

지중송전계통에서 Wavelet 변환과 퍼지추론을 이용한 고장종류판별 및 고장점 추정에 관한 연구

論 文
55A-3-4

A Study on the Fault Discrimination and Location Algorithm in Underground Transmission Systems Using Wavelet Transform and Fuzzy Inference.

朴宰弘* · 李鍾範†
(Jae-Hong Park · Jong-Beom Lee)

Abstract - The underground transmission lines is continuously expanded in power systems. Therefore the fault of underground transmission lines are increased every year because of the complication of systems. However the studies dealing with fault location in the case of the underground transmission lines are rarely reported except for few papers using traveling wave method and calculating underground cable impedance. This paper describes the algorithm using fuzzy system and travelling wave method in the underground transmission line. Fuzzy inference is used for fault discrimination. To organize fuzzy algorithm, it is important to select target data reflecting various underground transmission line transient states. These data are made of voltage and average of RMS value on zero sequence current within one cycle after fault occurrence. Travelling wave based on wavelet transform is used for fault location. In this paper, a variety of underground transmission line transient states are simulated by EMTP/ATPDraw and Matlab. The input which is used to fault location algorithm are Detail 1(D1) coefficients of differential current. D1 coefficients are obtained by wavelet transform. As a result of applying the fuzzy inference and travelling wave based on wavelet transform, fault discrimination is correctly distinguished within 1/2 cycle after fault occurrence and fault location is comparatively correct.

Key Words : Fault Discrimination, Fault Location, Wavelet Transform, Fuzzy Inference

1. 서 론

최근 전력수요는 해마다 증가하고, 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 있으며, 여러 가지 환경적 요인으로 인해 지중 송전선로의 건설이 확대되고 있다. 그런데 지중송전선로는 가공송전선로에 비해 유지 보수가 곤란하며 고장시 고장종류판별, 고장점 탐지나 복구가 어려워 고장지속시간이 길다는 단점을 지니고 있다. 그러나 현재 국내외에서는 지중송전선로를 대상으로 진행과 이론을 이용한 고장점 추정과 임피던스 계산방법 등을 이용한 연구가 진행되고 있지만 그 결과는 미흡한 실정이다[1-3]. 또한 현재 보호계전기 분야에서는 디지털 계전기의 도입과 함께 소프트웨어에 따른 계전기 특성의 고도화가 가능하게 되어 다양한 산업분야에의 응용이 시험되고 있는 신경회로망과 퍼지이론을 활용한 적응형 계전이라는 새로운 개념이 검토되고 있다. 이전 여러 연구논문에서 고장검출, 고장종류판별 및 고장점 추정에 신경망과 퍼지이론을 적용한 사례가 있다. 퍼지 시스템은 애매함의 정성적 표현이 가능한 지능형 모델이다.

즉, 퍼지추론을 통해 각 규칙의 응답들에 근사한 출력을 발생하도록 계산한다. 이러한 이유로 인해 비선형 시스템에서 좋은 성능을 가지고 있으며 이러한 특성 때문에 지중송전선로에서 발생하는 고장 종류 판별이나 고장점도 정확하게 탐색할 수가 있는 가능성이 있다고 사료된다.

따라서 본 논문에서는 EMTP/ATPDraw를 이용하여 실제 지중송전선로를 모델링한 후 시뮬레이션 결과를 세밀히 분석하여 고장 발생시 고장후 한주기 전압 값과 영상전류 반주기 평균값을 목적 값으로 하는 퍼지 추론 이론을 이용하여 고장 종류를 판별하는 기법을 제안하였다. 고장종류판별은 케이블 구조상 단락 고장을 무시한 지락 고장에 대해서만 모의하였다. 또한 웨이블릿 변환을 이용하여 신호를 분석하고 고장시 발생하는 진행파를 이용하여 고장점 추정을 하였다.

2. 본 론

2.1 웨이블릿 변환 이론

신호를 다양한 주파수의 정현파로 분해하여 시간영역의 관점에서 주파수 영역으로 변환시키는 방법으로서 푸리에 분석은 가장 일반적인 신호분석 방법이지만, 주파수 영역으로 변환할 때 시간영역에 대한 정보가 소실된다는 단점을 가지고 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해 제안된 Short Time Fourier Transform(STFT)는 신호가 발생하는 주파수뿐만 아니라 시간에 대한 정보가 제공되지만, 일정한 윈도우의 크

† 교신저자, 正 會 員 : 圓光大學 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr

* 學生會員 : 圓光大學 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2005年 12月 16日
最終完了 : 2006年 2月 14日

기에서만 정밀도가 결정되는 단점이 있다.

