최소자승법을 이용한 적응형 데이터 윈도우의 거리계전 알고리즘

論 文
51A-8-1

Distance Relaying Algorithm Based on An Adaptive Data Window Using Least Square Error Method

鄭 濠 聖* · 崔 相 烈** · 申 明 澈***
(Ho-Sung Jung · Sang-Yule Choi · Myong-Chul Shin)

Abstract - This paper presents the rapid and accurate algorithm for fault detection and location estimation in the transmission line. This algorithm uses wavelet transform for fault detection and harmonics elimination and utilizes least square error method for fault impedance estimation. Wavelet transform decomposes fault signals into high frequence component D1 and low frequence component A3. The former is used for fault phase detection and fault types classification and the latter is used for harmonics elimination. After fault detection, an adaptive data window technique using LSE estimates fault impedance. It can find a optimal data window length and estimate fault impedance rapidly, because it changes the length according to the fault disturbance. To prove the performance of the algorithm, the authors test relaying signals obtained from EMTP simulation. Test results show that the proposed algorithm estimates fault location within a half cycle after fault irrelevant to fault types and various fault conditions.

Key Words : Fault Location Estimation, Wavelet Transform, Least Square Error Method, Adaptive Data Window Length, EMTP

1. 서 론

전력시스템이 대용량화 · 초고압화됨에 따라 송전선로에서의 사고는 계통전반에 커다란 파급효과를 미쳐 보다 신속한 사고검출을 통한 고장제거와 신뢰성 있는 전력공급이 요구된다. 일반적으로 송전선로 보호에는 퓨리에 변환(fourier transform)을 이용하여 고장점까지의 선로 임피던스를 계산하여 수렴여부를 판별하는 거리계전기법이 널리 적용되고 있다[1]. 퓨리에 변환의 결과는 비교적 정확하지만 임피던스를 계산하기 위해서 한 주기나 반주기의 고정된 크기의 데이터 윈도우가 요구되기 때문에 연산시간이 길어지며 연산량도 많아져 계전기의 동작속도가 늦어지게 된다. 연산량 감소를 위해 walsh 변환[2], block pulse 변환[3] 등을 이용하였으나 정확도는 크게 향상되지 않았으며 또한 이러한 직교변환 기법은 직류옵셋(dc offset)성분, 고조파(harmonics) 성분, 그리고 계통주파수 변화에 민감해 이를 처리하기 위한 전처리 과정이 요구된다.

데이터 윈도우의 크기를 보다 자유롭게 하기 위해 최소자승법(Least Square Error Method : LSE)을 이용하여 전압과 전류신호를 직류성분, 기본파, 그리고 저차 고조파 성분의 합으로 근사화한 후에 각 성분의 계수를 추출하고 이로부터 임피던스를 추정하는 기법[4]과 고장회선을 미분방정식으로 형태로 표현하고 임피던스를 직접적으로 추정하는 기법이 제시되었다[5]. 이러한 기법은 퓨리에 변환에 비해 윈도우의 크기를 비교적 자유롭게 선정할 수 있으며 한 주기당 높은 샘플링이 가능한 장점이 있으나 다양한 고장상태에 따라 최적의 데이터 윈도우 크기를 결정하기에는 어려움이 있다.

최근에는 인공지능 기법인 신경회로망(neural network)과 퍼지 논리(fuzzy logic) 등을 도입함으로써 동작속도를 개선하고 고장판단이 애매한 경우의 고장 유무를 판별하고 제한된 보호기능을 보안하려는 연구가 수행되고 있지만 이러한 기법은 구현하는 데에 어려움이 있으며 운전 조건이 수시로 변화하는 계통에 대한 전처리가 부족한 경우에는 적용하기에 쉽지 않다[6,7].

