

송전선에서 Wavelets를 이용한 고장점 추정에 관한 연구

문성철* 이종범
원광대학교

A Study on Fault Location Using Wavelets in Transmission Line

Sung-Chall Moon* Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - This paper describes the fault location technique using wavelets in transmission line. Estimation of fault location is performed using synchronized data sampled at two ends of line and travelling wave. The similar current wave modeled in PSCAD/EMTDC and MATLAB was applied to evaluate the accuracy of theory proposed in this paper. The results of fault location shown in this paper will be evaluated as an effective suggestion for fault location in real transmission line

반면 최근에 수학적으로 소개되어진 Wavelet변환은 고주파수에서는 짧은 윈도우와 저주파수에서는 긴 윈도우를 사용함으로써 본과와 저차 고조파와 과도파형을 모두 갖는 신호의 분석에 적합하다. 이러한 Zoom-in능력으로 실제 짧고 높은 주파수의 외란을 내포한 신호의 분석에 탁월한 결과를 보인다.

주어진 $x(t)$ 함수를 연속 Wavelet변환(WT)하면 아래의 계산식에 따른다.

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

1. 서 론

여기서 a 와 b는 scaling(dilation)과 translation(time shift)에 대한 각각의 상수이고 g는 방정식 안에서 간소하게 하기 위해 실제로 가해진 wavelet 함수이다.

이러한 wavelet함수(mother wavelet)의 선정은 유연하게 허용조건을 만족시키는 것으로 설정되어진다. sample되어진 wavelet변환은 아래 주어진 식에 의하여 이산 wavelet변환으로 바꿀 수 있다.

$$DWT[m, k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n)g\left[\frac{k-na_0^m}{a_0^m}\right] \quad \text{----- (2)}$$

연속 Wavelet변환에 대한 식(1)의 방정식에서 $a = a_0^m$ 과 $b = na_0^m$ 으로 n와 m에 의하여 대체되었다.

최근 전력계통의 구성이 점점 대형화되고 초고압화 되어짐에 따라 고장 발생시 사고파급의 범위와 그 강도가 커져 신속한 고장복구가 크게 요구되고 있다. 사실 전력계통에서의 고장은 송전선로가 날씨가 기타 예상치 못한 대상에 노출되어 있기 때문에 피할 수 없는 현상이다. 이러한 고장은 대부분이 일시적인 경우이지만 어떤 경우는 영구적 고장인 경우여서 재송전 이전에 선로를 면밀히 조사하여야하는 경우가 발생된다.

이러한 요구에 부응하여 고장점 추정(Fault Location)에 관한 연구는 오랫동안 전력산업의 기본적인 관심사들 중의 하나로 대두되어왔고 이를 위해 많은 연구가 국내외적으로 진행되어 왔다.

그러나 지금까지 국내외에서 발표된 고장점 추정에 관한 논문은 공통적으로 실제 고장을 구현하기 위한 고장 모델링이 필요한데 고장저항이 없거나 또는 시간에 관계없이 일정하거나 다소 시간에 간격을 두고 반복하는 형태를 취하는 정도에 불과하여 현장의 실제고장과는 많은 차이가 있는 결과를 얻게 된다. 또한 진행파이론을 도입한 논문들에서는 진행파를 측정하기 위하여 특별한 장치를 필요로 하고 높은 sampling비율을 요구하기도 한다. 그리고 전압과 전류성분의 Phasor에 기초한 논문들에서는 Phasor계산에 있어서의 많은 Data처리의 어려움을 내포하고 있고, Wavelet이론을 도입한 논문들에서는 선로의 중심부에서 고장이 발생했을 경우에 대한 부정확한 문제가 대두되고 있어 신속한 고장복구를 위해 새로운 접근형태의 연구가 필요한 실정에 있다.

이에 따라 본 논문에서는 송전선의 고장점 추정을 위해 Wavelet 변환을 이용하여 고장상황에서 고장전압과 전류의 진행파가 송전선로 양단에 설치된 계전기의 위치에서 측정되는 시간과 고장점 도달에 대한 시간분석으로 고장점 추정을 실시하였다. 아울러 PSCAD/EMTDC를 이용하여 기존의 문제점이었던 현장의 고장형태와 유사한 고장모델링을 구현함으로써 기존의 미비점을 보완했다. 또한 선로의 중심부에서 발생한 고장에 대하여서는 편단에서 얻은 Data로 고장점 추정을 하는 방법으로 문제점을 해결하였다. 따라서 이러한 방법을 통해 송전선에서 고저항 지락고장시의 고장점추정 결과를 제시하였다.

송전선의 고장점 추정에 있어서 정확도와 신뢰도 향상을 목적으로 시도된 본 연구는 고장선로에 대한 빠른 조치가 필요한 곳에서 매우 효과적인 자료로 사용될 것으로 평가된다.

2. Wavelet Transform

비 주기성 신호를 분석하는데 있어서 푸리에 변환이 가지고 있는 단점을 극복하기 위해 STFT(Shot Time Fourier Transform)가 제시되었으나 STFT는 신호를 일정한 해석윈도우의 크기만큼 주기적으로 가정하는 고정윈도우를 사용하기 때문에 빠른 과도파형과 정형파형이 동시에 존재하는 신호에 대해서는 적합한 분석방법이 되지 못한다.

3. 고장점 위치검출 방법

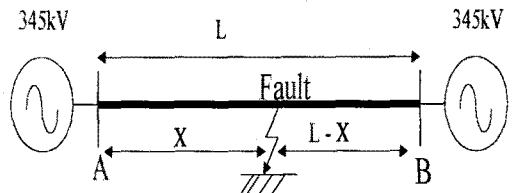


그림 1. 모의에 사용된 모델계통

그림 1에서 구간 A와 B사이에서 연결된 송전선로의 길이를 L, 여기서의 특성 임피던스를 Z_L , 진행파의 속도를 C 라고 하자. 지락 고장이 구간 A로부터 x점에서 발생하였다고 하면, 고장직후에 일어나는 고장파형은 surge와 같은 진행으로 양단으로 전파해 나갈 것이며 이때 전압과 전류의 과도진행파 역시 선로 양방향으로 계속적용 진행하며 진동이 고장점과 양단에 위치한 계전기의 검출점 사이에서 최초고장점의 정상상태에 도달할 때까지 계속될 것이다.

그림 2는 200km인 선로에서 모선 A로부터 160km지점에서 지락 고장이 발생하였을 때의 과도진행파가 선로의 양단으로 전파되는 현상을 Lattice diagram으로 나타낸 것으로 이러한 현상을 확실하게 할 수 있다.

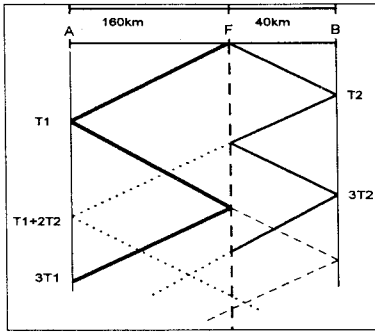


그림 2. 모선 A로부터 160km지점에서 지락 고장시의 Lattice diagram

이러한 고장신호는 Global Positioning Satellite(GPS)를 사용하여 양단에서 같은 시간에 동시에 기록되어진다. 이렇게 기록되어지는 전압과 전류성분의 진행파는 Wavelet변환을 이용하여 분석되고 변환되어진다.

각각의 모선 A와 B에서 기록되어지고 Wavelet변환으로 분석되어진 Wavelet계수의 최초 Peak로 시간은 T_A 와 T_B 에 해당된다. 그리하면 선로의 양단에서 고장점 추정을 위한 지연시간을 결정할 수 있으며, 모선 A로부터 고장점 사이의 거리는 아래와 같이 주어진다.

$$x = \frac{L - C \cdot (T_B - T_A)}{2} \quad \text{----- (3)}$$

여기서 L은 선로길이이고, x는 모선 A로부터 고장점까지의 거리 C는 진행파의 속도이다.

또한 선로의 중심부에서 지락고장이 일어나는 경우에 대해서는 선로의 양단에서 고장점 위치검출을 위한 지연시간인 $T_B - T_A$ 가 0에 가깝게 되어 위치검출이 불가능하게 되는 경우가 발생하기 때문에 $T_B - T_A$ 가 0에 가깝게 될 때는 편단에서 측정된 Data를 가지고 아래의 식으로 고장의 위치를 결정한다.

$$x = \frac{C \cdot t}{2} \quad \text{----- (4)}$$

여기서 $t = 2\tau - t_x$ 를 결정하는데, τ 는 선로전체에 대한 진행파의 이동시간이고, t_x 는 편단에서 측정된 처음 두 개의 peak치 사이의 시간 간격이다.

이러한 고장점 추정 방식은 진행파의 첫 번째 도착한 시간을 이용하여 계산하므로 고장이 지속될 때 나타나는 간헐적인 peak치에 대한 오차를 현저히 줄일 수 있다.

4. 지락고장 모델링

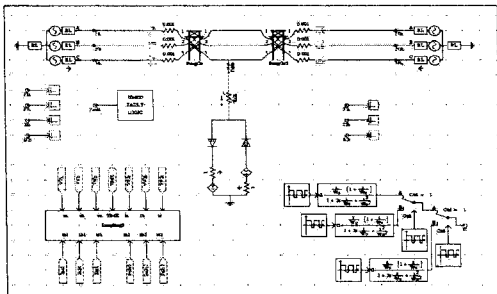


그림 3. PSCAD/EMTDC내에서의 모델계통

PSCAD/EMTDC program은 전력계통의 과도신호해석에 사용되며 그림 3은 본 논문에서 모의에 사용할 모델계통에 대한

PSCAD/EMTDC내에서 구성을 보여주고 있다. 모델계통은 양단을 345kV의 전원으로 구성하고 각 모선에 계전기를 설치함과 동시에 주파수의 의존모델을 선로모델로 구성하였다.

특히 Non-homogeneous한 계통이며, 이런 구조에 있어서 Time step은 10 μ s가 사용되었고, 주파수는 7680Hz를 사용하였으며, 이때 모델계통에서의 전파속도는 1.18144 $\times 10^5$ km/s이다.

또한 0 $^\circ$ 고장을 기본으로 하여 표1에 보인 것과 같이 모의하는 선로의 길이가 각각 30km, 100km, 200km이며, 고장위치는 각각의 선로마다 10%, 50%, 80%지점에서 고장을 모의하였으며, 이때 고장저항은 각각 0.01 Ω , 100 Ω , 250 Ω 과 아크고장을 모의하였다. 아크지락고장모델은 고장전류가 증감을 두 번 반복하는 아크모델(고장저항이 약 10~20 Ω)을 사용하여 기존에 저장한 지락고장모델과 함께 모의에 사용하였다. 그림 4는 모의에 사용한 아크모델일 때의 고장전류 파형을 보이고 있다.

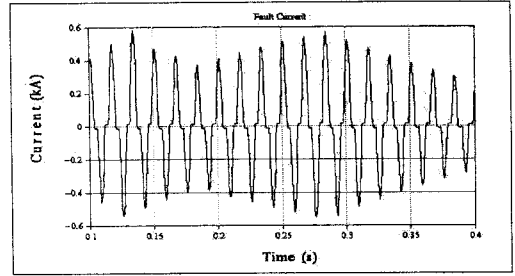


그림 4 모의에 사용한 아크저항시 고장전류파형

아울러 결과를 해석하고 오차를 판정하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\text{오차(\%)} = \frac{|실제거리 - 계산거리|}{\text{총선로의 길이}} \times 100 \quad \text{----- (5)}$$

표 1. 모의하는 계통의 변수들

모의선로 길이	30km, 100km, 200km
사고 위치	10%, 50%, 80%
사고저항	0.01 Ω , 100 Ω , 250 Ω , 아크저항

5. 모의 결과

본 논문에서는 Non-homogeneous한 계통으로써 모선 A측에서는 $Z_{A1} = 3.5 \Omega$, 80.0 deg, $Z_{A0} = 10.5 \Omega$, 80.0 deg 또한 모선 B에서는 $Z_{B1} = 0.02 \Omega$, 78 deg, $Z_{B0} = 0.06 \Omega$, 78 deg이며 여기서 Z_{A1} 과 Z_{A0} A단 source의 positive sequence와 zero sequence의 크기와 위상각이다. 또한 B단 역시 위와 같다.

아울러 MATLAB을 이용하여 고장점 추정을 위해 사용한 Wavelet변환을 실행하였다. 그림5와 그림 6은 선로길이가 200km인 선로에서 80%지점(실제거리: 160km)에서 고장이 발생하여 고장저항이 250 Ω

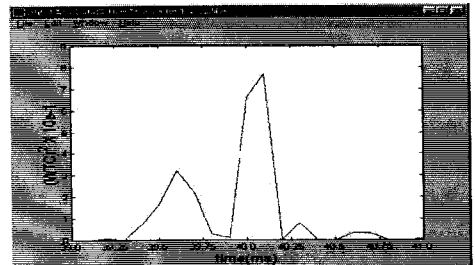


그림 5. 200km선로의 80%지점에 고장저항 250 Ω 일 때 A모선측의 Data를 이용한 wavelet계수 그래프

일 때 양단에서 측정되어진 전압분분을 Wavelet변환한 계수의 그래프이다.

위에서 언급한 고장점 위치검출 방법을 사용하면 식 (3)에 그림 5와 그림 6에서 나타난 첫 peak치의 값들의 시간을 각각 39.65ms와 38.76ms를 대입하면 다음과 같이 계산되어진다.



그림 6. 200km선로의 80%지점에 고장저항 250Ω일 때 A모선측의 Data를 이용한 wavelet계수 그래프

이때 모선 A에서부터 고장점까지의 거리를 x 라고 하면 다음과 같이 계산된다.

$$x = \frac{200 - 1.18144 \times 10^5 \times (38.76 - 39.65) \times 10^{-3}}{2}$$

$$= 152.5740 \text{ km}$$

또한 식 (5)에 의하여 오차(%)를 계산하면 3.7이므로 기존에 발표되었던 것들이 5에서 10정도에 오차를 가지는데 반해서 좀더 정확한 고장점 추정을 할 수가 있음을 보여주고 있다.

그림 7은 선로의 중심부, 즉 50%지점에서 고장이 발생하였을 때의 wavelet 계수 그래프이다.

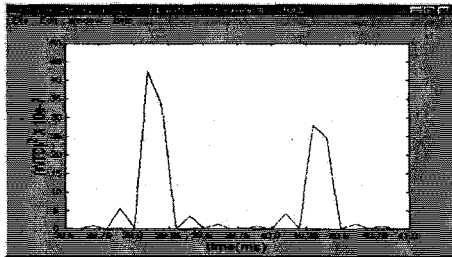


그림 7 200km선로의 50%지점에 아크고장저항 일 때 A모선 측의 Data를 이용한 wavelet계수 그래프

모의한 선로의 길이가 200km이므로, 이때의 선로전체에 대한 진행파의 통과시간은 1.6928×10^{-3} 초이며, 이러한 경우에는 양단에서 측정된 Data를 사용하여 계산하는데 어려움이 있으므로 한쪽 단에서 측정된 Data만으로 식 (4)에 대입하여 모선 A로부터 고장점까지의 거리를 다음과 같이 계산한다.

$$x = \frac{1.18144 \times 10^5 \times (2 \times 1.6928 \times 10^{-3} - (40.31 - 39.05) \times 10^{-3})}{2}$$

$$= 125.5634 \text{ km}$$

여기서의 오차는 기존에 발표된 논문[6]에서 보여주는 44[%]-110[%]의 오차보다 아크저항고장일 경우에도 훨씬 나은 12.7817[%]보이고 있어 정확도가 많이 개선되었다고 판단된다.

표 2에서 표 4까지는 각각의 선로길이에 따르는 고장점 추정에 모의 결과를 고장점의 위치와 사고저항의 관계로 나타낸 것이다.

표 2. 30km 선로에서의 고장점 추정 결과

선로 길이 30km	사고저항별 계산된 고장점 거리 및 오차							
	0.01Ω		100Ω		250Ω		아크저항 (10-20Ω)	
	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)
10% (3km)	3.9801	3.25	3.5913	1.97	3.1856	0.62	3.7763	2.59
50% (15km)	14.2783	2.40	14.4597	1.80	14.6412	1.19	17.0041	6.68
80% (24km)	23.8608	0.46	23.8700	0.43	24.1515	0.50	24.2422	0.80

표 3. 100km선로에서 고장점 계산결과

선로 길이 100km	고장저항별 계산된 고장점 거리 및 오차							
	0.01Ω		100Ω		250Ω		아크저항 (10-20Ω)	
	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)
10% (10km)	9.6496	0.35	9.8403	0.15	9.8310	0.16	11.5568	1.55
50% (50km)	54.4634	4.46	53.6449	3.64	56.2820	6.28	53.3680	3.36
80% (80km)	79.5361	0.47	80.7174	0.72	80.1267	0.12	83.0803	3.80

표 4. 200km 선로에서 고장점 계산 결과

선로 길이 200km	고장저항별 계산된 고장점 거리 및 오차							
	0.01Ω		100Ω		250Ω		아크저항 (10-20Ω)	
	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)	계산 거리	오차 (%)
10% (20km)	21.206	0.60	19.662	0.17	20.253	0.13	23.206	1.60
50% (100km)	114.38	7.19	124.47	12.23	127.29	13.64	125.56	12.78
80% (160km)	159.16	0.42	157.94	1.03	158.97	0.51	155.21	2.39

6. 결 론

본 논문에서는 기존에 발표되었던 고장점 추정에 대한 연구들이 가지고 있던 문제점을 보완하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 고장복구를 위해 고장점 추정방법을 제안하였다.

본 논문에서의 연구결과와 향후 연구방향을 종합하여 기술하면 아래와 같다.

- (1) 고장시의 전압과 전류의 과도진행파를 직접 사용함으로써 고장점 추정을 간소화할 수 있도록 하였다.
- (2) 실제통에서와 유사한 사고형태를 모의함으로써 고장점 추정의 신뢰도를 향상하여 빠른 고장복구가 시급한 곳에 유용하게 사용될 수 있다.
- (3) 실제 고장점 추정은 많은 오차요인을 가지고 있으며 사고장에 대한 다양한 조건과 원인에 따라 오차(%)가 많아 이에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

{참 고 문 헌}

- [1] H. W. Dommel, and J. M. Michels, "High Speed Relaying using Traveling Wave Transient Analysis", IEEE Publication No. 78CH1295-5 PWR, paper no A78214-9, IEEE PES Winter Power Meeting, New York, January 1978.
- [2] Fernando H. Magnago and Ali Abur, "Fault Location Using Wavelets", IEEE PE-303-PWRD-0-12-1997.
- [3] D. Novosel, D. G. Hart, E. Udren, and A. Phadke, "Accurate Fault Location Using Digital Relays" ICPST conference, China, October 1994.
- [4] 전력연구원 "직접접지계통 송전선로 고저항 지락보호대책연구", 전력연구원, 1997.7.
- [5] 문성철, 이종범 "고저항 지락사고 해석을 위한 아크파형 모델링에 관한 연구", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp.1182-1184, 1998
- [6] M. Kezunovic, and B. perunicic "Automated Trans mission Line Fault Analysis Using Synchronised Sampling at Two Ends", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, No 1, February 1996.
- [7] IEEE Power System Relaying Committee, "Synch ronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control", Working Group Report, IEEE PES Winter Meeting, Paper No 93 WM 039-8 PWRD, New York, February 1993.
- [8] MATLAB Manual User's Guide