2.1.1 연속 웨이브렛 변환 이론

연속웨이브렛 변환(CWT-Continuous wavelet transform)은 웨이브렛 함수(Ψ)의 스케일(Scale)과 쉬프트(Shift)에 의해 곱해진 신호의 모든 시간에 걸친 합으로 정의 된다. 연속웨이브렛 변환은 정확한 분석을 위한 필요에 의해 결정된 최대 스케일까지 모든 스케일에서 연속적으로 이동하면서 계산이 이루어지며 주어진 신호 $F(t)$ 에 대한 연속웨이브렛 계산식은 식 (1)과 같다.

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

2.1.2 이산웨이브렛 변환(DWT)

이산웨이브렛 변환(DWT-Discrete wavelet transform)은 Scale 요소와 Shift 요소를 이산화시켜 더욱 효율적으로 신호 분석을 수행할 수 있는 웨이브렛 변환으로 1988년 Mallet 에 의해 제안되었다. 웨이브렛 함수(Ψ)와 원신호 $S(t)$ 에 대한 이산 웨이브렛 변환의 계산식은 식 (2)와 같다.

$$DWT(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n S(t) \cdot \Psi\left(\frac{t - na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

여기서 a_0^m 은 Scale의 변수를 나타내고 na_0^m 은 Shift의 변수를 나타낸다. 이처럼 이산웨이브렛 변환은 스케일과 Shifting 요소를 이산화시켜 효율적으로 웨이브렛 분석을 수행할 수 있다.

실질적인 이산웨이브렛 변환의 수행은 각 스케일 범위에서 Approximation(A)과 Detail(D)의 연속적인 쌍을 포함한다. 일반적으로 Approximation은 신호에 대한 저주파 성분으로 신호의 고유한 특성을 나타내고, Detail은 신호에 대한 고주파성분으로 신호의 미세한 특성을 나타낸다.

그림 1에서는 웨이브렛 변환의 필터뱅크의 구성을 나타내었다. 그림에서처럼 원신호 S는 저역필터와 고역필터를 통해 분해되고 저역필터를 통과한 신호는 다시 고역필터와 저역필터를 통해 분해되며 이러한 과정은 원하는 신호를 얻을 때까지 반복하게 된다. 그림 1과 같이 여러 단계의 고역필터와 저역필터를 통해 분석한 이산웨이브렛 변환의 원신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

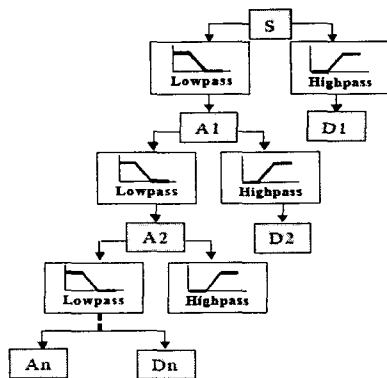


그림 1. 웨이브렛 필터 뱅크
Fig 1. Wavelet filter bank

$$S = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n + A_n \quad (3)$$

또한 이산웨이브렛 변환은 Downsampling 기법을 사용하여 필터를 통해 얻어지는 데이터양을 줄여서 계산을 신속하게 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Downsampling 기법은 고역필터(Highpass filter)와 저역필터(Lowpass filter)에 입력되는 데이터를 매 2번째 샘플점마다 통과시키는 원리이며, 웨이브렛 필터뱅크를 사용하는 이산웨이브렛 변환의 특성은 이처럼 Downsampling을 통해 얻어지는 낮은 연산량이다. 그림 2에서는 Downsampling에 의한 분해 과정을 나타내었다.

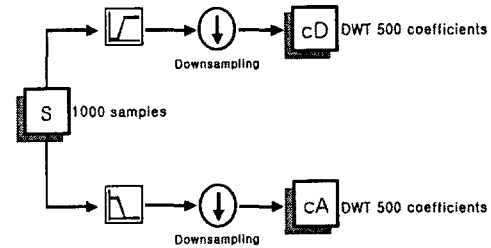


그림 2. Downsampling에 의한 분해 과정
Fig 2. Process of analysis to the downsampling

본 논문에서 사용된 마더 웨이브렛은 Daubechies 중 하나인 db4를 사용한 3단계 분석의 실행으로 얻은 detail 성분을 고장점 추정에 사용하였다. 이미 본 논문과 동일한 지중송전선로에서의 고장점 추정에 관한 논문에서 db4를 사용할 경우, 전압 및 전류 신호의 기수 고조파가 제거된 확실한 60Hz의 기본 성분만을 추출하여 고장점 추정에 적합하다는 것이 밝혀졌고 다른 보호계전 연구에서도 이미 db4의 적용이 적합하다는 것이 입증되었으므로 본 논문에서는 직접적인 증명은 생략하겠다.

