Wavelet 변환을 이용한 배전 계통의 고 저항 사고 검출 알고리즘

남순열*, 강용철*, 김성수*, 손진만*, 박종근*, 장성일**, 김광호**, 김일동***
*서울대학교 전기 공학부, **강원 대학교 전기 공학과, ***한전 전력 연구원

A High Impedance Fault Detection Algorithm Using Wavelet Transform

S.R.Nam*, Y.C.Kang*, S.S.Kim*, J.M.Sohn*, J.K.Park*, S.I.Jang**, K.H.Kim**, I.D.Kim***
*Seoul National University, **Kangwon National University, ***KEPRI

Abstract - This paper presents a high impedance fault (HIF) dectection algorithm of distribution systems using wavelet transform. Two HIFs on dry soil and sandy soil were simulated on various load conditions in 22.9 kV distribution systems using EMTP, and the current waveforms were decomposed by wavelet transform. The current root mean square(rms) change, the index change rate and the relative amplitude change were used as the multi-criteria for a HIF dectction. The index change rate and the relatlve amplitude were made using the wavelet coefficients.

1. 서 론

고 저항 사고는 전선이 어떤 원인에 의해 자갈, 모래, 수목, 보도 블록 등에 접촉하는 형태의 사고를 말하는데, 고 저항 사고라는 이름 그대로 높은 저항 때문에 정상 상태보다 사고 전류의 증가가 많지 않아 배전 계통에서 주로 사용하고 있는 과전류 계전기를 이용해서는 검출이 어렵다. 그래서 고조파를 이용한 검출을 위해 FFT를 사용하기도 한다.

본 논문에서는 wavelet 변환을 이용하여 배전 계통에서 부하 증가와 고 저항 사고를 구별할 수 있는 고 저항 사고 검출 알고리즘을 제안하였다. 22.9 kV의 배전 계통에서 사고 거리, 사고 위상 및 부하 종류(R,L부하, R,L+컨버터 부하, R,L+아크로 부하)를 각각 변화시키면서 EMTP를 이용하여 고 저항 사고 및 부하 증가를 모의하였으며, 여기서 모의된 전류를 wavelet 변환하여 wavelet 계수들을 구한 후 고 저항 사고의 특성을 분석하였다.[1] 분석된 특성을 바탕으로 전류의 실효값 변화, 지표 변화율, 계수의 상대 크기 변화를 기준으로 하는 고 저항 사고 검출 알고리즘을 제시하였고 이를 모의한 사례에 적용하여 타당성을 입증하였다.

2. Wavelet 변환[2]

Wavelet 변환은 신호와 wavelet과의 유사성을 나타내는 계수를 구하는데, wavelet은 mother wavelet $\psi(t)$를 scaling과 translation시킨 시간 함수이다. Wavelet 변환에는 연속 신호에 대해서 연속 wavelet 변환, 이산 요소 wavelet 변환이 있고 이산 신호에 대해서 이산 시간 wavelet 변환, 이산 wavelet 변환의 네 종류가 있다. 본 논문에서는 이 중에서 (1)로 주어지는 이산 시간 wavelet 변환을 이용하였으며, 이를 다중 해상도 분해를 이용하여 구현하였다.

$$DTWT(m,n)=\frac{1}{\sqrt{2^m}}\sum_k s(k)\psi\left(\frac{k}{2^m}-n\right) \qquad (1)$$

여기서 $s(k)$는 신호, m은 scale, n은 translation, $\psi\left(\frac{k}{2^m}-n\right)$은 wavelet을 나타낸다.

3. 모델 계통[3]

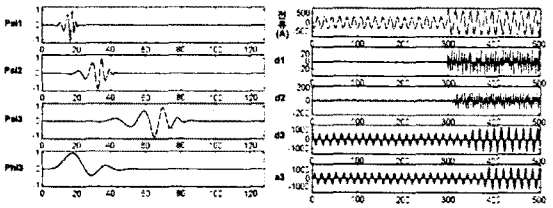
단락 용량이 100 [MVA]인 22.9 kV 배전계통을 선택하였으며, ACSR 60 mm^2의 배전선을 사용하여 한 배전선에서 담당할 수 있는 부하는 최대 12 [MVA]로 하였다. 이를 EMTP를 이용하여 모의하였으며 샘플링 주파수는 주기당 16 샘플로 하였다. 다음의 4 가지 조건에 따라 총 44 가지의 고 저항 사고를 모의하였다.

