

# Low Impedance Fault 검출을 위한 최적 마더 웨이브렛의 선정

\*변성현 \*김철환 \*\*김일동 \*\*한경남

\*석규과대학교 전기공학관 \*\*한국전력공사 전력연구원

## Selection of mother wavelet for Low Impedance Fault Detection

\*S.H.Byun \*C.H.Kim \*\*I.D.Kim \*\*K.N.Han

\*Sung Kwon Kwan University \*\*Korea Electric Power Research Institute

### (Abstract)

This paper introduces wavelets and shows that they may be efficient and useful for the detection of general faults in power system. The wavelet transform of a signal consists in measuring the "similarity" between the signal and a set of translated and scaled versions of a "mother wavelet". The "mother wavelet" is a chosen fast decaying oscillation function. A number of mother wavelet for signal analysis have been proposed and some of them are in use in fault detection. However, the performance of fault detection depend on used mother wavelet. In the present paper a comparative evaluation of different mother wavelets for low impedance fault detection is performed. The discussion is focused in well-known mother wavelet based wavelet transform. Several families of wavelets are used to analyse transient earth fault signals in a 345kV model system as generated by EMTF.

### 1. 서 론

최근 전력계통의 비주기적인 과도현상을 분석하기 위한 새로운 방법으로서 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)이 제시되고 있다. 신호처리 분야에 사용되는 푸리에 변환은 신호를 여러 주파수들을 가진 cosine 함수의 정현파로 분해한다. 주파수 영역으로 변환시 시간정보를 소실하므로 특정한 사고의 발생시점을 알 수 없다. 이것은 stationary 신호에서는 문제가 되지 않으나 전력계통의 과도신호는 nonstationary 또는 과도 특성을 갖기 때문에 문제가 된다.

이러한 단점을 해결하기 위해 신호를 시간과 주파수의 2차원 함수로 분석하는 Short-Time Fourier Transform(STFT)이 제시되었다. STFT는 사고 신호가 어떤 주파수에서 어느 순간에 발생되었는지에 관한 정보를 제공한다. 그러나, STFT는 신호를 일정한 크기의 해석 윈도우를 사용하여 분석하기 때문에 윈도우의 크기에 의해서 결정되는 제한된 범위의 정보만을 제공할 뿐만 아니라 빠른 과도파형과 정현파형이 같이 존재하는 신호에 대해서는 적합한 분석방법이 되지 못한다.

반면, 웨이브렛 변환은 웨이브렛 원형함수(mother wavelet)를 정의하고 원신호와 마더 웨이브렛을 비교하여 그 유사성을 측정함으로써 수행된다[1, 2]. 가변적인 윈도우를 얻으려면 이 원형함수를 time scaling과 time shift를 통해서 원신호와 비교하여 그 유사성을 계수값의 크기로 나타내며 다양한 웨이브렛 신호를 분해한다. 즉, 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용하여 STFT의 단점을 해결하였다. 웨이브렛 변환은 높은 주파수 대역에서는 해상도가 낮고, 낮은 주파수 대역에서는 해상도가 높은 분해 특성을 나타낸다[3, 4]. 따라서 저주파수 정보를 정확하게 원하는 곳에서는 긴 윈도우를 사용하고 고주파수 정보를 원하는 곳에서는 짧은 시구간을 사용하므로써 정확한 분석이 가능하다. 따라서, 최근 영상신호 해석, 레이더, 음향 및 음성처리등의 여러 분야에서 이에 대한 연구가 활발하다.

그러므로, 푸리에 해석과 달리 시간정보를 얻을 수 있는 웨

이브렛 변환은 전력계통의 고장검출등의 보호계전 분야에 널리 적용가능하다. 웨이브렛 변환은 시간과 주파수 영역에 대하여 다중분해특성을 가지므로 전력계통신호에 대하여 기본과 성분의 정보를 유지하면서 과도요소의 정확한 위치를 검출할 수 있다[5~8].