2.2 퍼지시스템

고전적인 수치해석법에 바탕을 둔 시스템 모델링은 불확실성을 갖는 시스템에는 적합하지 않지만 퍼지 시스템은 애매하게 표현된 지식과 정보를 사용해 다른 정보를 찾아내는 방법으로 복잡성과 불확실성을 나타내는 비선형 시스템에서 다른 지능형 모델에 비해 보다 나은 성능을 가지고 있다 [6-7].

2.2.1 퍼지시스템의 구조

그림 3은 2개 입력, 2개 규칙을 갖는 선형 추론법을 그림으로 나타낸 것으로 입력 x와 y에 대한 결론부 파라미터 f 를 갖는 퍼지 시스템의 기본 구조를 나타내는 것으로서 식 (4)와 같은 규칙을 갖는다.

Rule R_i If x_1 is A_{i1}, \dots and x_k is A_{ik} ,
Then $y_i = f_i(x_i, \dots, x_k)$ (4)

여기서, R_i : i ($i = 1, \dots, n$)번째 규칙

- A_{ij} : 멤버쉽 함수
- x_j : 입력변수
- n : 퍼지규칙 총수

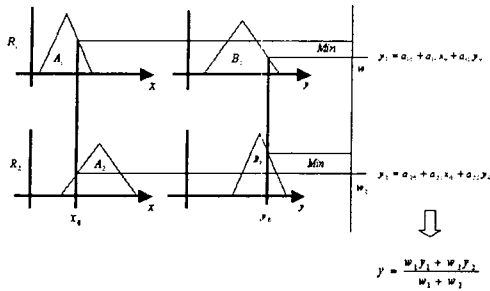


그림 3. 퍼지 시스템의 기본 구조
Fig 3. The basic architecture of fuzzy system

퍼지 시스템의 연산을 살펴보면 다음과 같다

- [단계 1] 규칙 i의 전반부 적합도 계산

$$w_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{in}}(x_n) \quad (5)$$

- [단계 2] 각 규칙의 추론 결과

$$y_i = w_i \times f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (6)$$

- [단계 3] 최종 추론 결과(비퍼지화)

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_1, \dots, x_n)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (7)$$

2.3 고장종류판별 알고리즘

2.3.1 입력 변수

퍼지 알고리즘의 입력으로 사용된 값은 전압에 대한 RMS 변화분과 고장후 반주기 영상전류 절대치의 평균값이다. 이는 전압에 대하여 식 (8)과 영상전류에 대하여 식 (9)를 거친 값이다.

$$\begin{aligned} V_{rms} &= V_{rms(a)} + V_{rms(b)} + V_{rms(c)} \\ V_{rms'} &= V_{rms(a')} + V_{rms(b')} + V_{rms(c')} \end{aligned} \quad (8)$$

$$X = \frac{V_{rms}}{V_{rms'}}$$

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{\sum_{k=1}^{32} abs((I_{a0}(k)))}{32} & I_{aa} &= abs \left(\frac{I_a - I_{average}}{I_{average}} \right) \\ I_b &= \frac{\sum_{k=1}^{32} abs((I_{b0}(k)))}{32} & I_{bb} &= abs \left(\frac{I_b - I_{average}}{I_{average}} \right) \\ I_c &= \frac{\sum_{k=1}^{32} abs((I_{c0}(k)))}{32} & I_{cc} &= abs \left(\frac{I_c - I_{average}}{I_{average}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $V_{rms(a)}$ 는 A상 전압의 1/2주기 RMS값, $V_{rms(b)}$ 는 B상 전압의 1/2주기 RMS값, $V_{rms(c)}$ 는 C상 전압의 1/2주기 RMS값, $V_{rms(a')}$ 는 1샘플 이동 후 A상 전압의 1/2주기 RMS값, $V_{rms(b')}$ 는 1샘플 이동 후 B상 전압의 1/2주기 RMS값, $V_{rms(c')}$ 는 1샘플 이동 후 C상 전압의 1/2주기 RMS값, I_a 는 반주기 A상 영상전류 절대치의 평균값, I_b 는 반주기 B상 영상전류 절대치의 평균값, I_c 는 반주기 C상 영

상전류 절대치의 평균값이다.

2.3.2 목표값 설정

목표값을 선정하기 위해서는 지중송전선로 과도상태의 특징을 반영하는 소속함수의 선정이 매우 중요하다. 입력 X에 상응하는 소속함수는 전압에 대한 특성 분석식인 식 (8)을 통하여 얻어지게 된다. 특성분석식을 거친 입력 X 값은 1선지락 고장인 경우 1, 2선지락 고장인 경우 3, 3선지락 고장인 경우 5의 값을 갖는다. 입력 Y에 상응하는 소속함수는 전류에 대한 특성분석식인 식 (9)를 통하여 얻어진다. 특성 분석식을 거친 입력 Y는 1선지락 고장인 경우 1, 2선지락 고장인 경우 3, 3선지락 고장인 경우 5의 값을 갖는다. 이러한 특징을 반영하도록 소속함수를 구성한다.

