

Wavelet 변환을 이용한 방사상식 배전계통에서의 고장판별에 관한 연구

김경호\* 김남열 이종범  
원광대학교

Fault Types-Classification Technique in Radial Distribution System Using Wavelet Transform

Kyoung-Ho Kim,\* Nam-Yoel Kim, Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - It is important to catch or classify fault types by any detecting technique for distribution protection. This paper proposes the technique to classify the fault types using wavelet transform in radial distribution line. Modeling of the radial distribution line is simulated using PSCAD/EMTDC and wavelet transform is performed in the Matlab program.

1. 서 론

배전계통은 일반적으로 선로형태에 따라 방사상식, 수지식, 환상식 및 망상식 배전선로로 구분되고 있으며, 이 가운데 방사상식은 부하가 증설될 경우 쉽게 적용할 수 있는 가장 효율적인 형태이므로 우리 나라 배전계통에서 현재 널리 사용되고 있다.

배전계통은 전기설비가 전기수용가에 밀집되어 있으므로 고장 발생은 대규모 정전상태 뿐만 아니라 인명피해, 화재발생, 그리고 설비손상 등의 직접적인 문제를 발생시킬 수 있다.[1] 배전선로에서 빈번히 발생하는 고장에는 송전선로와 마찬가지로 1선지락, 2선지락 및 선간단락고장 등이 있고, 이런 고장들이 발생하였을 경우 고장 검출은 물론 고장의 종류가 어떤 것인가를 바로 판별할 수 있다면 보호 및 고장대책 수립에 매우 유용한 기술이 될 수 있다. 그러나 현재는 송전계통에서의 고장검출 및 고장점 추정에 대해서는 많은 논문이 많이 나와 있지만 배전계통에서의 연구는 매우 저조한 실정에 있다.

따라서 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 가공의 방사상 배전계통을 모델링 한 후 배전선로에서 실제로 발생될 수 있는 고장인 1선지락, 2선지락, 선간 단락고장 등을 모의하였고 여기서 얻은 고장신호로부터 Wavelet 변환을 이용하여 분석한 뒤 각각의 고장의 종류를 판별하는 기법을 제시하였다.

2. 배전계통 고장모의

2.1 배전계통모델

본 논문에서 사용되는 배전계통모델은 22.9(kV) 가공배전선로 계통에 부하가 연결된 방사상식 선로로 구성하였다. 모델계통은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 그림 1의 형태로 구성하였다.

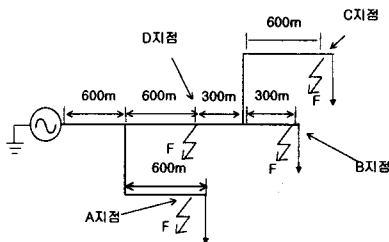


그림 1 방사상식 배전계통모델

2.1.1 가공배전선로의 모델

가공배전선로의 도체 배열은 수평배열이고 중성선과 가공지선을 모두 포함한 선로로 모의하였고 상도체는 ACSR 95 (mm<sup>2</sup>), 중성선은 ACSR 58(mm<sup>2</sup>)로 그리고 중성선은 300m마다 접지하였으며 접지저항은 각 개소마다 14(Ω)으로 하였다. 또 가공지선의 접지는 중성선에 일괄접지 하였다.[2](3)

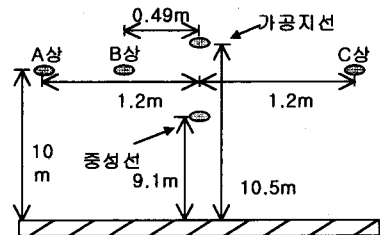


그림 2. 가공배전선로

2.2 고장유형 및 조건

본 논문에서 사용된 배전계통에서의 고장모의는 그림 1의 모델계통에 나타난 A, B, C, D 지점에서 A상의 1선지락 그리고 A, B상에서의 2선지락, 선간단락 고장을 각각 0°, 90°에서 발생시켜 고장유형판별에 사용될 고장전류 데이터를 전 원단에서 추출하였다. 고장 조건은 표 1에 나타내었다.