따라서 본 논문에서는 계전기에서 계측된 고장전압과 전류의 상태에 따라 데이터 윈도우의 크기를 가변할 수 있도록 하여 고장 임피던스를 추정하는 기법을 제시하였다. 이를 위해 고장이 발생하기 전에는 작은 크기의 데이터 윈도우로 변수값을 추정하고 고장이 검출된 후부터는 변수값이 수렴될 때까지 데이터 윈도우를 점차로 가변할 수 있도록 하였다. 고장 검출을 위해서는 과도신호의 시간영역을 유지하면서 국부적인 주파수 분석이 가능한 웨이브렛 변환(wavelet transform)을 이용하여 고장상과 고장유형을 판별하도록 하였으며, 또한 과도신호에서 발생하는 고조파 성분을 제거하여 별도의 필터링 과정 없이 고장점 추정을 위한 신호를 추출하였다. 이렇게 고조파가 제거된 신호로부터 최소자승법을 이용하여 데이터 윈도우를 최적으로 가변하면서 고장점까지의 선로 임피던스를 신속하게 추정할 수 있다.

* 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院 先任研究員 · 工博
** 正 會 員 : 安養大 디지털미디어學部 講義專任講師 · 工博
*** 正 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2001年 9月 11日
最終完了 : 2002年 5月 15日

제안한 기법을 평가하기 위해 과도해석 프로그램인 EMTP (electromagnetic transient program)를 이용하여 송전계통을 모델링하고 고장거리, 고장저항, 고장발생각, 전원 임피던스, 전원의 위상각 등을 변화시켜 가면서 고장데이터를 추출하였다. 이러한 고장데이터를 이용하여 본 논문에서 제시한 기법과 고정 크기의 최소자승법, 이산 퓨리에 변환(discrete fourier transform : DFT) 기법과의 동작속도와 정확도를 비교하여 성능을 평가하였다.

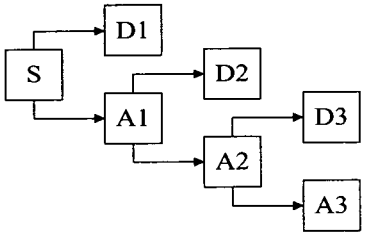
2. 웨이브렛 변환을 이용한 고장검출

웨이브렛 변환은 퓨리에 변환과 달리 분석하려고 하는 주파수 영역에 따라 스케일(scale)과 쉬프트(shift) 기법을 이용하여 고주파수 영역에 대해서는 짧은 윈도우로 저주파수 영역에 대해서는 긴 윈도우로 분석함으로써 시간에 대하여 다양한 주파수 정보를 추출할 수 있다. 따라서 식 (1)과 같이 이산 웨이브렛 변환을 이용함으로써 계통에서 발생하는 고장 순간의 고조파가 함유된 과도신호의 분석에 매우 효과적이다[8,9].

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

여기서, a_0^m는 스케일에 대한 변수이며, 쉬프트를 나타내는 변수는 $n a_0^m$이며, 그리고 $1/\sqrt{a_0^m}$는 모함수(mother wavelet)와 같은 크기를 유지하기 위한 에너지 정규화 성분이다.

웨이브렛 변환을 이용하여 과도현상을 분석하는데 있어서는 중요한 요소는 적절한 모함수의 선택과 다중분해의 단계수를 결정하는 것이다. 웨이브렛 모함수의 종류에는 Harr, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Mexican Hat, Meyer 등이 있으며 그 종류에 따라서 형태와 특성이 다르므로 다양한 고장신호로부터 고장검출 속도와 고조파성분 제거 능력을 비교하여 이산 웨이브렛 분석이 가능한 5개의 탭을 가진 db5를 모함수로 선정하였다. 즉, db5의 모함수를 이용하여 식 (1)에 원신호 S[n]을 분해하면 분해 단계에 따라 저주파수(approximation) 영역과 고주파수(detail) 영역으로 분해할 수 있는데, 그림 1은 원신호 S를 3단계로 분해하여 저주파수 영역인 A3성분과 고주파수 영역인 D1, D2, D3성분을 추출한 예이다.