2.4 고장점 추정 알고리즘

2.4.1 진행파 이론

지중송전계통에서 고장발생시 고장점에서 발생한 진행파는 신호가 양 S/S로 진행하여 양 S/S에서 투과와 반사가 되고 반사된 신호는 다시 고장점에서 반사되는 진행파의 특성을 가지고 있다. 지중선로에서 고장 발생시 진행파의 흐름을 그림 4의 다이어그램에서 볼 수 있듯이 A모선에서 반사되는 진행파는 고장점에서 반사되는 것으로 이들의 지연 시간을 분석하여 고장점까지의 거리를 계산할 수 있다.

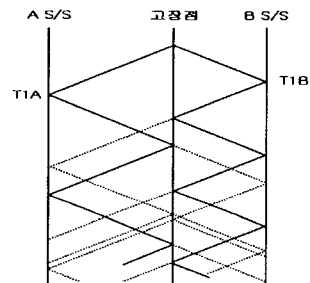


그림 4. 지중송전선로 고장시 Lattice Diagram
Fig 4. Lattice diagram on the fault at the underground transmission line

2.4.2 Fault Location 식

본 논문에서는 fault location 식을 지금까지 가공송전선로에서 사용되어지는 식을 적용하였다. Fault location 식은 식 (10) 과 식 (11) 과 같다.

$$D_A = \frac{l + |T1A - T1B| \cdot v}{2} \quad (10)$$

$$D_B = \frac{l - |T1A - T1B| \cdot v}{2} \quad (11)$$

여기서, $D_{A,B}$: A, B S/S로부터의 고장점 거리

l : 선로 총 길이, v : 진행파 속도

$T1A, T1B$: A, B S/S에 진행파 도착 시간

2.5 지중송전계통 모델링 및 모의

본 논문에서는 지중송전선로를 EMTP/ATPDraw를 이용해 모델링하여 고장종류 판별 및 고장점을 추정하는 알고리

증을 제안하고 있다. 그림 5는 본 논문에서 모델링한 지중송전선로 계통도를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 전원은 154kV 양단 전원이며, 7km 길이의 지중송전선로이다. 지중송전케이블은 XLPE 1,200[mm²]이며 전력구 방식의 정삼각배열로 포설되어 있다. 고장종류 판별의 경우에는 1km, 2km 및 3km 지점에서 1선지락, 2선지락, 3선지락을 모의하였고, 고장점 추정은 1km, 2km, 3km, 4km, 5km 지점에서 1선지락을 모의하였다. 고장의 형태는 케이블 도체가 시스와 접촉해 절연이 파괴되어 지락 고장이 발생하는 고장 형태를 모의하였다.

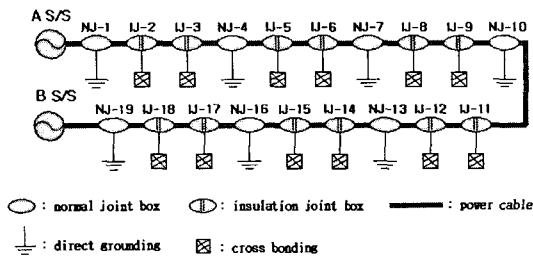


그림 5. 지중송전선로의 모델계통

Fig 5. Model of underground transmission systems

표 1과 표 2는 각각 A S/S와 B S/S의 전원 임피던스를 나타내고 있다.

표 1. A S/S 전원 임피던스

Table 1. Source impedance of A S/S

전원 임피던스	R[Ω]	X[Ω]
영상	1.19765	5.9123988
정상	0.332024	2.687
역상	0.332024	2.687

표 2. B S/S 전원 임피던스

Table 2. Source impedance of B S/S

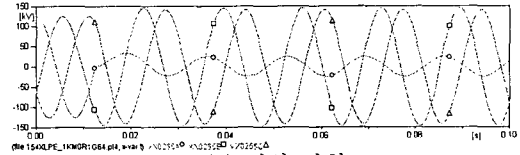
전원 임피던스	R[Ω]	X[Ω]
영상	1.256948	5.97406
정상	0.34625	2.867264
역상	0.34625	2.867264