표 1 각 위치별 고장조건

| 고장 위치         | 고장 유형 | 고장 발생 위상 |
|---------------|-------|----------|
| A, B, C, D 지점 | 1선지락  | 0°       |
|               |       | 90°      |
|               | 2선지락  | 0°       |
|               |       | 90°      |
|               | 선간단락  | 0°       |
|               |       | 90°      |

3. 웨이블릿 분석

3.1 기존 신호분석과 웨이블릿 변환

신호 분석법에서 가장 널리 알려진 것이 푸리에 분석법이다. 이는 신호를 각각의 주파수 성분으로 분해하지만 그 주파수 성분의 발생시점에 관한 정보는 제공해 주지 않는다.[1][2]

그러나 Wavelet 변환은 Scale이 주파수에 따라 변화한다. 즉 시간-스케일 영역을 사용함으로써 가변윈도우 특성을 나타내므로 Low Scale에서는 High Frequency 성분을 나타내고, High Scale에서는 Low Frequency 성분을 나타내게 된다. 이처럼 Wavelet 변환은 Wavelet 모함수를 정의하고 이 모함수를 시간에 따른 크기 변형(Scaling)과 시간에 따른 지연(Shifting)을 통하여 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용함으로써 푸리에 변환과 STFT 변환의 단점을 해결하였다.[4]-[7]

3.2 웨이블릿 변환

Wavelet 변환은 마더 Wavelet을 Scale하고 Shift시켜 만들어진 가변 윈도우로 분석을 수행하게 되며 이들 가변 윈도우

우를 Wavelet이라 부른다. 마더 Wavelet  $\Psi_{a,b}(t)$ 은 대부분 짧고 진동적인 함수로서 평균값이 0이고 양쪽 끝에서 급격히 감쇄하는 형태를 갖는다.  $\Psi_{a,b}(t)$ 는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi_{a,b}\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, a는 Scale 성분을 나타내고 b는 Shift 성분을 나타낸다.

연속 Wavelet 변환(CWT)은 Wavelet 함수( $\Psi$ )의 Scale과 Shift에 의해 곱해진 신호의 모든 시간에 걸친 합으로 정의된다. CWT변환은 정확한 분석을 위한 필요에 의해 결정된 최대 Scale까지 모든 Scale까지 연속적으로 이동하면서 계산이 이루어지며, 신호  $f(t)$ 에 대한 연속Wavelet 변환은 다음 식 (2)와 같다.

$$CWT_{(f,a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

어떤 여러 단계의 Wavelet 변환을 수행하게 되면 많은 양의 데이터가 산출되고 분석시간도 길어지므로 문제가 된다. 따라서, 2의 역승 형태에 기초한 Scale과 Shift를 선택한다면 분석은 더욱 효율적으로 수행될 것이다. 이러한 분석은 이산 Wavelet 변환을 통해서 구현된다. 이산 Wavelet 변환  $D_{a,b}$ 는 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다(4)-(7).

$$DWT_{(s,m,n)} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k S[k] \Psi_{a,b}\left[\frac{n-ka_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3)$$

#### 4. 웨이블릿 변환을 이용한 고장신호분석

db4 마더 Wavelet을 사용한 이산 Wavelet 변환방법으로 64샘플링된 고장 전류 신호를 분석하였고, 각 상의 반주기에 해당하는 32샘플링 동안 d1계수들을 Matlab의 Wavelet 함수들을 사용하여 추출한 후 각 상별로 d1계수들의 절대값의 합을 구하여 고장유형 판별에 사용하였다.

##### 4.1 고장유형별 각 상의 d1계수 비교

그림 6,7,8에 고장유형별 각 상의 d1계수들을 나타내었다. 각 그림에서 알 수 있듯이 고장이 발생하기 전 정상상태에서는 d1계수들이 0의 값을 유지하고 있지만 고장이 발생한 순간 고장상에 해당하는 d1계수들은 큰 폭의 크기변화를 가지며 급격히 변화하는 것을 알 수 있다.