웨이브렛 분석에 사용되는 웨이브렛 원형함수에는 Haar, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Mexican Hat 및 Meyer등 많은 종류가 있다. 전력계통의 1선지락 고장, 2선지락 고장, 선간단락 고장등 low impedance fault 검출시 고장검출 성능은 적용된 웨이브렛 원형함수의 영향을 받는다. 그러나, 현재까지 이에 관한 연구는 제시되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 EMTF를 이용하여 모의된 모델계통의 사고데이터에 마더 웨이브렛을 변화시키면서 고장검출 성능을 분석하므로써, 전력계통의 일반적인 고장 검출에 적절한 마더 웨이브렛을 제시하고자 한다.

### 2. 웨이브렛 이론

#### 2.1 마더 웨이브렛

마더 웨이브렛  $h(t)$ 는 대부분 짧고 진동적인 함수로서 평균값이 0이고 양쪽끝에서 급격히 감쇄하는 형태를 갖는다. 대표적인 마더웨이브렛의 종류와 특성은 다음과 같다.

① Haar 웨이브렛 : 최초의 웨이브렛이자 가장 간단한 형태의 웨이브렛으로서 불연속적인 step function과 유사한 모양이다. Orthogonal한 형태이며 비대칭성을 나타낸다.

② Daubechies 웨이브렛 : Ingrid Daubechies가 이산 웨이브렛 변환을 실용화할 수 있도록 만든 웨이브렛이고 가장 널리 사용된다. Orthonormal한 형태의 웨이브렛으로 비대칭성을 나타낸다.

③ Biorthogonal 웨이브렛 : 신호와 이미지의 합성을 위해 필요한 선형위상특성을 보여준다. 분해를 위한 웨이브렛과 합성을 위한 웨이브렛의 두 가지 웨이브렛이 동시에 사용되며 대칭적인 특성을 나타낸다.

④ Coiflets 웨이브렛 : Daubechies 웨이브렛을 대칭에 가깝도록 변형시킨 웨이브렛이다.

⑤ Symlets 웨이브렛 : Daubechies 웨이브렛을 거의 대칭적으로 변형시킨 웨이브렛이다.

웨이브렛은 마더 웨이브렛  $h(t)$ 를 scaling과 shift시켜 얻어진 함수들의 집합  $h_{a,b}(t)$ 이며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$h_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t-b}{a}\right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

$a$  : scaling 요소로서 마더 웨이브렛을 팽창 또는 압축시킴

$b$  : shift 요소로서 마더 웨이브렛을  $t$ 만큼 지연시킴을 의미한다.

#### 2.2 웨이브렛 변환의 수행과정

연속 웨이브렛 변환,  $C_{a,b}$ 는 다음 식 (2)와 같이 표현되며, 웨이브렛 변환의 수행과정은 다음과 같다.

$$C_{a,b}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot h_{a,b}(t) dt \dots\dots\dots (2)$$

- ① 마더 웨이블릿을 결정한 후 분석할 원신호의 시작점에서 원신호와 마더 웨이블릿을 비교한다. 비교되어 나온 계수값  $C_{a,b}(t)$ 는 원신호의 한부분과 마더 웨이블릿이 얼마나 유사한지를 나타낸다. 따라서  $C_{a,b}(t)$ 값이 클수록 서로 유사한 형태임을 알 수 있다.
- ② 분석할 신호의 끝부분까지 오른쪽으로 shift시키면서 계수값  $C_{a,b}(t)$ 를 계산한다.
- ③ 마더 웨이블릿을  $a$ 의 최대값까지 scaling시키면서 각각의  $a$ 값에 대해 두 번째 과정을 반복한다.

**2.3 이산 웨이블릿 변환과 다분해능 웨이블릿 변환**

연속 웨이블릿 변환은 분석할 웨이블릿의 개수가 무한히 많아진다는 단점이 있으므로 이를 해결하기 위해서 scaling 요소와 shift 요소를 이산화 시킨 이산 웨이블릿 변환  $D_{a,b}$ 는 다음 식 (3)과 같다.