2.5.1 지중송전계통 모의 결과

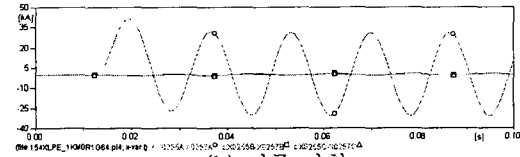
본 논문에서는 지중송전선로에서의 고장 종류 판별을 위해서 1km, 2km, 3km 지점에서 고장을 발생시켰고, 고장 종류는 케이블 구조상 지락만을 모의하여 1선지락, 2선지락, 3선지락 고장을 모의하였으며 전압, 전류 데이터를 사용하였다. 고장 발생각은 0°, 90°로 하였다. 또한 고장점 추정을 위해서는 1km, 2km, 3km, 4km, 5km 지점에서 1선지락 고장을 모의하여 전류 데이터를 웨이브렛 변환에 이용하였다. 고장 발생각은 0°, 45°, 90°로 하였으며, 고장 저항은 지중선로에서는 도체가 시스와 접촉해 절연이 파괴되어 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의한 것으로 고려하지 않았다.

지중송전선로 모델링에 의한 1km 지점에서 고장발생각

0°, 90°로 1선지락, 2선지락, 3선지락의 고장 파형을 그림 6~그림 11에 나타내었다. 1km 지점에서의 파형들을 비교해보면 0° 고장일 경우보다 90° 고장일 경우가 더 많은 고조파를 함유하고 있음을 알 수 있다.



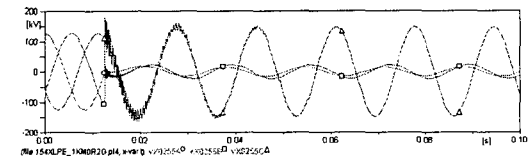
(a) 전압 파형



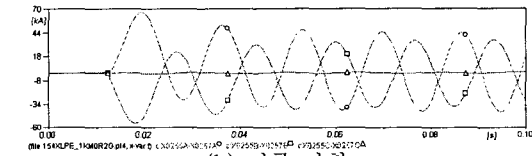
(b) 전류 파형

그림 6. 1km 지점에서의 1선지락 고장파형(고장발생각:0°)

Fig 6. Single line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 0°)



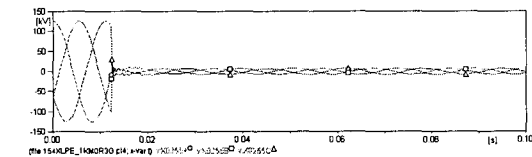
(a) 전압 파형



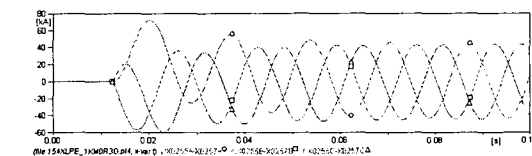
(b) 전류 파형

그림 7. 1km 지점에서의 2선지락 고장파형(고장발생각:0°)

Fig 7. Double line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 0°)



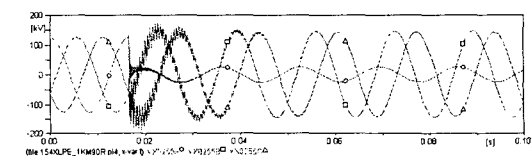
(a) 전압 파형



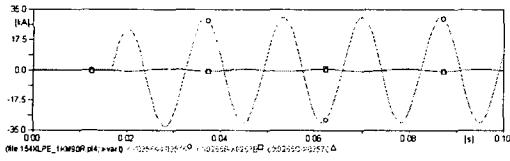
(b) 전류 파형

그림 8. 1km 지점에서의 3선지락 고장파형(고장발생각:0°)

Fig 8. Three line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 0°)

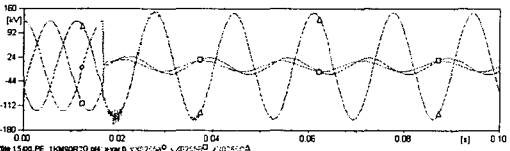


(a) 전압 파형

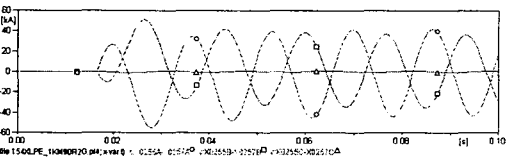


(b) 전류 파형

그림 9. 1km 지점에서 1선지락 고장파형(고장발생각:90°)
Fig 9. Single line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 90°)

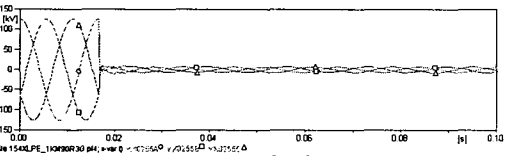


(a) 전압 파형

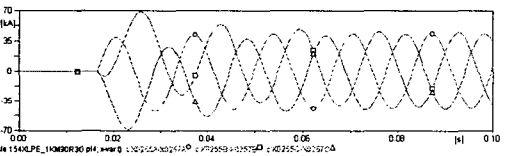


(b) 전류 파형

그림 10. 1km 지점에서 2선지락 고장파형(고장발생각:90°)
Fig 10. Double line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 90°)