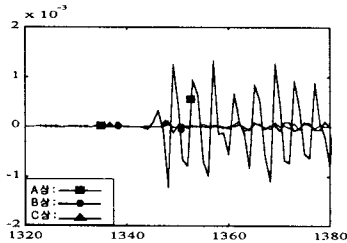


그림 3 1선지락시 각상별 d1계수 비교

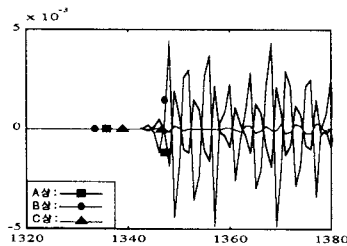


그림 4 2선지락시 각상의 d1계수비교

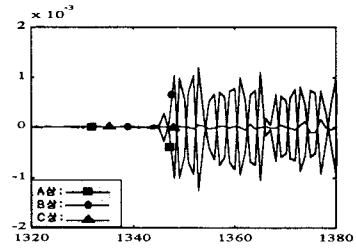


그림 5 선간단락시 각상의 d1계수비교

1선지락시 각 상의 d1계수를 나타내는 그림6에서는 고장상인 A상의 d1계수값이 변화를 보이고 나머지 상들은 미소한 변화를 보이고 있다. 그림 7은 2선지락시 각 상의 d1계수로 고장상인 A,B상의 d1계수가 변화를 보이고 c상의 d1계수는 거의 변화를 보이지 않고 있다. 그림 8의 선간 단락에서는 단락상인 A,B상의 계수가 대칭적으로 변화를 보이고 있으며 C 상의 d1계수는 변화를 보이고 있지 않는다. 이렇게 고장유형에 따라 각 상의 d1계수들은 특징을 갖게 되고 이를 이용하여 고장 유형판별을 시도하였다.

##### 4.2 고장유형별 3상의 d1계수 절대값의 합 비교

고장 판별을 위해서 사용한 값들은 고장신호의 반주기에 해당하는 32샘플 동안의 d1계수의 절대값을 합한 값을 Matlab의 abs와 sum함수를 사용하여 얻은 값들이다.

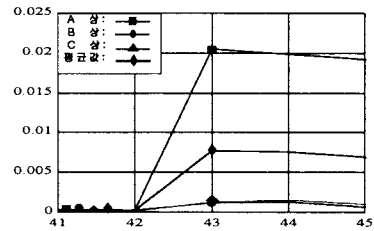


그림 6 1선지락시 sum(abs(d1))

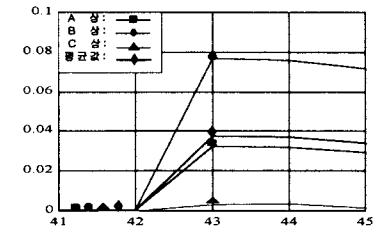


그림 7 2선지락시 sum(abs(d1))  
A상이 0° 일 때

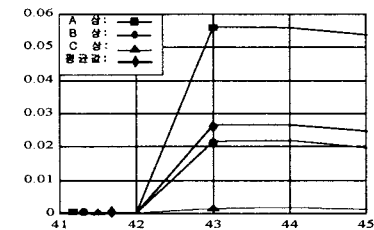


그림 8 2선지락시 sum(abs(d1))  
A상이 90° 일 때

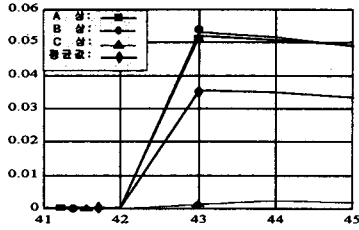


그림9 선간단락시 sum(abs(d1))

고장이 발생하면 반주기 동안의 각 상의 d1계수들의 절대값의 합을 도출한다. 이값을 S라 하고 각각 상별로  $S_a, S_b, S_c$ 라 한 뒤 이 값들의 평균을  $M_{(a,b,c)}$ 라 하였다.  $S_a, S_b, S_c$  값들은 그림 7,8,9에 나타난 것처럼  $M_{(a,b,c)}$ 보다 크거나 작은 값들을 갖게 된다. 그림 7,8,9는 고장유형에 따라 나타나는 각 상의 sum값과 그 값들의 평균값을 나타내는 그래프이다. 그래프에 나타난 값들은 고장시점에서 세 개값의 평균값을 중심으로 고장상과 그렇지 않은 상들과의 차이를 나타낸다.