조건 1. 토양 종류
1) 마른 땅, 2) 모래
조건 2. 사고 위상
1) 0 도 사고 2) 90 도 사고
조건 3. 부하 종류
1) R,L 부하 2) R,L + 컨버터 3) R,L + 아크로
조건 4. 사고 거리
1) R,L 부하 : 1, 4, 7, 10 km
2) R,L + 컨버터 : 0.2, 0.8, 1.4, 1.8 km

3) R,L + 아크로 : 0.2, 0.8, 1.4 km

그리고 고 저항 사고와 정상 상태에서 부하 증가의 경우를 비교하기 위해서 R,L 부하와 R,L+컨버터 부하의 증가에 대해서 각각 모의하였다. R,L부하의 경우에는 6 MVA에서 12 MVA로 증가 시켰으며, R,L+컨버터 부하의 경우에는 5 MVA에서 12 MVA로 증가 시켰다.

4. 고 저항 사고 검출 알고리즘



(가)wavelet과 scaling함수 (나) 적용 결과

그림 1. Daubechies 16의 적용

본 논문에서는 16차의 Daubechies 16을 mother wavelet으로 이용하여 신호를 Level 3까지 분해하였는데 이에 해당하는 wavelet과 scaling 함수는 그림 1.(가)와 같다. 그림 1.(나)는 R,L 부하이고 사고 거리가 10 km인 사고를 wavelet 변환한 결과로서, 이 중 d1은 그림 1.(가)의 wavelet 중에서 Psi1과 전류 신호와의 유사성을 나타내는 계수로서, 중심 주파수 480 Hz인 영역의 성분과의 유사성을 나타내게 된다. d2는 scaling 효과의 down-sampling 때문에 중심 주파수가 d1의 절반인 240 Hz 영역의 성분과의 유사성을 나타내는 계수가 되는데, 이는 Psi1을 두배로 scaling한 Psi2와 전류 신호와의 유사성을 나타낸다. d3도 동일한 해석이 가능하며, c3의 경우에는 전류 신호의 저주파 영역 성분과 scaling 함수인 Phi3과의 유사성을 나타내는 계수가 된다. Level을 3으로 정한 이유는 첫째로, 60 Hz 기본파 성분이 d3과 c3에 나타나기 때문에 더 이상 분해하는 것은 의미가 없으며 둘째로, k 번째 Level의 계수를 구하는데 필요한 샘플 수는 16×2^k 이므로 Level이 깊어질수록 사고의 영향이 늦게 나타나기 때문이다.

전류 및 계수의 한 주기 동안의 실효값은 다음과 같이 주어지는데, 여기서 k는 level, n을 샘플 번호를 나타낸다.

$$rms_n^k=\sqrt{\frac{1}{16}\sum_{i=0}^{15}(d_{n-i}^k)^2} \qquad (2)$$

Wavelet 변환으로 구한 계수를 이용하여 사고 전과 사고 후의 변화를 비교하기 위한 용어를 아래와 같이 정의하였다.

1) 전류 및 계수의 실효값 증가 비율

$$\frac{\text{현재 실효값}}{\text{기준 실효값}} \qquad (3)$$

2) 계수의 상대 크기

$$\frac{\text{계수 크기}}{\text{전류 크기}}\times 100 \qquad (4)$$

3) 지표 벡터

[전류실효값 d1실효값 d2실효값] (5)

4) 지표 변화율

$$100\times\frac{|\text{지표 벡터}_{\text{현재}}|}{|\text{지표 벡터}_{\text{기준}}|}\times\frac{1}{\cos\theta}\text{, }\theta\text{:두 벡터의 각도차}$$

$$=100\times\frac{|\text{지표 벡터}_{\text{현재}}|^2}{\text{지표 벡터}_{\text{현재}}\cdot\text{지표 벡터}_{\text{기준}}} \qquad (6)$$

5) 과도율

[지표 변화율$_{n-1}$ · · · 지표 변화율$_{n-1}$ 지표 변화율$_n$]의 분산값 (7)

고 저항 사고의 검출은 전류 및 계수의 실효값 및 상대 크기를 이용하여, 과도 상태를 구별한 후 정상 상태에 이르렀을 때 사고를 판별하게 된다. 우선 전류 신호를 받아 들여 wavelet 변환을 하여 계수들을 구한 다음 전류 및 계수의 실효값을 구한다. 이 실효값들의 변화를 비교하여 과도 상태인지를 구별하고 정상 상태에 이르렀을 때 전류 실효값 변화, 지표 변화율과 상대 크기의 변화를 기준으로 하여 사고인지 아닌지를 판별하게 된다. 이와 같은 과정을 흐름도로 나타내면 그림 2와 같다.