(a) 전압 파형



(b) 전류 파형

그림 11. 1km 지점에서 3선지락 고장파형(고장발생각:90°)
Fig 11. Three line-to-ground fault waves at 1 km distance(Inception angle : 90°)

2.5.2 직류 옵셋 제거

퍼지 알고리즘의 입력으로 사용되는 전류신호는 직류 성분을 제거하는 FIR 필터를 거치게 되며 신호의 에러 요소로 작용하는 DC성분이 제거된다. 여기에서 사용된 DC offset 필터는 직류 성분을 상수로 가정한 것으로 일정 윈도우내의 입력파형은 식 (12)와 같이 표현될 수 있다. 한 샘플씩 옮겨감에 따라 옵셋의 크기 c는 변하게 된다. 이때 직류성분은 식 (13)에 의해 제거된다.

$$x_k = X_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + C \quad (12)$$

여기서, c는 상수, N은 주기당 샘플링 수, n은 고조파 차수이다.

$$y_k = x_k - x_{k-m} \quad (13)$$

여기서, m은 필터 윈도우의 크기이다.

식 (12)의 파형을 식 (13)와 같은 필터에 통과시키면 그 출력은 식 (14)과 같다.

$$y_k = \sum_{n=1}^{\infty} X_n a_N \sin\left(\frac{2\pi nk}{N} + \phi_n\right) \quad (14)$$

여기서,

$$a_N = \sqrt{E_N^2 + F_N^2} \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{F_N}{E_N}\right)$$

$$E_N = 1 - \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \quad F_N = \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \text{ 이다.}$$

2.5.3 영상전류 추출

본 논문에서는 고장 종류 판별을 하기위해서 퍼지추론을 사용하였다. 이 퍼지 추론 알고리즘의 목적 값으로 고장후 한주기 전압 값과 고장후 반주기 영상전류 절대치의 평균값을 사용하였다. 표 3은 고장후 한주기 영상전류 절대치의 평균값을 고장거리, 고장발생각별로 나누어 나타낸 것이다.

표 3. 고장후 반주기 영상전류 절대치의 평균값
Table 3. Average of RMS on zero sequence current after fault

	1선지락[A]		2선지락[A]		3선지락[A]	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1km	508.34	493.80	387.82	373.84	0.0018	0.0017
2km	508.34	487.28	383.50	369.70	0.0011	0.0011
3km	504.35	483.58	380.62	365.30	0.0010	0.0009

2.5.4 웨이브렛 변환

고장점 추정을 위하여 EMTP/ATPDraw를 이용하여 지중송전계통 모델링으로 거리별 1선지락 전류 파형을 얻어 이것을 이산 웨이브렛 변환하여 detail 성분을 얻었다. detail 성분을 얻기 위한 마더 웨이브렛으로는 db4를 사용하였다.

그림 12~그림 13은 A S/S와 B S/S에서의 4km 고장 거리에서 고장 발생각 90°에서의 고장 전류 신호를 웨이브렛 변환한 detail 성분을 나타낸 것이다.

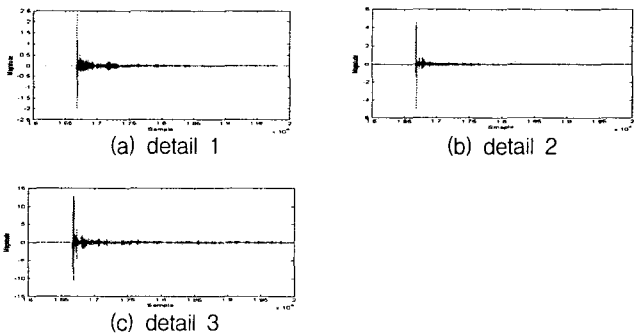


그림 12. A S/S에서의 이산 웨이브렛 변환 결과 (4km, 90°)
Fig 12. Decomposition result using DWT of A S/S (4km, 90°)

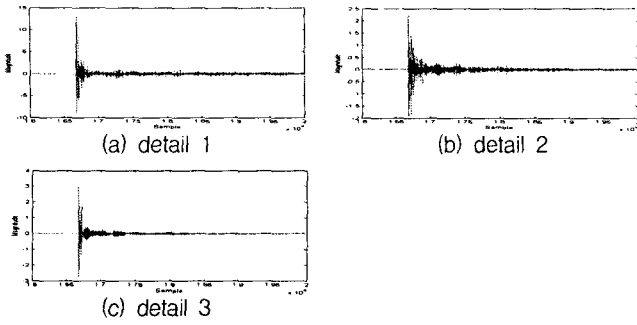


그림 13. B S/S에서의 이산 웨이브렛 변환 결과 (4km, 90°)
 Fig 13. Decomposition result using DWT of B S/S (4km, 90°)

그림 14는 detail 1의 첫 번째 피크치를 계산하기 위하여 그림 12와 그림 13의 detail 1을 확대한 것이다.