### 4.3 고장유형 판별 알고리즘

그림 10은 고장유형별 d1계수 절대값의 합의 특징을 이용한 고장유형판별 알고리즘을 나타낸 것이다.

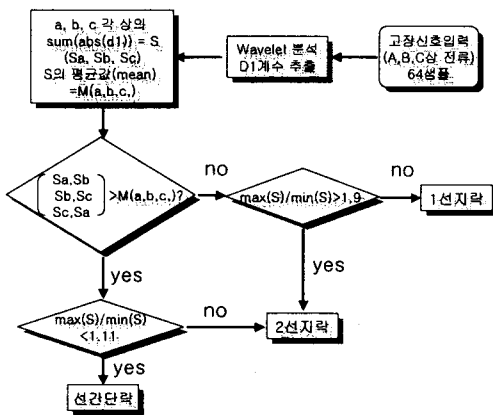


그림 10. 고장유형판별 알고리즘

먼저 고장이 발생하면 64샘플의 고장신호를 웨이블릿 분석하여 각상의 d1계수를 추출한다. 추출된 d1계수는 32샘플 간격으로 모두 합(S값)한 뒤 세 개상의 평균값 ( $M_{(a,b,c)}$ )을 구한다. 다음 식 (4), (5), (6)은 각 상의 S값 행렬과  $M_{(a,b,c)}$ 을 비교하여  $M_{(a,b,c)}$ 보다 큰 두 개의 S값을 찾는 것을 의미한다.

$$[ S_a, S_b ] \gg ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (4)$$

$$[ S_b, S_c ] \gg ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (5)$$

$$[ S_a, S_c ] \gg ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (6)$$

위 식 중 하나를 만족한다면 세 개의 값 중 2개의 값이 평균값보다 크다는 것을 의미하고, 위 식을 모두 만족하지 못하면 세 개의 S값 중 2개의 값이  $M_{(a,b,c)}$ 보다 작다는 결과의 미한다. 그러면 다음 식 (7),(8),(9)를 이용하여  $M_{(a,b,c)}$ 보다 작은 두 개의 S값을 찾는다.

$$[ S_a, S_b ] \ll ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (7)$$

$$[ S_b, S_c ] \ll ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (8)$$

$$[ S_a, S_c ] \ll ( M_{(a,b,c)}, M_{(a,b,c)} ) \quad (9)$$

만족하는 S값들을 찾으면 이전 S값들 중 작은 값에 대한 큰 값의 비율을 계산한다. 이 비율들이 마지막으로 고장유형을 판

별하는 중요한 수치가 된다. 1선지락고장에선  $S_a, S_b, S_c$  중 고장상의 값인  $S_a$ 를 제외한  $S_b, S_c$ 가 서로 비슷한 크기로 평균값 아래에 존재하게 되고 그 값들 중 큰 값과 작은 값을 서로 비교하면(최대/최소) 고장위치와 위상에 관계없이 모두 1.9를 넘지 못한다. 선간단락고장의 경우는  $S_a, S_b, S_c$  두 값들이  $M_{(a,b,c)}$ 위에 존재하고  $S_a, S_b$ 크기가 1선지락고장과 유사한 형태로 서로 비슷한 크기를 가져서 두값의 최대/최소 값이 1.11을 넘지 못한다. 2선지락고장의 경우는 고장상의 위상에 따라  $S_a, S_b, S_c$ 의 중간 값인  $M_{(a,b,c)}$  이하이거나 이상인 두 가지 경우를 가져 고장발생위상에 따라서 1선지락고장이나 선간단락고장 형태의  $S_a, S_b, S_c$ 를  $M_{(a,b,c)}$ 값을 중심으로 갖게 되지만 어떤 경우라도 두 개의 S의 최대/최소의 비가 1선지락고장이나 선간단락고장보다 더 큰 값을 갖기 때문에 다른 고장으로 부터 구분할 수가 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 방사상식 배전선로를 구성한 뒤 Wavelet 변환을 사용하여 고장 발생시 고장유형을 판별하였다.

- (1) 방사상식으로 배전계통을 구성하여 여러 지점에서 1선지락고장, 2선지락고장, 선간단락고장을 각각 0°와 90° 모의하였다.
- (2) 64샘플링한 각 상의 고장전류 신호를 Wavelet 변환을 통하여 분석한 뒤 각 상별로 D1계수 절대값을 32샘플 단위로 합을 구하여 각각  $S_a, S_b, S_c$ 라 하고 평균값을 구한 뒤  $M_{(a,b,c)}$ 라 한 뒤  $S_a, S_b, S_c$ 를  $M_{(a,b,c)}$ 와 크기를 서로 비교하였다.
- (3) 1선지락고장은  $M_{(a,b,c)}$  이하에 서로 비슷한 크기의 S가 존재하였고 고장상의 S는 다른 값들 중 최대값을 갖는다. 평균값 이하에 존재하는 두 개 S값의 최대와 최소의 비는 고장위치와 고장발생위상에 관계없이 1.9를 넘지 못한다.
- (4) 선간단락고장은 평균값 이상에 서로 비슷한 크기의 S 값들이 존재하였고, 이들 두 개의 S값들 중 최대와 최소의 비는 위치와 위상에 관계없이 1.11을 넘지 못한다.
- (5) 2지락고장은 1선지락고장이나 선간단락과 비슷한 형태로 S값들이 분포하지만 평균값 이하나 또는 이상에 S값이 두 개 존재하더라도 그 S 값들의 최대, 최소의 비는 1선지락과 선간단락에 비해서는 큰 값을 갖는다.
- (6) 위의 특징들을 이용하여 먼저 S의 평균값  $M_{(a,b,c)}$ 을 중심으로 1선지락고장과 2선지락고장 또는 2선지락고장과 선간단락고장에 해당하는지를 선별한 후 S의 최대/최소를 이용하여 1선지락고장과 2선지락고장을, 또는 2선지락고장과 선간단락고장을 구분해냈다.

이상의 고장유형판별에 관한 알고리즘은 모델계통에서 실시되었으므로 실제 방사상식 배전계통의 모델을 대상으로 여러 가지 고장유형의 판별에 대한 연구가 이루어지면 더 좋은 결과가 도출될 것으로 사료된다.

## (참 고 문 헌)

- [1] 정호성, 최상열, 김호준, 신명철, 이복구, 서희석, "퍼지신경망을 이용한 배전계통의 고장유형 판별 기법", 1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집, pp131-133, 1999
- [2] 홍동석, 이종범, "22.9kV 혼합배전선로의 뇌과전압 해석 및 중성선 유기 전압 해석", 2000년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp510-512, 2000
- [3] 전력연구원, "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구", 전력연구원, III, PP183-195, 1991
- [4] 김현, 김철환, "Wavelet 변환을 이용한 고저항 지락고장 검출", Trans. KIEE, Vol.48A, No.12, pp.1492-1497 DEC. 1999
- [5] 김현, "Wavelet 변환을 이용한 고저항 지락고장 고장거리 추정에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위논문 1999
- [6] 정재균, 홍동석, 이종범, "Wavelet 변환을 이용한 혼합 송전계통에서의 Fault Location", 대한전기학회 전력기술분부회 춘계학술대회 논문집, pp226-229, 2001
- [7] Wavelet Toolbox For Use with MATLAB