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^n}} \sum_n [S]n \cdot h \left[ \frac{k-na_0^n}{a_0^n} \right] \dots\dots\dots (3)$$

2의 멱승형태에 기초한 scaling과 shift를 사용하면 분석은 더욱 효율적이고 정확하게 수행될 수 있다. 이러한 분석방법을 dyadic wavelet transform이라 한다. 이산 웨이블릿의 수행 과정은 고차필터와 저차필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장된다. 이산 웨이블릿변환은 원신호 S를 고차필터와 저차필터로 분해하는 과정이다. 다분해능은 여러 개의 고차필터( $cD_1, cD_2, cD_3, \dots, cD_n$ )와 저차필터( $cA_1, cA_2, cA_3, \dots, cA_n$ )로 구성된 필터뱅크로서 웨이블릿 변환을 반복하는 과정이다. 원신호 S는 다음 식 (4)와 같이 재구성될 수 있으며,

$$S = cD_1 + cD_2 + cD_3 + cD_4 + \dots + cD_n + cA_n \dots\dots\dots (4)$$

이때 각 필터링을 통해서 얻어지는 데이터의 양을 감소시켜 계산을 신속하게 수행하기 위하여 Downsampling한다.

**3. 시뮬레이션 및 마더 웨이블릿 선정**

전력계통의 효율적인 low impedance fault 검출을 위해 사고신호의 파형과 가장 유사한 형태의 마더 웨이블릿을 선택하면 웨이블릿 변환시 큰 계수값이 얻어지므로 사고판별을 위한 명확한 기준이 된다. 본 연구에서는 Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet등의 마더 웨이블릿을 사고데이터에 적용하여 분석하므로써 최적의 마더웨이블릿을 선정하였다.

**3.1 모델계통**

그림 1과 같이 선로의 양단에 각각 10[GVA]와 7[GVA]의 전원을 갖는 60[Hz], 345[kV]의 모델계통을 EMTP에서 모의하였다. 100[km] 선로의 좌측 2[km] 지점에서 0° 1선지락 사고와 90° 1선지락 사고를 발생시켰으며 주기당 64회의 샘플링을 하였다.

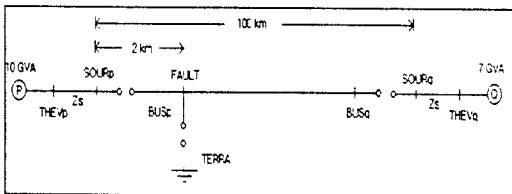


그림 1. 345[kV] 모델 계통도

**3.2 시뮬레이션 결과**

모델계통의 사고 데이터에 총 21개의 마더 웨이블릿을 적용시켜 고장검출 성능을 비교하였다. 또한, 사고의 종류는 1선지락 고장, 2선지락 고장 및 선간단락 고장등을 0°, 90° 로 고장발생각을 변화시켜 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

**A. 1선지락 고장 발생시 고장전압 (고장 발생각 0°)**

모델계통에서 1선지락 고장 발생시 고장전압 데이터를 이용하여 Haar 마더 웨이블릿 및 db4 마더 웨이블릿을 적용한 고장검출 결과는 각각 그림 2, 3과 같다.

그림에서 S는 원신호를 나타낸다. 마더 웨이블릿을 사용하여 고차필터를 통과한 원신호는 d1이고 저차필터를 통과한 원신호는 a1이다. 또한 a1은 마더 웨이블릿을 scaling하여 고차필터 d2와 저차필터 a2로 표시된다. 그러므로, 고장검출 목적으로 관찰하여야 하는 웨이블릿의 계수는 d1이다.

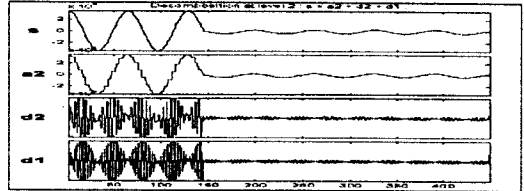


그림 2. Haar 마더 웨이블릿의 결과

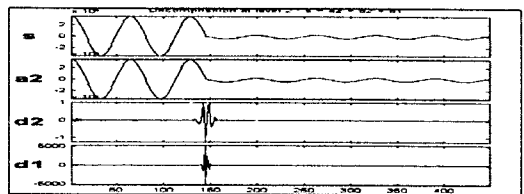


그림 3. db4 마더 웨이블릿의 결과

**B. 1선지락 고장 발생시 고장전류 (고장 발생각 0°)**

그림 4, 5는 고장 발생각 0°의 고장이므로 많은 DC-offset 성분을 보여주며, 그림 5의 db4 마더 웨이블릿을 사용한 고장검출이 더욱 우수함을 알 수 있다.

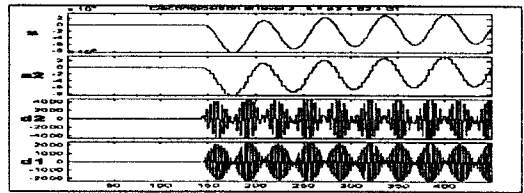


그림 4. Haar 마더 웨이블릿의 결과

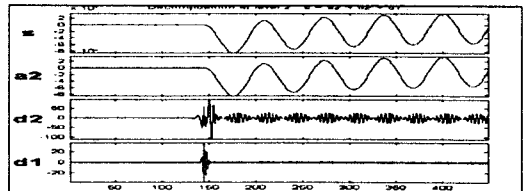


그림 5. db4 마더 웨이블릿의 결과

**C. 1선지락 고장 발생시 고장전압 (고장 발생각 90°)**

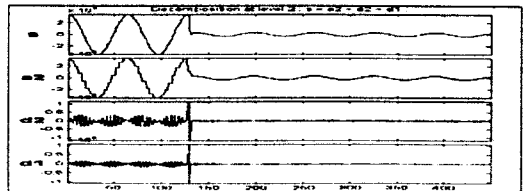


그림 6. Haar 마더 웨이블릿의 결과

표 1. 마더 웨이브렛에 따른 고장 검출 성능

마더웨이브렛			db						bior				coif					sym							
사고	종류		1	2	4	6	8	10	1.1	2.2	3.1	4.4	2	3	4	5	2	3	4	5	6	7	8		
1선지락	0도고장	전압			**						**				*					**	*		*		
		전류			**						*									**					
	90도고장	전압			**	*					**				*	*	*			**					
		전류			**	**					**			*	*	*				**			*	*	
2선지락	전압			*	*					*										*					
	전류			**						**										*					
선간단락	전압			*	*		**			*										**					
	전류			*	*					**										*					

\* : 우수    \*\* : 매우 우수

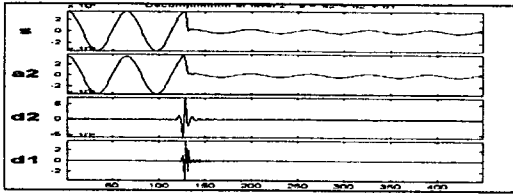


그림 7. db4 마더 웨이브렛의 결과

D. 1선지락 고장 발생시 고장전류 (고장발생각 90°)  
 그림 8, 9는 고장 발생각 90°의 결과이며, 고조파 성분이 포함되어 있다. db4 마더 웨이브렛을 이용한 그림 9의 검출 성능이 우수함을 알 수 있다.

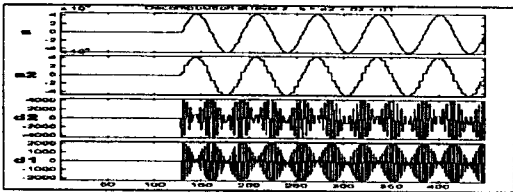


그림 8. Haar 마더 웨이브렛의 결과

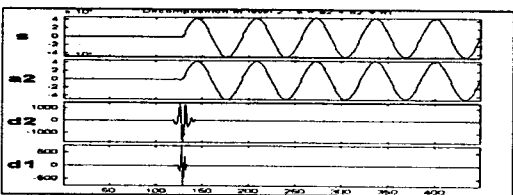


그림 9. db4 마더 웨이브렛의 결과

### 3.3 최적 마더 웨이브렛의 선정

다양한 크기와 형태를 갖는 각 마더 웨이브렛을 적용하여 고장검출 성능을 분석한 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 1선지락 고장, 2선지락 고장 및 선간단락 고장검출에 적절한 마더 웨이브렛은 전체 마더 웨이브렛의 숫자에 비해 극히 적다. 따라서 적절하지 못한 마더 웨이브렛의 선정은 고장검출을 곤란하게 할 수 있다. 표 1에서 우수(\*)는 일반사고시 발생하는 과도신호의 빠른 검출을 위해서 고차필터링이 우수하게 나타나는 신호분석결과를 의미한다. 또한 표 1에서 매우 우수(\*\*)는 과도신호의 고차필터링이 우수하게 나타날 뿐만 아니라, 계수값이 다른 분석결과보다 상당히 커져 분석의 신뢰도를 증가시킬 수 있는 신호분석결과를 의미한다. 현재, 일반적으로 신호분석에 사용되는 마더 웨이브렛은 Haar 웨이브렛과 Daubechies 웨이브렛이다. Haar 웨이브렛은 불연속적인 점의 위치를 가장 정확하고 빠른 시간에 검출할 수 있는 특징을 갖지만 일반사고의 경우에는 최고차 필터로 생각할 수 있는 D1에서 지락사고가 발생하기 전의 cosine파를 정현형태로

필터링했으므로 분석이 좋지 못함을 알 수 있다. 이들 웨이브렛 중에서 불연속적인 점의 특성을 가장 잘 표현하고 이때 계수값이 가장 큰 형태를 갖는 웨이브렛은 db4이다. db4는 최고차 필터(d1)로 분석시 cosine 파형을 평활한 형태로 나타냄으로서 고차 필터의 역할을 충실히 수행했음을 알 수 있다. db4는 짧은 시간동안 빠르게 발생하는 과도현상에 가장 적절하게 사용될 수 있는 웨이브렛으로서 전력계통에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 마더 웨이브렛이다. Symlet 웨이브렛은 Daubechies 웨이브렛을 변형시켜 만들어진 웨이브렛이기 때문에 서로 특성이 유사한 분석결과가 나타난다. db4와 거의 같은 특성을 보여주는 sym5도 일반사고의 분석에 있어 매우 우수한 결과를 보여준다. 그러므로, 일반사고 검출에 가장 적절한 마더웨이브렛은 Daubechies 웨이브렛의 db4, Biorthogonal 웨이브렛의 bior3.1 및 Symlet 웨이브렛의 sym5임을 알 수 있다.

### 4. 결 론

웨이브렛 변환은 마더 웨이브렛의 scaling과 shift로 얻어진 가변 윈도우를 사용하여 전력계통의 고장검출을 수행할 수 있다. 마더 웨이브렛은 종류에 따라 다른 특성을 갖고 있으므로, 분석하고자 하는 신호의 특성에 맞는 마더 웨이브렛의 선정이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 최적 마더 웨이브렛을 선정하기 위해서 low impedance fault 데이터를 각 마더 웨이브렛에 적용하였다. 전력계통의 low impedance fault 검출에 적합한 마더 웨이브렛은 db4, bior3.1, sym5임을 제시하였다. 특히 db4는 일반적인 전력계통의 과도현상에 적용되는 마더 웨이브렛으로 우수한 검출 특성을 보여준다. 따라서 low impedance fault 검출에 db4 웨이브렛을 선정한다면 신속한 고장검출이 가능할 것이다.

### [참고문헌]

- (1) Ingrid Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", Capital City Press, Montpelier, Vermont, 1992.
- (2) Ali N. Akansu and Richard A. Haddad, "Multiresolution Signal Decomposition", Academic Press Inc., 1992.
- (3) Martin Vetterli and Jelena Kovacevic, "Wavelets and Subband Coding", Prentice Hall PTR, 1995.
- (4) Gilbert Strang and Truong Nguyen, "Wavelets and Filter Banks", Wellesley Cambridge Press, 1996.
- (5) David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer and William B. Gish, "Wavelet and Electromagnetic Power System and Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No.2, pp. 1050-1058, April 1996.
- (6) Sjurja Santoso, W. Mack Grady and Peter Hofmann, "Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 924-930, April 1996.
- (7) Martin Vetterli and Cormac Herley, "Wavelets and Filter Banks : Theory and Design", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207-2232, September 1992.