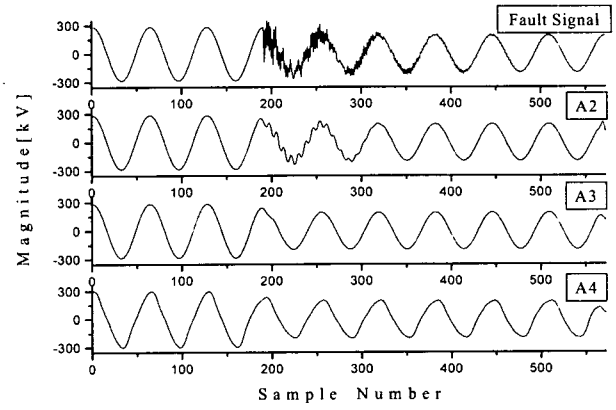


S = D1 + D2 + D3 + A3

그림 1 다중 분해 웨이브렛 변환

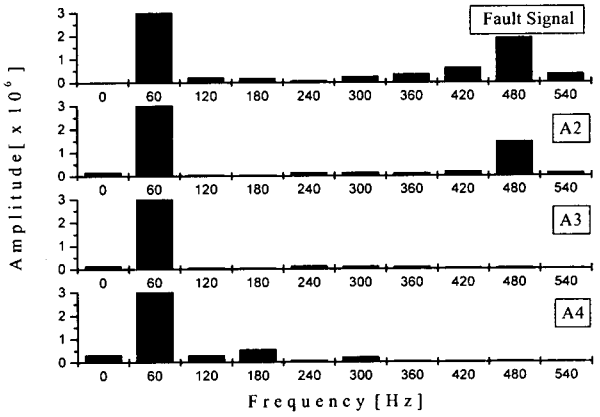
Fig. 1 Multiple-level decomposition wavelet transform

원하는 신호를 추출하기 위해서는 분해 단계수의 결정이 매우 중요하게 되는데 이는 원신호의 샘플링 주파수에 따라 영향을 받게 된다. 그림 2는 샘플링 주파수가 3840[Hz] (64[s/c])인 경우에 2단계, 3단계, 4단계의 분해 단계수에 따라 추출된 저주파수 성분의 고조파성분 제거 능력을 비교한 것이다.



(a)시간영역분석

(a) Analysis of the time domain



(b) 주파수영역 분석

(b) Analysis of the frequency domain

그림 2 분해 단계수에 따른 저주파수 파형 비교

Fig. 2 Comparition of low frequency wave to the numbers of decomposition level

그림 2는 90[°]의 전압 위상각에서 고장이 발생한 경우에 전압파형을 분해 단계수에 따라 시간영역과 주파수영역에서 비교한 것이다. 원신호인 S는 기본파 성분이외에도 2~9고조파 성분들이 많이 섞여 있어 고장점 추정에 에러를 유발하게 되므로 적절한 필터링이 요구된다. 여기서, A2는 2단계 다중분해로 추출한 저주파수 성분으로 고조파 성분이 많이 제거되지 않으며, A4는 4단계 다중분해로 원신호의 변형으로 인해 기수 고조파 성분의 크기가 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 이에 반해 3단계 다중분해를 통해 추출한 A3성분은 고조파를 제거하면서 기본파 성분을 그대로 유지함을 알 수 있어 3840[Hz]의 샘플링 주파수에서는 3단계 다중분해를 통해 추출한 저주파수 성분이 고장점 추정에 적절하다는 것을 알 수 있다.