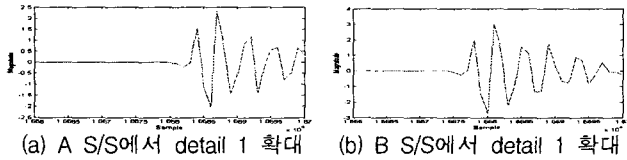


그림 14. detail 1 확대 (4km, 90°)
 Fig 14. Zoom in detail 1 (4km, 90°)

그림 14에서 보는 것과 같이 첫 번째 피크치를 계산함으로써 각 S/S에 진행파의 도착 시간을 알 수 있다. 이 S/S에 도착하는 진행파의 시간차에 의해서 고장점을 추정할 수 있다.

2.5.5 고장종류판별 결과

고장후 한주기 전압 값과 고장후 반주기 영상전류 절대치의 평균값을 목적 값으로 하여 고장종류판별을 하였다. 고장 종류는 케이블의 구조적인 특성으로 단락 고장을 제외한 지락고장만을 모의하였다. 그림 15~그림 16에서는 고장위치, 고장각에 따른 고장종류판별 결과를 나타낸 것이다. 퍼지 추론을 이용하여 각 고장별로 특정한 값을 출력하도록 하였다.

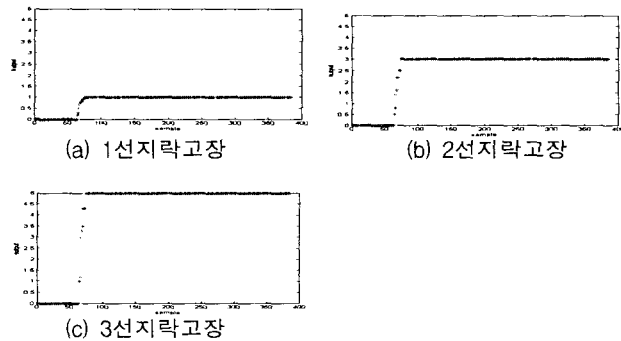


그림 15. 고장 종류 판별 결과 (1km, 0°)
 Fig 15. The result of fault discrimination (1km, 0°)

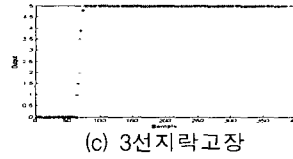
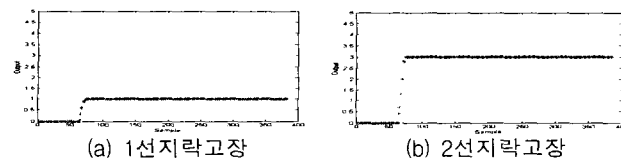


그림 16. 고장 종류 판별 결과 (1km, 90°)
 Fig 16. The result of fault discrimination (1km, 90°)

표 4는 고장종류판별 결과를 거리, 고장발생각별로 나타낸 것이다.

표 4. 고장종류판별 결과
 Table 4. The result of fault discrimination

고장거리	위상각	1선지락		2선지락		3선지락	
		Sample	시간[s]	Sample	시간[s]	Sample	시간[s]
1km	0°	10	0.0026	12.5	0.00325	7	0.00182
	90°	9	0.00234	12	0.00312	6	0.00156
2km	0°	12	0.00312	15	0.0039	10	0.0026
	90°	11	0.00286	14	0.00364	8	0.00208
3km	0°	15	0.0039	18	0.00468	11	0.00286
	90°	13	0.00338	15	0.0039	10	0.0026

2.5.6 고장점 추정 결과

고장 데이터는 1[MHz]로 샘플링 하였으며 진행파 속도는 1.67486×10^5 [km/sec]이다. 또한 고장을 0°, 45°, 90°로 각각 분리하였으며, 고장 거리를 1km, 2km, 3km, 4km, 5km로 하여 1선지락을 모의하였다. 4km, 90° 고장일 경우 고장점 추정은 A S/S와 B S/S에 도착한 진행파 샘플링 차이는 8 sampling이므로 이것을 식 (10)과 식 (11)에 대입하면 구할 수 있다.

