

웨이브렛 변환을 이용한 고저항 지락사고 검출 및 판별

고영훈\*, 김철환\*, 김 현\*\*  
 \*성균관대학교, \*\*평일산업주식회사

Fault Detection and Classification of High Impedance Fault  
 using Wavelet Transform

Y.H.Ko\*, C.H.Kim\*, H.Kim\*\*  
 \*Sungkyunkwan University, \*\*Pyung-il Industrial Co.,Ltd

**Abstract** - High impedance fault(HIF) is defined as fault the general overcurrent relay can not detect or interrupt. Especially when HIF occur in residential areas, energized high voltage conductor results in fire hazard, equipment damage or personal threat. This paper proposes the model of HIF in transmission line using the ZnO arrester and resistance to be implemented within EMTP. Wavelet transform is efficient and useful for the detection of HIF in power system, because it uses variable windows according to frequency. HIF detection method using wavelet transform can distinguish HIF from similar phenomena like arcfurance load, capacitor bank switching and line switching.

모델 계통이고 선로의 양단에 각각 240(MVA), 180(MVA)의 두 전원을 포함하는 26(km) 공장의 선로이다.

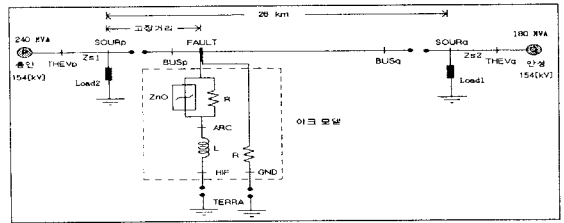


그림 1. 모의에 사용된 계통도

그림 2는 아크가 발생할때 전압과 전류의 특성을 나타낸다. 고저항 지락사고시 발생하는 아크는 주로 저항성 회로에서 발생되며 아크 길이가 짧고 전류의 크기가 작은 특성이 있고 무작위적인 아크 성질 때문에 오랜 시간동안 지속될 수 있다. 이러한 아크의 비선형적인 특성은 고저항 지락사고를 검출하기 위한 중요한 특징이다. 또한, 고저항 사고의 특성을 보다 개선하기 위해서 저항을 병렬로 달아 아크 특성을 개선하였다(5). 그림 3은 고장거리 13(km), 고장각 90° 에서 고장이 발생한 고저항 지락사고 모델에서 얻어진 전압-전류 특성이다. 그림 3은 점호와 소호후의 아크의 특성을 보여주고 있으며, 좀 더 실제에 가까운 아크의 특성을 보여주고 있다.

1. 서 론

최근 국내에서는 송전선로 근처에서 공사용 크레인이나 수목 및 산물 등의 접촉과 근접으로 인한 고저항 미소전류의 지락사고가 발생하였다. 아직까지는 고저항 지락사고시 발생하는 아크현상을 실제통에서 모의하는데 여러 가지 어려운 점이 있고 전력계통 모의 프로그램인 EMTP에도 이와 연관된 정확한 모델이 없는 상태이다. 그러므로, 실제통에서 발생한 고저항 지락사고와 근사한 아크 모델을 개발하고, EMTP내에서 모의 가능하도록 하는 것은 고저항 사고의 검출 알고리즘 개발을 위해 절실히 필요하다. 웨이브렛 변환은 전력계통의 고장과 스위칭에 연관된 과도현상을 분석하기 위한 방법으로 사용 가능하다(4). 또한 가변적인 분해능을 사용함으로써 아크를 동반하는 고저항 지락사고시 발생하는 과도현상을 정확하게 검출할 수 있다. 고저항 사고와 유사한 특징을 가지는 커패시터 뱅크 스위칭, 라인 스위칭 및 아크로 부하 등의 비고장 현상들도 모델링하여 고저항 지락사고와 비교하였다. 비교분석하여 얻어지는 특징들을 비고장 현상들과 고저항 지락사고를 구별할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다.

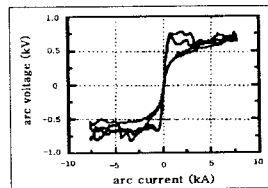


그림 2. 실아크의 전압-전류 특성

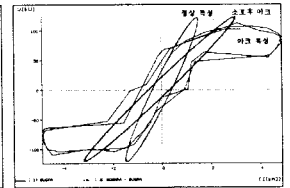


그림 3. 개선된 전압-전류 특성

2. 고저항 지락사고

2.1 아크특성

고저항 지락사고는 아크를 동반하는 특징을 가지고 있다. 아크현상은 에너지 전위가 매우 높은 도체와 그렇지 않은 물체가 불완전한 접촉 상태에서 서로 접근하였을 때 발생하는 현상이다.

고저항 지락사고를 모델링하기 위해서는 고장이 발생할 때 항상 수반되는 아크특성을 모의해야만 한다. 그러나, 현재까지는 실제통에서 고저항 지락사고를 시뮬레이션하여 얻어진 정확한 데이터가 없다. 본 논문에서는 EMTP내에서 구현되는 산화아연 피뢰기 모델을 사용하여 아크 현상을 모델링하였다. 그림 1은 모의에 사용한

3. 웨이브렛 분석

3.1 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환은 마더 웨이브렛을 scale하고 shift시켜 만들어진 가변 윈도우로 분석을 수행하게 되며 이들 가변 윈도우를 웨이브렛이라 부른다. 마더 웨이브렛  $\Psi_{a,b}(t)$ 는 대부분 짧고 진동적인 함수로서 평균값이 0 이고 양쪽 끝에서 급격히 감쇄하는 형태를 갖는다.

웨이브렛 변환은 크게 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환이 있다. 여러 단계의 웨이브렛 변환을 수행하게 되면 엄청나게 많은 양의 데이터가 산출되고 분석 시간도 길어지므로 문제가 된다. 따라서, 2의 역승 형태에 기초한 scale과 shift를 선택한다면 분석은 더욱 효

울적으로 수행될 것이다. 이러한 분석은 이산 웨이브렛 변환을 통해서 구현된다.

이산 웨이브렛 변환은 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다. 여기서, 고역필터를 detail(D)라고 명명하고, 저역필터를 approximation(A)라고 명한다.

### 3.2 마더 웨이브렛의 선정

여러 종류의 마더 웨이브렛이 존재하지만, 각 웨이브렛은 길이와 특성에 따라 여러 종류로 분류될 수 있다. 일반적으로 전력계통 고장해석에 사용되어지는 마더 웨이브렛은 db4, bior3.1, coif4, sym5 이다. 그러나, 이들 마더 웨이브렛중 어떠한 것이 고저항 지락사고 검출에 적합한지는 아직 확실하게 결론이 나지 않았다. 따라서, 고저항 지락사고 검출에 적합한 마더 웨이브렛을 다음과 같은 조건으로 선정하고자 한다[10-13].

첫째, 사고검출이 가능한 d1 계수의 값이 존재해야 한다. 둘째, 사고상과 정상상의 구분이 가능해야 한다. 셋째, 원신호의 추출이 가능해야 한다.

#### 3.2.1 마더 웨이브렛의 사고 검출 능력 비교

그림 4~그림 7은 사고파형에 대한 각 마더 웨이브렛의 사고 신호 분석 결과이다. 고장거리를 가변하여 모의 하였고, d1 계수값의 합의 최대치를 나타낸 것이다. 사고상은 A상이며, 고장각은 0° 와 90° 이다.

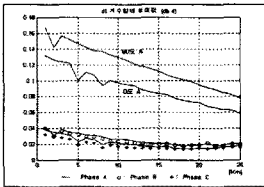


그림 4. db4를 이용한 d1 계수합 최대치의 변화

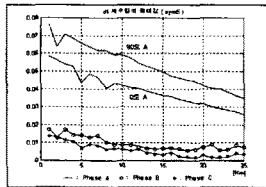


그림 5. sym5를 이용한 d1 계수합 최대치의 변화

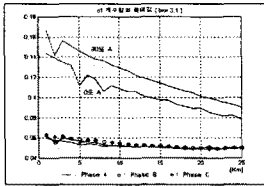


그림 6. bior3.1을 이용한 d1 계수합 최대치의 변화

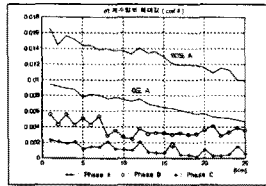


그림 7. coif4를 이용한 d1 계수합 최대치의 변화

그림 4는 db4 마더 웨이브렛을 이용한 각 사고에 대한 d1 계수들의 합의 최대치들을 고장상 및 정상상에 대해서 나타낸 것이며, 그림 5는 sym5 마더 웨이브렛을 이용하였고, 그림 6은 bior 3.1 마더 웨이브렛, 그림 7은 coif4 마더 웨이브렛의 결과이다. 그림 7에서 보면 0도 고장시 고장상의 값들이 정상상의 값 아래에 존재하는 구간이 발생한다. 따라서, coif4 마더 웨이브렛은 고저항 사고 검출에 부적절함을 알 수 있다. 또한, 발생하는 계수값이 정상상과의 구분을 명확히 하기 위해선 무엇보다도 고장상과 정상상과의 계수값 차이가 커야 하며 값의 변화가 적을수록 뛰어난 분석 능력을 가지는 것이다. 왜냐하면, 고장상과 건전상의 차가 너무 작으면의 부 잡음에 대해서 강인성이 떨어지게 되어 고장검출을 할 수 없게 될 수 있기 때문이며, 고장상의 변화량이 너무 크면 유사 사고에 대한 판별이 어렵기 때문이다. 표 1은 이러한 d1 계수값들을 나타낸 것이다.

표 1에서 고장상 값의 변화량이 가장 적은 것은 sym5 이고, 고장상과 정상상의 값의 차가 가장 큰 것은 db4 이다. 따라서, db4와 sym5가 가장 적절한 마더 웨이브

렛임을 알 수가 있다. 표2와 표3에서 approximation 성분의 1고조파에 대한 3,5 고조파의 비율이며, 표3은 detail 성분의 1고조파에 대한 3,5 고조파의 비율을 나타낸 것이다. 이로부터 고장 검출시 가장 적절한 마더 웨이브렛은 sym5이며, 분해 단계는 3단계라고 할 수 있다.

표 1. 고장검출을 위한 계수값의 분포

	고장상 최대값	고장상 최소값	정상상 최대값	고장상 변화량	고장상-건정상
db4	0.1679	0.0588	0.0422	0.1091	0.0166
sym5	0.0746	0.0259	0.1750	0.0505	0.0084
bior3.1	0.1669	0.0789	0.0628	0.0883	0.0158
coif4	0.0166	0.0047	0.0056	0.0119	이용불가

표 2. sym5 마더 웨이브렛의 분석 결과중 a1~a6에 대한 각 단계별 3, 5고조파 함유 비율 (%)

		a1	a2	a3	a4	a5	a6
5	0도	7.904	7.867	7.629	9.858	8.002	42.54
	90도	9.076	9.032	8.797	9.123	9.392	51.9
13	0도	6.902	6.869	6.658	9.701	8.124	42.46
	90도	6.872	6.839	6.661	9.109	9.31	51.9
21	0도	5.226	5.201	5.023	9.595	8.34	42.66
	90도	5.197	5.173	5.027	9.097	9.25	52.04

표 3. db4 마더 웨이브렛의 분석 결과중 a1~a6에 대한 각 단계별 3, 5고조파 함유 비율 (%)

		a1	a2	a3	a4	a5	a6
5	0도	7.9	7.84	7.74	13.83	13.63	56.27
	90도	9.075	9.002	8.839	13.72	13.33	53.54
13	0도	6.9	6.85	6.82	13.8	13.62	56.54
	90도	6.871	6.816	6.848	13.71	13.42	58.55
21	0도	5.226	5.183	5.184	13.76	13.62	56.64
	90도	5.297	5.155	5.208	13.7	13.49	57.83

## 4. 고장 검출 알고리즘 및 결과

입력은 3상의 전압과 전류를 사용하고 16bit A/D 변환기를 통과한 후 2차 butterworth 필터를 이용하여 10고조파 이상의 성분을 제거한다. 이 필터링된 신호는 웨이브렛 분석에 의해서 각 고장검출 알고리즘에 맞게 수행한다. 이때 입력신호는 3840(Hz)로 샘플링되었으며, 한 주기 64 샘플 신호를 한 데이터 윈도우의 길이로서 사용하게 된다.

### 4.1 웨이브렛 분석 흐름도

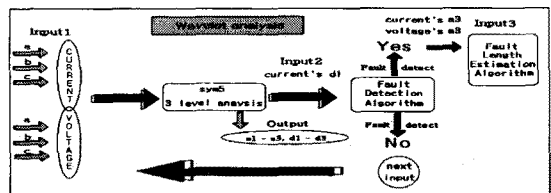


그림 8. 웨이브렛 분석 흐름도

그림 8은 웨이브렛 분석시 사용되어지는 흐름도이다. 마더 웨이브렛은 sym5를 사용하였고 분석단계는 3단계 까지 수행하였다. 고장검출 알고리즘은 각 전류의 d1 성분을 이용하였다.

### 4.2 고저항 지락사고 검출 알고리즘

고장검출 알고리즘은 각 상의 전류의 웨이브렛 분석결과인 d1 성분을 입력으로 사용한다. 이는 한 데이터 윈도우(64샘플)의 웨이브렛 분석 결과인 d1 성분의 합을 이용하게 된다. 고저항 사고만을 검출하기 위해서 상한값과 하한값을 가지는 고장검출영역(fault detection area)을 사용하게 된다. 또한 유사사고인 라인 스위칭, 캐패시터 뱅크 스위칭, 아크로 부하등과 구분하기 위한 고장 내구력 상수(fault durability constant)를 설정하여 유사사고를 고장으로 판별하는 것을 방지하였다. 그림 9는 고저항 지락사고 검출 알고리즘이다.

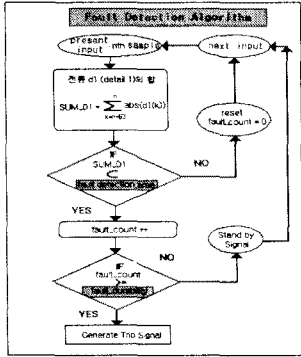


그림 9. 고장 검출 알고리즘

### 4.3 검출 결과

그림 10과 그림 11은 고장거리가 13(km)이고, 고장 각이 0°와 90°일 때 웨이브렛 변환에서 얻은 d1 계수의 합을 나타낸 것이다. 이처럼 고장상에서는 d1 계수의 합이 커지는 것을 알 수 있으며 이를 이용하여 고장검출을 수행하게 된다.

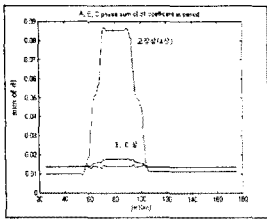


그림 10. 3상의 d1 계수합(0°, 13Km)

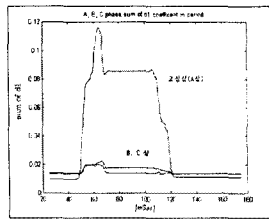


그림 11. 3상의 d1 계수합(90°, 13Km)

표 4. 고장 모의 시간-거리별 고장시간 추정 결과

고장점 [Km]	0도 사고			90도 사고		
	고장발생 시간(ms)	고장검출 시간(ms)	오차 (ms)	고장발생 시간(ms)	고장검출 시간(ms)	오차 (ms)
0.5	53.1667	52.0417	1.125	50	50.4271	0.4271
5	70.8333	70.5313	0.302	66.667	67.3542	0.6872
10	87.5	87.4583	0.0417	83.333	84.0208	0.6878
13	70.8333	71.0521	0.2191	66.667	67.875	1.118
16	53.1667	53.3438	0.1771	50	51.2083	1.2083
21	70.8333	72.6146	1.7813	66.667	68.3958	1.7288
평균 오차	0.6824			0.978		

표4는 고장 판별을 위한 시뮬레이션의 상태와 판별 결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이션은 0°, 90°로 모의하였고, 고장거리는 총 선로의 80~85[%] 자기 보호구

간을 가지는 계전기를 위해서 22[Km]까지 알고리즘을 구현하였다. 표 4에서 오차는 약 0.6~0.9(ms)의 평균 오차를 보이고 있다. 이는 정상상에서도 커플링에 의한 고장상의 영향을 받아 d1 계수가 발생함으로써 발생하는 오차이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 EMTP를 이용하여, 고저항 지락사고를 모델링하였고 웨이브렛 변환을 이용하여 고장검출을 수행하였다. 또한 고저항 지락사고의 고장검출 성능을 향상시켜 보호계전 측면에 적합하고 신뢰성 있는 방법을 제시하였고, 결과는 다음과 같다.

첫째, 기존의 산화아연 피뢰기 모델에 저항을 병렬로 삽입하여 아크 특성을 모델링 하였다. 이는 아크의 특성 중인 소호와 점후후 어느 정도의 시간후 안정된 아크를 발생한다는 조건을 만족하지 못하는 단점을 해결하였다.

둘째, 웨이브렛 분석에 sym5 마더 웨이브렛과 3단계까지의 분석이 가장 우수함을 실험적인 결과로 얻었다.

셋째, 웨이브렛 분석은 커패시터 뱅크 스위칭, 라인 스위칭 및 아크로 부하 등의 유사현상들과 고저항 지락사고를 분명하게 구분하여 고장검출을 수행하였다.

이상에서 서술한 바와 같이 웨이브렛 분석을 사용한 고저항 지락사고 검출 알고리즘은 기존의 고장검출 알고리즘보다 효과적인 방법이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Martin Vetteli, Jelena Kovacevic, "Wavelets and subband coding", Prentice Hall, 1995
- [2] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Openheim, Jean-Michel Poggi, "Wavelet toolbox for use with MATLAB", The mathworks Inc, 1996
- [3] Andrew Laine, "Wavelet theory and application", University of Florida, 1993
- [4] W.A. Wilkinson, M.D. Cox, "Discrete Wavelet Analysis of Power Systems", Vol. 11, No. 4, November 1996
- [5] 변성현, "웨이브렛 변환을 이용한 고저항 지락사고 검출 및 고장점 추정에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, 1997
- [6] Will. Rogers, "Modeling of Free-Air Arcs"
- [7] C.Sidney Burrus, Ramesh A.Gopinath, Haitaoguo, "Introduction to wavelets and wavelet transforms", Prentice Hall, 1998
- [8] A.T.Johns, J.R.Platts, "Digital protection for power systems", IEE POWER SERIES 15, 1995
- [9] Arun G.Phadke, James S.Thorp, "Computer relaying for power systems", Research Studies Press Ltd, 1998
- [10] K K Li, "An adaptive window length algorithm for accurate high speed digital distance protection", Electrical Power & Energy Systems, Vol.19, No.6, pp. 375-383, 1997
- [11] L L Lai, "Wavelet transform for high impedance fault identification", Energy Systems Group, pp. 188-191, 1998
- [12] J Liang, S Elangovan and J B X Devotta, "A wavelet multiresolution analysis approach to fault detection and classification in transmission lines", Electrical Power & Energy Systems, Vol.20, No.5, pp. 327-332, 1998
- [13] Xia Yibin, David Chan Tat Wai, W. W. L. Keerthipala, "A new technique using wavelet analysis for fault location", IEE conference Publication, No.434, pp. 231-234, 1993.3