

최소자승법을 이용한 가변 윈도우 크기의 거리계전기법

정호성* 신명철* 이복구** 장성익*** 최인혁*** 조필훈***
 *성균관대 **영지전문대 ***한국전력공사

Distance Relay Technique based on Variable Window Length
 using Least Square Error Method

H.S.Jung* M.C.Shin* B.K.Lee** S.I.Jang*** I.H.Choi*** P.H.Cho***
 *S. K. K. University **M. J. College ***KEPCO

Abstract - this paper presents the distance relay using wavelet transform and least square error method. Wavelet transform detect the faults in the high frequency region and remove the noises in the low frequency region. The variable window length LSE determine optimal window length to each fault case and estimate fault impedance very quickly.

1. 서 론

송전선로에서의 사고는 계통전반에 커다란 파급효과를 미쳐 보다 신속한 사고검출을 통해 고장제거와 신뢰성 있는 전력공급이 요구된다. 일반적으로 송전선로 보호에는 푸리에 변환을 이용하여 고장점까지의 선로 임피던스를 계산하여 수렴여부를 판별하는 거리계전기법이 널리 적용되고 있다. 푸리에 변환의 결과는 비교적 정확하지만 한 주기나 반주기의 고정된 크기의 데이터 윈도우가 요구되어 임피던스의 수렴까지는 상당한 시간이 걸리며 계산량이 많아 계전기 연산에도 부담이 된다. 따라서 과도신호의 특성에 따라 데이터 윈도우의 크기를 가변할 수 있도록 실제값과 추정값의 오차를 최소화하여 해를 구하는 최소자승법을 적용하였다[1]. 최소자승법은 고장 전압과 전류신호로부터 시간영역에서 임피던스를 추정하므로 주파수 영역으로 변환하는 과정에서 발생하는 오차를 없앨 수 있다. 고장에 따라 가변 윈도우의 크기를 결정하기 위해서 웨이블릿 변환을 이용하여 고장을 검출하고 고장검출 후부터 고장 임피던스가 수렴할 때까지 윈도우의 크기를 증가시켜 고속으로 임피던스를 추정하였다. 웨이블릿 변환은 주파수 영역에 따라 다른 크기로 영역을 분석함으로써 시간영역을 유지하면서 특정 주파수의 분석이 가능하여 계통에서의 고장신호를 빠르게 검출할 수 있으며 고장 임피던스 추정시의 사용되는 전압과 전류파형의 고조파 성분을 제거할 수 있어 정확한 임피던스 추정이 가능하도록 하였다.

본 논문에서 제시한 기법을 평가하기 위해 과도해석 프로그램인 EMTP를 이용하여 송전선로를 모델링하고 고장거리, 고장저항, 고장발생각을 변화시켜 가면서 고장데이터를 추출하였다. 그리고 본 논문에서 제시한 기법과 고정 크기의 최소자승법과 푸리에 변환을 이용한 기법과의 동작속도와 정확도를 비교하였다.

2. 웨이블릿 변환을 이용한 고장검출 기법

웨이블릿 변환은 푸리에 변환과 달리 분석하려고 하는 주파수 영역에 따라 스케일(scale)과 쉬프트(shift) 기법을 이용하여 고주파수 영역에 대해서는 짧은 윈도우 크기로 저주파수 영역에 대해서는 긴 윈도우 크기로 분석함으로써 시간에 대해서 다양한 주파수 정보를 추출할 수 있다. 따라서 식 (1)과 같이 이산 웨이블릿 변환을 이용함으로써 고조파가 함유된 과도신호의 분석에 효과적이다[2].

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum S[n] \cdot \Psi\left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right] \quad (1)$$

여기서, a_0^m 는 스케일에 대한 변수이며, 쉬프트를 나타내는 변수는 na_0^m 이며, 그리고 $1/\sqrt{a_0^m}$ 는 모함수와 같은 크기를 유지하기 위한 에너지 정규화 성분이다.

웨이블릿 변환을 이용하여 과도현상을 분석하는데 있어서는 모함수(mother wavelet)의 선택과 다중분해의 단계수를 결정하는 것이 매우 중요하다. 웨이블릿 모함수는 종류에 따라서 그 형태와 특성이 다르므로 다양한 고장신호로부터 고장검출과 고조파성분 제거 능력을 비교하여 이산 웨이블릿 분석이 가능한 직교 웨이블릿 중에서 5개의 탭을 가진 db5를 모함수로 선정하였다. 그리고 그림 1은 과도시의 전압신호인 S를 db5의 모함수를 이용하여 분해 단계에 따라 추출된 저주파성분의 고조파성분 제거 능력을 비교한 것이다.

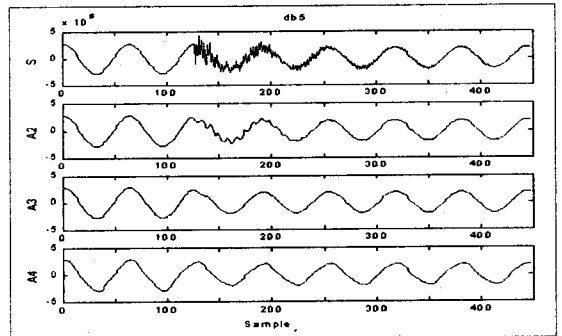


그림 1. 분해 단계수에 따른 저주파성분의 파형 비교

A2는 2단계 다중 분해로 추출한 저주파성분으로 고조파성분이 많이 제거되지 않아 별도의 필터링 기법이 요구되며, A4는 4단계 다중분해로 기본파성분의 크기가 일부 소멸되어 상대적으로 3조파성분의 영향이 커져 전체적으로 파형의 왜곡이 나타난다. 따라서 고조파를 상당히 제거하면서 기본파성분을 그대로 유지시키는 3단계 다중분해를 통해 신호를 추출하였다.

즉, db5의 모함수를 이용하여 고장신호를 3단계 분해함으로써 고주파 영역에서 D1, D2, D3성분의 신호를 추출하고 저주파 영역에서 A3성분을 추출하였다. 각 상에서의 D1성분의 신호를 분석하여 식(2)과 같이 D1신호의 절대값의 합이 미리 설정된 값보다 커지는 경우 고장으로 판별하였다.

$$D1_{set} > \sum |D1| \quad (2)$$

또한 고조파성분이 제거된 저주파영역인 A3성분을 이용하여 고장점을 추정하도록 하였다.

3. 가변 윈도우 크기의 고장점 추정 기법

3.1 최소자승법을 이용한 고장점 추정

최소자승법은 주어진 방정식의 개수가 미지수의 개수보다 많아 정확한 해를 구할 수 없는 경우에 추정해와 실제 해의 오차를 최소화하여 가장 근사적인 해를 추정하는 기법이다. 이를 적용하기 위해 1선 지락고장의 경우에 고장회선을 식 (3)과 같이 1차 미분방정식 형태로 표현하였다[3].

$$V_a = R_1(I_a + K_r I_0) + L_1 \left(\frac{dI_a}{dt} + K_l \frac{dI_0}{dt} \right) + V_f \quad (3)$$

여기서, $K_r = (R_0 - R_1)/R_1$, $K_l = (L_0 - L_1)/L_1$ 이며, 1선 지락고장의 경우에 $V_f = 0$ 라고 하면 미지항은 R_1 , L_1 가 된다. 식 (3)을 미지항과 기지항의 행렬로 분리하고 k번째 시점에서의 식으로 표현하면 식 (4)과 같다.

$$V(k) = A(k) \cdot x(k) = [a_1(k) \ a_2(k)] \cdot x(k) \quad (4)$$

여기서, $V(k) = V_a(k)$

$$x(k) = [R_1(k) \ L_1(k)]$$

$$a_1(k) = I_a(k) + K_r I_0(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_a(k)}{dt} + K_l \frac{dI_0(k)}{dt}$$

식 (4)에서 미지행렬 $x(k)$ 를 계산하기 위해서 의사역행렬을 이용하면 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (5)$$

식 (5)에서 고장점까지의 저항성분과 리액턴스성분을 추정하여 고장거리를 판단할 수 있다. 최소자승법을 적용함으로써 시간영역에서의 직접적인 연산이 가능하고, 추정을 위한 윈도우의 크기가 자유롭게 되어 보다 빠르게 고장점을 추정할 수 있다. 즉, 미지수의 개수가 2개이므로 최소 2개 이상의 연속된 데이터만으로도 임피던스를 추정할 수 있다. 그러나 너무 작은 수의 데이터로 연산하는 경우에 일시적인 잡음이 입력으로 들어오는 경우에 심각한 오차를 유발할 수 있어 일정 크기 이상의 윈도우 크기로 연산하는 것이 안정적이라고 할 수 있다. 그러나 일정 크기 이상의 데이터를 가지고 연산하는 경우에는 연산량의 증가로 퓨리에 변환에 비해 수렴속도가 향상은 기대할 수 없다.

3.2 가변 윈도우 크기의 최소자승법

고장이 발생하기 전까지는 입력의 변화가 심하지 않기 때문에 작은 크기의 윈도우로 임피던스를 추정하다가 웨이브렛 변환을 이용하여 고장이 검출되면 각 고장의 상황에 따라 추정 윈도우의 크기를 증가시켜가면서 임피던스를 추정한다. 각 고장 상황에 따라 외란 정도가 달라 임피던스의 수렴 시간도 다르므로 식 (6)과 같이 이전 시간과 현재시간의 임피던스 차이가 설정된 크기보다 큰 경우에는 윈도우의 크기를 계속 증가시키면서 고장점을 추정하게 한다[4].

$$Z_{set} > Z(k) - Z(k-1) \quad (6)$$

임피던스의 차가 한 주기 윈도우 크기 이내에서 설정 값 이하가 되면 그때의 마지막 윈도우 크기로 고장점을 추정하고 한 주기가 넘도록 작아지지 않는 경우에는 윈

도우의 크기를 한 주기로 고정하여 임피던스를 추정하도록 하여 계전기의 연산 부담을 감소시켰다. 그림 2는 가변 윈도우 크기의 최소자승법을 이용한 거리계전기법의 순서도이다

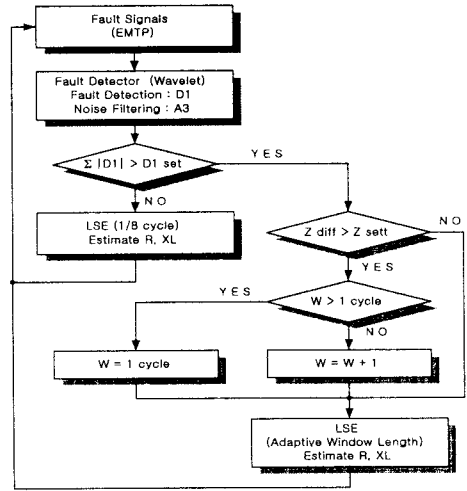


그림 2. 가변 윈도우 크기의 최소자승법 순서도

4. 사례 연구

4.1 모델 계통

그림 3은 모선 A, B사이의 선로 길이 100(km)의 345(kV) 양 전원을 가진 1회선 송전선로로 A상 1선 지락고장이 발생하도록 모의하였다.

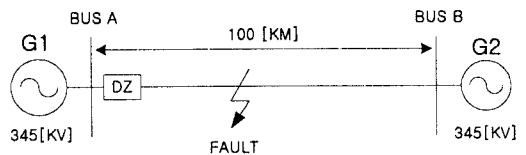


그림 3. 모델 계통도

고장 데이터 추출을 위해 샘플링 주파수는 3840(Hz), 즉 한 주기당 64샘플로 시뮬레이션을 하였으며 모든 고장은 176샘플 시점에서 발생하도록 하였다.

4.2 고장검출과 고장점 추정 결과

그림 4는 A상 1선 지락고장시의 웨이브렛 변환의 결과를 보여준다.

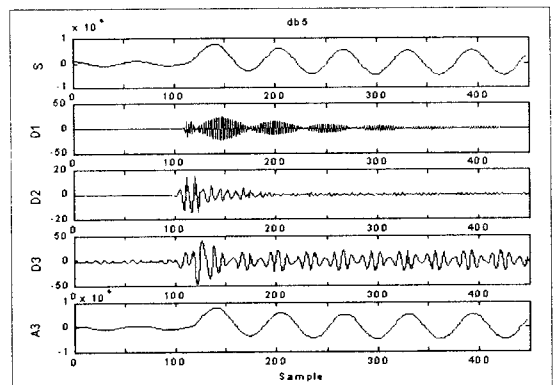


그림 4. db5의 3단계 웨이브렛 변환 결과

고장은 선로의 50[%]지점에서 발생하였으며 고장발생각은 $0[^\circ]$, 고장저항은 $0[\Omega]$ 이었다. 고장검출은 가장 고주파수 영역인 D1성분의 웨이브렛 계수값의 합이 75가 넘는 경우로 선정하였다. 이 경우에는 고장 발생 후 5샘플후인 180샘플에서 고장을 검출하였다. 그리고 고장점 추정을 위해서는 저주파 영역인 A3성분을 이용하여 고조파의 영향을 최소화하였다.

그림 5는 한 주기 DFT기법과 1/4주기 최소자승법, 한 주기 최소자승법, 그리고 가변 윈도우 크기의 최소자승법의 리액턴스 성분의 수렴속도를 비교한 것이다.

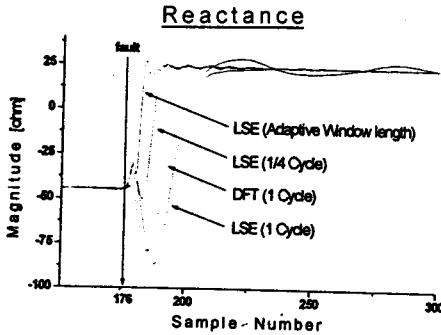


그림 5. 리액턴스 성분의 수렴 속도 비교

위 그림에서 알 수 있듯이 한 주기의 LSE, DFT기법 보다는 입력 데이터의 수를 줄인 1/4주기의 LSE기법이 보다 빠르게 수렴하였다. 그러나 가변 윈도우 크기의 LSE는 고장상황에 따라 적절한 크기의 윈도우로 설정되어 수렴속도와 정확도가 현저하게 향상되었다.

4.3 고장점 추정 결과

표1, 2, 3은 가변 윈도우 크기의 최소자승법을 이용한 거리계전기법의 수렴속도와 정확도를 평가하기 위해서 고장거리와 고장저항, 고장발생각의 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. 고장검출시간은 웨이브렛 변환의 D1로 검출한 시간이며, 수렴시간은 추정값이 실제 임피던스의 $\pm 1[\%]$ 이내로 수렴되는 샘플 번호를 표시한 것이며 최종 윈도우 크기는 임피던스의 차이가 Zset보다 작아졌을 때의 윈도우의 최종 샘플수를 표시하였다. 본 논문에서는 $Zset = 0.4\Omega$ 으로 그리고 가변 윈도우의 초기 크기는 8샘플(1/8주기)로 선정하였다.

표 1. 고장거리 변화에 따른 결과

항목 \ 거리(%)	10	30	50	70	90	
고장 검출 시간 [sn]	180	182	180	181	179	
수렴 시간 [sn]	194	194	196	204	217	
최종 윈도우 크기 [s]	20	17	26	30	45	
R[Ω]	실제값	1.342	4.026	6.71	9.394	12.078
	추정값	1.312	4.0344	6.7235	9.4416	12.672
X[Ω]	실제값	4.765	14.295	23.825	33.355	42.885
	추정값	4.646	14.173	23.649	33.045	43.020

위의 표에서 고장거리에는 거의 무관하게 고장 발생후 5샘플 정도에는 고장을 검출하였다. 그러나 고장거리가 멀어질수록 임피던스의 수렴시간이 길어지나 한 주기 이내에는 비교적 정확하게 수렴하였다. 그리고 가변 윈도우의 크기도 한 주기보다 훨씬 작아 계전기의 연산부담을 크게 줄일 수 있다.

표 2. 고장저항 변화에 따른 결과

항목 \ 저항[Ω]	0	1	10	100	200	
고장 검출 시간 [sn]	180	180	180	191	220	
수렴 시간 [sn]	196	196	199	201	207	
최종 윈도우 크기 [s]	26	26	26	10	9	
R[Ω]	실제값	6.71	7.71	16.71	106.71	206.71
	추정값	6.7235	8.0165	15.094	99.040	149.74
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.649	23.506	22.933	10.788	1.3846

위의 표에서 고장저항이 $10[\Omega]$ 이내에는 고장검출 속도와 임피던스 수렴속도와 정확도는 비교적 신뢰할 수는 있지만 $100[\Omega]$, $200[\Omega]$ 의 고저항 고장인 경우에는 검출속도가 늦어지며 임피던스의 추정값과 실제값에는 오차가 발생하였다.

표 3. 고장발생각 변화에 따른 결과

항목 \ 각[$^\circ$]	0	30	45	60	90	
고장 검출 시간 [sn]	180	178	178	178	177	
수렴 시간 [sn]	196	199	203	203	203	
최종 윈도우 크기 [s]	26	41	45	53	57	
R[Ω]	실제값	6.71				
	추정값	6.7235	6.7186	6.7220	6.7216	6.7392
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.649	23.656	23.657	23.652	23.591

고장발생각의 결과에서 보듯이 $90[^\circ]$ 고장이 $0[^\circ]$ 고장에 비해 고조파 성분이 많이 발생하므로 보다 빠르게 고장을 검출함을 알 수 있다. 그러나 임피던스의 수렴속도는 고조파의 영향으로 인해 비교적 늦어지며 최종 윈도우의 크기도 거의 한 주기 정도까지 증가하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 웨이브렛 변환과 최소자승법을 이용하여 보다 빠르고 정확한 거리계전기법을 제시하였다. 웨이브렛 변환을 이용하여 고주파수 영역에서 고장을 검출하고 저주파수 영역에서 고조파 성분을 제거하였다. 그리고 가변 크기의 윈도우를 이용한 최소자승법으로 각각의 고장상황에 따라 최적의 윈도우를 선정하여 매우 빠르게 고장 임피던스를 추정하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. S. Sachdev, "Design of a Distance Relay Using Adaptive Data Window Filters", Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference, Vol. 2, pp610-614, 2000
- [2] Michel Misiti, "Wavelet Toolbox User's Guide", MathWorks, 1996
- [3] M. B. Djuric, "Time Domain Solution of Fault Distance Estimation and Arcing Fault Detection on Overhead Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp60-67, 1999
- [4] K. K. Li "An adaptive window length algorithm for accurate high speed digital distance protection", Electrical Power & Energy Systems, Vol 19, No 6, pp375- 383, 1997