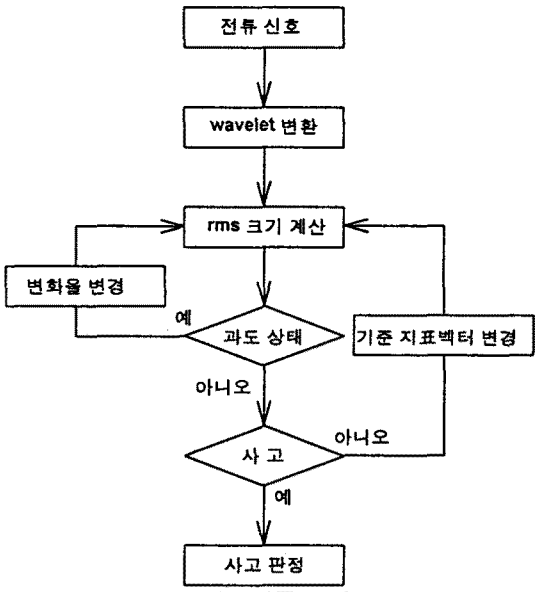


그림 2. 알고리즘 흐름도

4.1 증가 비율

표 1. 고 저항 사고의 증가 비율

	마른 땅			모래 위		
	전류	d1	d2	전류	d1	d2
R-L 부하	1.89	158.	7.00	4.19	929	37.7
R-L,컨버터	4.91	1.11	9.12	47.3	18.5	132.
R L,아크로	3.54	4.55	7.37	35.1	59.5	162.

표 1 은 각 부하 별로 사고 거리가 가장 먼 영도 사고에 대한 증가 비율로서, 사고 거리나 위상이

바뀌어도 비슷한 결과를 나타내므로 앞으로 나오는 결과들은 위와 동일한 조건에 해당하는 사고에 해당된다.

고 저항 사고에서는 d2의 증가 비율이 전류의 증가 비율보다 크게 나타나며, d1의 경우에도 컨버터 부하를 제외하고는 전류의 증가 비율보다 크게 나타나고 있다. 컨버터의 경우에는 정상 상태의 d1 값이 크고 전류의 증가 비율이 크기 때문에 전류의 증가 비율이 더 크게 나타난다.

표 2. 부하 증가 시의 증가 비율

	전류	d1	d2
R-L 부하	1.96	0.88	1.96
R-L, 컨버터 부하	2.35	1.42	1.24

R,L 부하 증가에서는 전류의 증가 비율에 비해 d1의 증가 비율은 작고 d2의 증가 비율은 거의 동일하게 나타나며 R,L, 컨버터 부하에서는 전류의 증가 비율에 비해 계수의 증가 비율이 작게 나타난다. 그러므로, 증가 비율을 비교하면 고 저항 사고와 부하 증가를 구별할 수 있게 된다.

4.2 계수의 상대 크기

표 3. 고 저항 사고의 상대 크기

	사고 전		사고 후			
			마른 땅		모래 위	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2
R-L 부하	0.05	4.54	3.90	16.8	10.4	40.8
R-L,컨버터	32.4	14.4	7.33	26.7	12.7	40.3
R-L,아크로	7.75	8.71	9.94	18.1	13.2	40.1

사고 후 d2의 상대 크기를 보면 부하에는 상관없이, 땅의 종류에 따라 거의 일정한 값으로 사고 전보다 커짐을 알 수 있다. d1의 상대 크기도 컨버터 부하를 제외하고는 사고 전보다 커짐을 알 수 있다.

표 4. 부하 증가시의 상대 크기

	증가 전		증가 후	
	d1	d2	d1	d2
R-L 부하	0.05	4.54	0.02	4.55
R-L, 컨버터	44.77	19.58	27.02	10.27

고 저항 사고와는 달리 부하 증가 시에는 d1과 d2의 상대 크기가 오히려 작아지는 것을 알 수 있다. 그러므로, 증가 비율과 마찬가지로 고 저항 사고와 부하 증가를 구별하는 기준으로 상대 크기를 이용할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 과도 상태 판별

과도 상태에서는 지표 벡터의 변화가 심하기 때문에 사고 검출의 기준들이 계속 바뀌어서 사고 판단이 어려우므로, 정상 상태에서 사고 판단을 하게 된다. 지표 변화율의 분산값이 임계값 이하인지 아닌지를 이용하여 과도 상태를 구분하게 되는데, 분산값이 임계값 이하가 되는 순간이 연속해서 정해진 회수 k 번 이상이면 정상 상태이고 그렇지 않을 경우에는 과도 상태라고 판별한다. 분산값은 매 순간마다 계산하게 되는데, 분산값의 계산에 사용하는 지표 변화율이 l 개라고 하면 계산 순간 이전의 l-1개와 계산 순간의 지표 변화율을 이용하여 분산값을 계산하게 된다.

4.4 사고 판별

사고 판별은 전류 크기 변화, 지표 변화율, 계수의 상태 크기 변화를 기준으로 사용하는데 이 기준들을 사용하여 매 순간마다 사고 가능성을 판별하여서 사고 가능성이 있을 경우에는 카운터를 1 증가시키고 그렇지 않을 경우에는 카운터를 0 으로 만들어서 카운터가 일정한 값 m 이상이 되면 사고라고 판별하게 되는데, 이를 흐름도로 나타내면 그림 3과 같다.

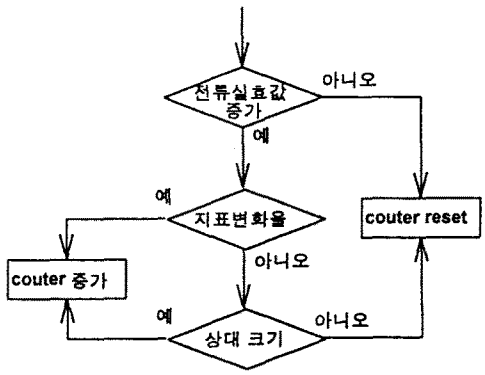


그림 3. 사고 판별 흐름도

다시 말하면, 사고 가능성이 연속해서 m 번 이상이 되면 사고라고 판별하게 되고 그렇지 않을 경우에는 사고가 아니라고 판별하여 현재의 지표 벡터를 새로운 기준 지표 벡터로 바꾸게 된다.

기준 1 - 전류 실효값 변화

현재의 전류 실효값이 기준이 되는 전류 실효값보다 작으면 사고가 아니라고 판단하여 카운터를 0 으로 만들게 되는데 이는 전류가 줄어들었음에도 불구하고 계수의 상대 크기가 늘어나는 경우를 제외하기 위해서이다.

기준 2 - 지표 변화율

지표 변화율은 기준 지표 벡터와 현재의 지표 벡터의 크기 비와 각도 차의 곱으로 나타나는데, 여기서 벡터의 크기 비에 의해서는 전류의 증가를 고려하게 된다. 고 저항 사고의 경우에는 전류와 계수의 증가 비율이 다르기 때문에 사고 전과 사고 후의 두 벡터 사이에 각도 차가 생기게 되므로, 두 지표 벡터 사이의 각도차를 이용하여 고 저항 사고를 구별할 수 있게 된다. 이와 같이 정의된 지표 변화율이 임계값보다 크게 되면 사고 가능성이 있다고 보고 카운터를 1 증가시킨다.

기준 3 - 계수의 상대 크기 변화

일반 부하의 증가에서는 전류와 계수의 증가 비율이 거의 같기 때문에 계수의 상대 크기의 변화가 거의 없게 되고, 비선형 부하의 증가에서는 오히려 계수의 상대 크기가 줄어 든다. 하지만, 고 저항 사고에서는 계수의 상태 크기가 큰 비율로 증가하게 되므로, 현재의 상대 크기를 기준이 되는 상대 크기로 나눈 값이 임계값 이상이 되면 사고 가능성이 있다고 보고 카운터를 1 증가시킨다.

4.5 사례 연구

본 논문이 제시한 알고리즘을 아래에 주어진 임계값 및 조건을 사용하여 사례에 적용했을 때, 사고 검출 여부 및 고 저항 사고 후 검출 시간을 구해 보면 표 5와 같다. 이를 통해 제시한 알고리즘이 고저항 사고와 부하 증가의 여부를 구별하여 고저항 사고 검출을 할 수 있음을 알 수 있다.

표 5. 사고후 사고 검출 시간(단위 : ms)

	마른 땅	모래 위	부하증가
R-L 부하	28.1	42.7	--
R-L, 컨버터	29.2	63.5	--
R-L, 아크로	36.5	76.0	

- 지표 변화율의 임계값 : 300
- 상대 크기 변화의 임계값 : 20
- 조건 : k = 8, l = 4, m = 4

5. 결 론

본 논문은 Wavelet 변환을 이용하여 22.9 kV 배전 계통에서 모의한 고 저항 사고 및 부하 증가의 사례을 분석하였고 이를 바탕으로 고 저항 사고 검출 알고리즘을 제안하였다. 사고 판별을 위한 기준으로는 전류 실효값 변화, 지표 변화율, 상대 크기의 변화를 사용하였으며, 제시한 알고리즘을 사례에 적용하여 고 저항 사고와 부하 증가를 구별하여 사고 검출을 할 수 있음을 알 수 있었다. 앞으로 커패시터 뱅크 투입, 아크로 부하 증가, 일반 사고 등 더 많은 사례에 적용하여 본 알고리즘의 타당성을 검증해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 남순열 외, "Wavelet 변환을 이용한 배전 계통의 고 저항 사고의 특성 분석", 대한전기학회 춘계학술대회, pp.64-67, 1997.
[2] Y. T. Chan, "Wavelet Basics", Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1995.
[3] 강용철 외, "EMTP를 이용한 배전 계통의 고 저항 사고 모델링", 대한전기학회 춘계학술대회, pp.72-75, 1997.