$$D_A = \frac{7 + |0.000008| \cdot 1.67486 \times 10^5}{2} = 4.17 [km]$$

$$D_B = \frac{7 - |0.000008| \cdot 1.67486 \times 10^5}{2} = 2.83 [km]$$

4km, 90° 고장일 경우 고장점 추정 거리는 A S/S로부터 4.17 [km] 지점, B S/S에서부터 2.83 [km]임을 알 수 있다. 표 5는 거리, 고장발생각별 고장점 추정 결과를 나타낸 것이다. 표 5에서 오차는 다음 식 (15)을 이용하여 계산하였다.

$$오차 = \frac{|실제고장거리 - 추정거리|}{지중송전선로총길이} \times 100[\%] \quad (15)$$

표 5. 고장점 추정 결과

Table 5. The result of fault location

고장거리	고장발생각	$\ (T1A-T1B)\ $ [s]	추정거리[km]	오차 [%]
1km	0°	0.000029	1.071	1.01
	45°	0.00003	0.987	0.18
	90°	0.000029	1.071	1.01
2km	0°	0.00002	1.825	2.5
	45°	0.000019	1.908	1.31
	90°	0.000017	2.076	1.08
3km	0°	0.000008	2.830	2.42
	45°	0.000008	2.830	2.42
	90°	0.000005	3.081	1.15
4km	0°	0.000005	3.918	1.17
	45°	0.000007	4.086	1.22
	90°	0.000008	4.17	2.42
5km	0°	0.000014	4.852	2.11
	45°	0.000014	4.852	2.11
	90°	0.00002	5.175	2.5

표 5에서 보는 것과 같이 웨이브렛 변환과 양단 S/S에서 진행파를 이용한 고장점 추정 거리가 비교적 좋은 결과치를 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 지중송전계통에서 퍼지 추론을 이용한 고장종류판별과 웨이브렛 변환과 진행파 이론을 이용한 고장점 추정 방법을 제시하였다. 본 연구의 진행과정과 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) EMTP/ATPDraw를 이용하여 지중송전계통을 시뮬레이션한 후 고장특성을 세밀히 분석하였으며, DC필터를 적용하여 직류성분을 제거하고 웨이브렛 변환을 적용하여 과도신호의 고조파 성분을 분석하였다.
- (2) 고장종류판별을 위해 목적 값을 고장후 전압 값과 고장후 반주기 영상전류 절대치의 평균값으로 하는 퍼지 추론을 구현하였고, 선형추론법을 이용한 시스템을 이용하여 정확한 고장종류판별을 하였다.
- (3) 지중송전계통 고장점 추정을 위해 1선지락 고장전류 신호를 이산 웨이브렛 변환 하였고 detail 1 성분을 이용하여 양 모선에 진행파가 도착하는 시간을 계산하였다.
- (4) 웨이브렛 변환과 진행파 이론을 이용하여 계산된 양 모선에 진행파가 도착하는 시간차를 이용하여 고장점 추정을 한 결과 비교적 좋은 고장점 추정 거리를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-274) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 정재균, 이종범, 윤양용, "혼합송전계통에서 웨이브렛 변환을 이용한 고장점 탐색 알고리즘에 관한연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 51, No. 5, pp. 247~254, 2002
- [2] 전력계통 보호계전 시스템 기술 조사전문 위원회, "전력계통 보호계전 시스템 기술의 현황과 전망", 기술조사보고, 제 14호, 1999
- [3] W.A.Wilinson, M.D. Cox, "Disrete Wavelet Analysis of Power System Transient", IEE Transaction on Power Systems, vol. 11, No. 4, Nov., 1996
- [4] 홍동석, 이종범, "웨이브렛 변환을 이용한 변압기 보호계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 52A., No. 2, pp. 134~141, 2003
- [5] Martin, "Wavelet and Filter Banks : Theory and Design", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207~2232, 1992
- [6] 오성권, "프로그래밍에 의한 컴퓨터지능", 내하출판사, 2002
- [7] 오성권, "C프로그래밍에 의한 퍼지모델 및 제어시스템", 내하출판사, 2002
- [8] Turan Gonen, "Electrc Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [9] KEPRI "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구", 1991
- [10] 이준성, 이종범, 김 영, "방식층 보호장치의 설치에 따른 지중송전케이블 시스템 유기전압 해석", 대한전기학회 논문지, pp. 19~25, 2000
- [11] Wavelet Toolbox For Use with MATLAB, 2000

저 자 소 개



박재홍 (朴宰弘)

1977년 6월 17일 생. 2004년 원광대 공대 전기전자공학부 졸업. 2004년~현재 동 대학원 석사과정.

Tel : (063)850-6735

E-mail : p6522@wonkwang.ac.kr



이종범 (李鍾範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987~1990년 한국 전기연구원 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원 교수. 현재 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수.

Tel : (063)850-6735

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr