 증대되고 있다. 따라서 전국의 주요 대도시는 지중송전 선로가 포설되어 운전되고 있으며 이러한 현상은 계속 증대되리라 전망된다[1].

그러나, 지중선로가 지니는 잇점에 반하여, 가공선로에 비해 건설비가 고가이므로 초기투자비용이 막대한 점, 시공의 어려움 및 사고 발생시 고장지점의 발견이나 복구의 어려움 때문에 고장지속 시간이 장기화되는 단점을 지니고 있다. 따라서 이러한 관심 가운데 고장에 대해 신속한 복구를 하기 위해 고장점 추정(Fault Location)에 관한 연구는 오랫동안 수행되어왔다[2][6].

한편 국내외에서 발표된 지중송전선로에서 고장점 추정 방법들은 Terminal method와 Tracer method를 이용하였는데, Terminal method는 케이블 단자에서 전기량 측정을 이용한 방법으로 Murray loop, Rader/Low와 고전압 펄스법 등을 사용하였고, Tracer method는 Magnetic Pickup, Sheath Pickup등의 가청장비나 전자기 신호등을 이용하여 대략적으로 고장위치를 판별하는 방법으로 대부분 고전적 방법에 의한 것이다[3].

그러나 현재의 전력케이블에서의 고장점 추정은 지중송전선로의 복잡화에 따른 선로충전용량 때문에 영상 임피던스가 변화하고 Capacitance가 계통 전압, 충전전하 및 다른 요소에 의해 변화하기 때문에 기존의 방법으로는 고장점 추정을 하기에는 매우 곤란한 상황이다. 더욱이 예상치 못한 전압으로부터의 전력공급과 같은 현상이 발생하게 되면 선로저항은 매우 작기 때문에 고장점 추정에 대해 상당한 오차를 유발시킨다[4][5]. 그러므로 기존의 방법보다 신속한 고장복구를 위한 새로운 접근형태의 연구가 필요한 실정에 있다.

따라서, 본 논문에서는 지중송전선로의 고장점 추정을 위해 현재 가장 활발한 연구가 진행중인 웨이블릿 변환을 이용하여 고장 상황에 따라 고장전압과 전류의 진행파가 지중송전선로 양단에 설치된 계전기의 위치에서 측정되는 시간과 고장점 도달에 대한 시간분석으로 고장점 추정을 실시하였다. 그리고 선로의 중심부에서 발생한 고장에 대해서는 편단에서 얻은 정보로 고장점 추정을 하는 방법과 동기화 되어 샘플링된 신호의 시간차에 의해 좀더 정확하게 선로중심부에서 발생한 고장에 관해서도 문제점을 해결하였다. 또한 기존의 문제점이었던 현장의 고장형태를 EMTP 및 ATP Draw로 상세히 시뮬레이션 하였다.

#### 2. 웨이블릿을 이용한 고장점 추정 방법

본 논문에서 사용한 고장점 추정방법은 진행파 이론에 기반을 두고 한쪽단 정보를 이용하는 방법과 양쪽단 정보를 이용하는 방법을 혼합하여 사용하고 웨이블릿 변환으로 신호를 분석하여 고장점으로부터 검출점까지의 시간을 계산함으로써 실제통에서 보다 정확한 고장점 추정을 할 수 있도록 하였다.

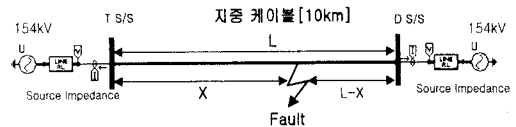


그림 1. 고장점 추정을 위한 모델계통

그림 1에서 모선 A와 B사이에서 연결된 송전선로의 길이를 L, 여기서의 특성 임피던스를  $Z_L$ , 진행파의 속도를 C라고 할 때 지락고장이 모선 A로부터 X점에서 발생하였다고 하면, 과도 파형의 전파가 고장점과 양단에 위치한 계전기의 검출점 사이에서, 최초 고장전의 정상상태에 도달할 때까지 계속 되어 진다. 고장발생시에 양단으로 진행하며 나타나는 과도진행파 신호는 선로양단에서 같은 시간에 동시에 측정 및 기록될 수 있도록 한다. 이렇게 기록되어지는 전압과 전류성분의 진행파는 웨이블릿 변환을 이용하여 분석되고 변화되어진다.

각각의 모선 A와 B에서 기록되어진 고장점에서 발생하는 과도 진행파 정보를 웨이블릿 변환으로 분석하여 얻어진 과도진행파의 최초 피크치 시간을 각각  $T_A$ 와  $T_B$ 라고 하면 선로의 양단에서 고장점 추정을 위한 지연시간을 결정할 수 있으며, 모선 A로부터 고장점사이의 거리 X는 아래의 식 (1)과 같이 주어진다.

$$x = \frac{L - C \cdot (T_B - T_A)}{2} \quad (1)$$

여기서, L은 선로길이, x는 모선 A로부터 고장점까지의 거리, C는 진행파의 속도를 나타낸다.

그러나 선로의 중심부에서 지락고장이 일어나는 경우에 대해서는 선로의 양단에서 고장점 위치검출을 위한 지연시간인  $T_B - T_A$ 가 0에 가깝게 되어 위치검출이 불가능하게 되는 경우가 발생한다. 따라서 식 (1)을 사용하여 고장점 추정을 할 수 없는 경우인 모선 A에서부터 선로길이가 45%~65%에 이르는 선로의 중심부  $T_B - T_A$ 가 0.1~0까지이므로 이러한 경우에는 모선 A와 B중 어느 한쪽단에서 측정된 정보만을 가지고 아래의 식을 이용하여 고장점의 위치를 결정한다.

$$x = \frac{C \cdot t}{2} \quad (2)$$

여기서, C: 진행파의 속도

t: 위치검출을 위한 지연시간

편단 정보를 사용할 경우의 t는 식 (3)과 같이 계산된다

$$t = 2\tau - t_x \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ : 선로전체에 대한 진행파의 이동시간

$t_x$ 는 편단에서 측정된 정보를 웨이블릿 변환하여 얻은 첫 번째 피크치와 두 번째 피크치 사이의 시간 간격이다. 이러한 고장점 추정방법은 고장점으로부터 발생하는 진행파가 계전기에서 측정되는 첫 번째 도착한 피크치를 사용하여 시간을 계산하므로 고장이 지속될 때 나타나는 간헐적인 피크치에 대한 오차를 현저히 줄일 수 있다. 또한, 모든 결과를 해석하고 오차를 판정하기 위하여 식

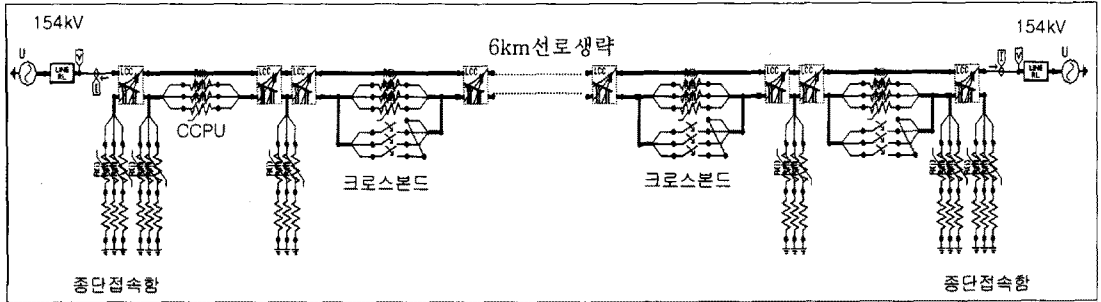


그림 2. D S/S에서 T S/S까지 케이블 모델계통

(4)를 사용하여 오차를 산출하였다.

$$\text{오차(\%)} = \frac{|\text{실제거리} - \text{계산거리}|}{\text{총선로의길이}} \times 100 \quad (4)$$

### 3. 모델계통

본 논문에서 사용된 모델계통은 154kV 양단전원 계통의 실제 형태로 케이블 포설형태는 전력구방식으로 되어있다. 시뮬레이션에서 사용된 케이블은 단면적 2000mm<sup>2</sup> 154kV CV케이블이다.

그림 2는 양단전원을 갖는 계통으로서 선로의 규장은 10km이며, 포설 형태는 선로를 세 구간으로 나누어 두 개의 구간은 크로스본딩 하였고, 세 번째 구간은 직접접지한 형태로서 구간별 선로 길이 및 접지상태는 표 1에 나타내었다.

표 1. 선로길이 및 접지상태

구간	D S/S	1구간	2구간	3구간	4구간
선로길이(m)	500	500	500	500	500
접지상태	○	○	△	△	○
구간	5구간	6구간	7구간	8구간	9구간
선로길이(m)	500	500	500	500	500
접지상태	△	△	○	△	△
구간	10구간	11구간	12구간	13구간	14구간
선로길이(m)	500	500	500	500	500
접지상태	○	△	△	○	△
구간	15구간	16구간	17구간	18구간	T S/S
선로길이(m)	500	500	500	500	500
접지상태	△	○	△	○	○

(△ 직접접지: ○ 크로스본드 접지: △)

#### 3-1. 입력자료

Source 임피던스는 정확한 데이터를 확보하기 위해 전력계통 해석용 프로그램인 PSS/E를 이용하여 계산하였다. 표 2는 해석을 위해 사용된 Source 임피던스이다.

표 2. Source 임피던스

변전소	임피던스	Z(Ω)	
		정상	정상
D 및 T	정상	0.01142+j0.07251	
	정상	0.00634+j0.04605	
	역상	0.00632+j0.04577	

### 4. 결과 및 고찰

본 논문에서 사용한 모델계통은 서로 같은 양단전원을 가진 Homogeneous한 계통으로 모델링의 주파수는 7680Hz를 사용하였으며, 전파속도는 1.75031×10<sup>5</sup>km/sec 이고, 고장의 유형은 0° 고장을 기본으로 하였다. 또한 선로의 길이 10km에 따라 20%, 50% 및 80% 지점에서의 고장을 모의하였다. 이때 고장저항은 시분변으로 각각 0Ω, 10Ω 및 100Ω을 사용하였다. 그리고 판단 정보를 사용할 때 필요한 선로전체에 대한 진행파의 이동시간이 모의 선로의 길이에 따라 다르므로 전체 선로구간이 10km 인 본 모델계통에서는 5.71327×10<sup>-5</sup> sec 이다. 그림 3은 모델계통으로부터 동시에 기록된 신호인 과도전압 및 전류 데이터에 대한 128샘플링한 데이터를 이용하여 고장점 추정을 위해 MATLAB을 사용하여 웨이블렛 실행과정을 보여주고 있고, 고장점까지의 지연시간을 계산하여 수행하였다.

그림 4와 그림 5는 선로길이 10km인 경우 20% 지점에서 1선 지락고장이 발생하였을 때 양단에서 측정된 전압성분을 웨이블렛 변환한 그래프를 보이고 있다. 또한 위에서 제시한 고장점 추정방법을 사용하여 고장점 추정을 하기 위해서 그림 4와 그림 5에서 나타난 첫 피크치의 시간값인 190.01ms 와 189.98ms를 각각 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 계산이 된다.

$$X = \frac{10 - [1.75031 \times 10^5 \times (190.01 - 189.98) \times 10^{-3}]}{2} \quad (5)$$

$$= 2.3745 \text{ km}$$

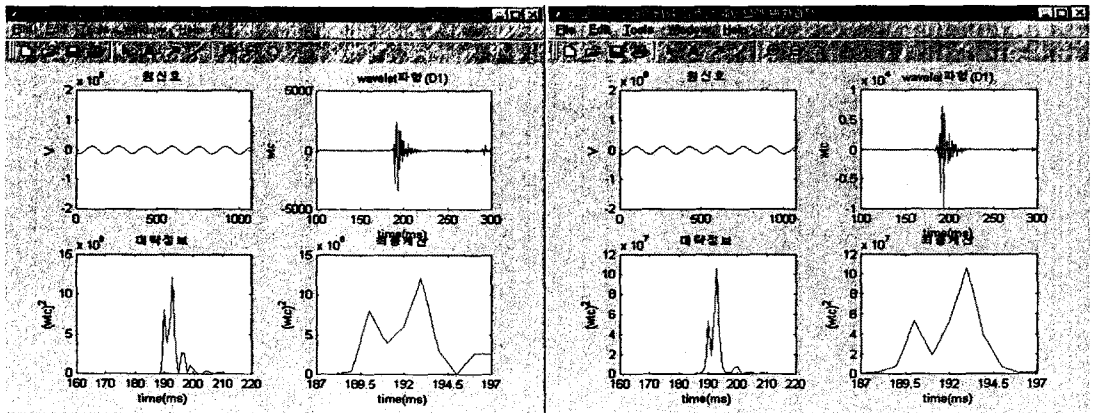


그림 3. 1선 지락고장시 원신호에서 웨이블렛 변환과정

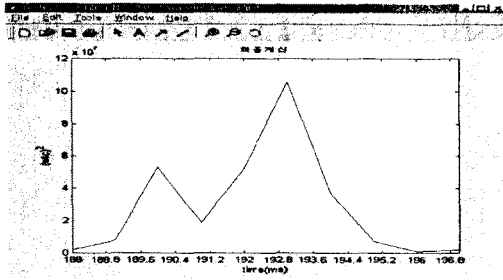


그림 4. 10km 선로의 20%지점에서 1선지락고장이 발생했을 경우 B모션 측의 정보를 이용한 웨이블렛 계수 그래프

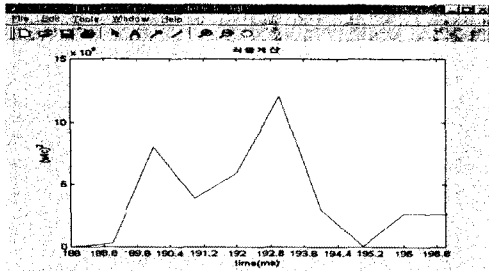


그림 5. 10km 선로의 20%지점에서 1선지락고장이 발생했을 경우 A모션 측의 정보를 이용한 웨이블렛 계수 그래프

또한 식 (4)를 이용하여 오차(%)를 계산하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|2 - 2.3745|}{10} \times 100 = 3.745[\%] \quad (6)$$

위와 같이 선로의 양단에서 동시에 샘플링 된 과도전압과 전류 파형을 이용하여 오차가 작고 정확한 고장점을 추정할 수 있다. 그러나 선로의 중심부에서 발생하는 고장일 경우에는 고장점을 추정할 수 있는 시간지연부분이 거의 0에 가까워 본 논문에서 제시한 식(2)를 이용하여 계산하였다. 또한 모의한 선로의 길이가 10km이므로 이때의 선로전체에 대한 진행파의 통과시간은  $5.71327 \times 10^{-5}$  sec이다. 그림 6은 편단에서 측정된 과도 전압 및 전류파형을 128샘플링하여 웨이블렛 변환한 그래프이며 각각의 첫 번째 피크치와 두 번째 피크치의 값은 191.9201msec, 191.9492msec로 고장점 추정결과는 다음과 같다.

$$X = \frac{1.75031 \times 10^5 \times [2 \times 5.71327 \times 10^{-5} - (191.9201 - 191.9492) \times 10^{-3}]}{2} = 5.6257\text{km}$$

또한, 또한 식 (4)를 이용하여 오차(%)를 계산하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|5 - 5.6257|}{10} \times 100 = 6.257[\%] \quad (7)$$

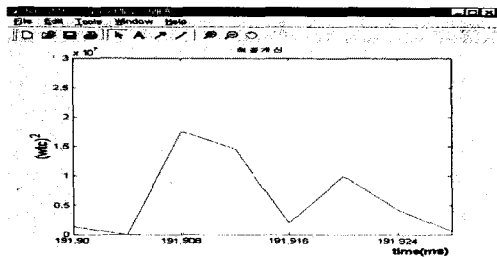


그림 6. 10km 선로의 50%지점에서 1선 지락고장이 발생했을 경우 A모션 측의 정보를 이용한 웨이블렛 계수 그래프

표 3. 1선 지락고장시 고장저항 및 고장범위 변화에 따른 고장점추정

고장저항	0Ω		10Ω		100Ω	
	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)
20%(2km)	2.3745	3.745	2.5122	5.122	2.7748	7.748
50%(5km)	5.6505	6.505	5.7065	7.065	5.6257	6.257
80%(8km)	7.1529	8.47	7.3629	6.37	6.9253	10.75

표 4. 2선 지락고장시 고장저항 및 고장범위 변화에 따른 고장점추정

고장저항	0Ω		10Ω		100Ω	
	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)
20%(2km)	3.0747	10.747	2.6371	6.371	2.6996	6.996
50%(5km)	5.9314	9.314	5.7625	7.625	5.8106	8.106
80%(8km)	7.71298	2.87	7.0479	9.52	7.2579	7.42

표 5. 3상 지락고장시 고장저항 및 고장범위 변화에 따른 고장점추정

고장저항	0Ω		10Ω		100Ω	
	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)	계산거리 (km)	오차 (%)
20%(2km)	3.1622	11.622	3.0309	10.309	2.9171	9.171
50%(5km)	5.7442	7.442	5.91157	9.116	5.4813	4.813
80%(8km)	7.004	9.96	7.888	1.12	7.424	5.76

표 3에서 표 5까지는 선로길이에 따른 고장점 추정 결과를 고장저항에 따라 계산하여 나타내었다. 표 3은 1선 지락고장시 각각의 고장지점을 20%, 50% 및 80%에 대하여 모의한 결과로 20%와 80%에서는 기존의 논문의 오차범위인 10%이상의 오차보다 오차범위를 5% 이내로 줄일 수 있었다. 반면 50%지점 고장에서는 웨이블렛 변환시 피크치 간격의 미세한 변화에 민감하게 반응하기 때문에 전력케이블의 선로구간이 10km인 점을 고려할 경우 기존 발표된 논문의 오차범위 보다 작다고 할 수 있다. 표 4와 표 5 또한 2선 지락고장 및 3상 지락고장에서의 고장점 추정 결과 및 오차로 3상 지락고장시 80%지점에서 고장저항 10Ω의 경우 고장점 오차가 가장 작은 1.12%내에서 고장점을 추정하였다.

## 6. 결론

본 논문에서는 전력케이블에서의 고장점 추정을 위해 기존의 방법과 다른 웨이블렛 변환을 이용하여 신속한 고장점 추정을 하였다.

- (1) 전력케이블에서 고장시의 전압과 전류의 과도진행파를 직접 사용함으로써 임피던스 측정에 의한 방법이나 진행파를 이용한 방법이 있어서 전압과 전류의 측정값을 다시 계산에 필요한 값으로 변환하거나 보정했던 문제점을 개선하여 고장점 추정을 간소화하였다.
- (2) EMTP 및 ATP Draw를 이용하여 실제통에서와 유사한 고장을 모의함으로써 고장점 추정의 신뢰도를 향상시켜 실제통에서 신속한 고장복구를 위해 유용하게 사용될 수 있도록 하였다.
- (3) 선로 중심부에서 발생한 고장에 대해서는 고장점 추정의 오차가 컸으나 편단의 정보를 이용함으로써 고장점 추정의 신뢰성을 향상시켰다.

### [참 고 문 헌]

- (1) 이종범, 박대희, "지중송전 케이블 시스템의 Surge현상과 대책 및 과제", 대한전기학회지, 41권 7호, 1992. 7.
- (2) 東京電力株式會社, "地中送電線路 ケーブル 設計基準(案)"
- (3) E. C. Bascom, et al, "Computerized Underground Cable Fault Location Expertise", IEEE 1994.
- (4) 김철환 "지중 케이블의 고장점 추정을 위한 Expert System에 관한 연구", 한국전력공사 1994. 7.
- (5) Fernando H. Magnago and Ali Abur, "Fault Location Using Wavelet", IEEE PF-303-PWRD-0-12-1997.
- (6) 이준성, 이종범, 김영, "방식층 보호장치 설치에 따른 지중송전케이블 시스템기전압 해석", 대한전기학회 49권1호, 2000.1