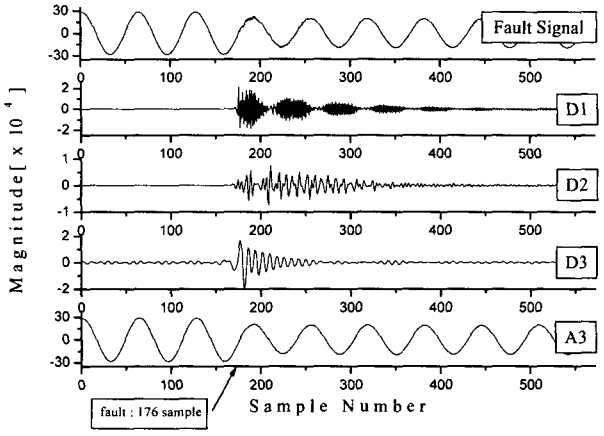


그림 3 db5의 3단계 웨이브렛 변환
Fig. 3 3-levels wavelet transform of db5

그림 3은 전압 위상각이 0[°]에서 발생한 고장의 전압신호를 db5의 모함수를 이용하여 3단계 다중분해를 하여 고주파수 영역인 D1, D2, D3성분과 저주파수 영역인 A3성분으로 분해한 것을 나타내었다. 샘플링 주파수가 3840[Hz]인 경우에 가장 고주파수 성분인 D1성분은 1920 ~ 960[Hz] 대역의 신호로, D2성분은 960 ~ 480[Hz], D3성분은 480 ~ 240[Hz], 그리고 가장 저주파수 영역인 A3성분은 240[Hz] ~ 직류분 신호로 분해된다. 여기서 첫 번째 웨이브렛 변환 단계에서 추출한 D1성분의 계수값이 과도신호에 대해 가장 빠르고 큰 반응을 나타내므로 식 (2)과 같이 한 주기 동안의 D1성분의 계수의 절대값의 합이 설정된 값보다 큰 경우에는 고장을 검출하도록 하고 만약에 설정값을 넘지 않을 경우에는 계수값의 합을 초기화하였다.

$$\sum_{1\,cycle} |D1| \begin{cases} > D1_{set} \Rightarrow Fault\ Signal \\ < D1_{set} \Rightarrow Reset \end{cases} \quad (2)$$

따라서 각 상의 D1성분의 계수값의 변화를 통해 고장상을 판별하고 영상분 신호의 계수값의 변화를 통해 단락고장과 지락고장을 구분하여 고장유형을 판별할 수 있다. 그리고 저주파수 영역인 A3성분은 그림 2에서도 알 수 있듯이 고조파 성분이 제거된 성분을 추출할 수 있어 이 신호를 고장점 추정에 이용함으로써 별도의 고조파 제거 필터를 생략할 수 있다. 그리고 웨이브렛 변환을 통해서도 제거할 수 없는 직류옵셋 성분은 최소자승법을 이용한 알고리즘에는 크게 영향을 미치지 않아 신속한 고장점 추정이 가능하다.

3. 적응형 데이터 윈도우의 고장점 추정 기법

3.1 최소자승법을 이용한 고장점 추정

3.1.1 지락고장

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 그림 4와 같이 1선 지락고장의 경우에 고장회선을 저항과 리액턴스의 형태로 표현할 수 있다.

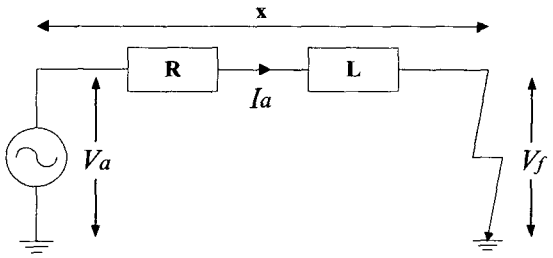


그림 4 1선 지락 고장
Fig. 4 One-line ground fault

위의 1선 지락고장(A상)의 경우에 계전기에서 바라보는 전압방정식 형태로 표현하면 식 (3)과 같이 1차 미분방정식 형태로 표현할 수 있다.

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

여기서, V_a와 I_a는 계전기에서 계측된 A상의 전압과 전류성분이며, I_0는 지락고장시의 영상분 전류이다. 그리고 R_0, R_1, L_0, L_1는 선로 저항과 리액턴스의 영상분, 정상분이며, $K_r = (R_0 - R_1)/R_1$, $K_l = (L_0 - L_1)/L_1$이다. 1선 지락고장의 경우에 고장점 전압인 $V_f = 0$라고 하면 미지항은 R_1, L_1가 된다. 식 (3)을 미지항과 기지항의 행렬로 분리하고 k번째 시점에서의 식으로 표현하면 식 (4)과 같다.

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

여기서, $y(k) = V_a(k)$

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

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

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

식 (4)에서 $a_2(k)$의 미분항은 이산 연산을 위해서 식 (5)과 같이 두 신호의 차를 이용하여 계산하였다.

$$\frac{dI_a(k)}{dt} = \frac{I_a(k+1) - I_a(k-1)}{2 \cdot \Delta T} \quad (5)$$

여기서 ΔT는 샘플링 간격이다. 그리고 미지 행렬 $x(k)$를 계산하기 위해서 의사 역행렬을 이용하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot y(k) \quad (6)$$

식 (6)을 계산함으로써 고장점까지의 저항성분과 리액턴스성분의 크기를 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 2개

이므로 최소 2개 이상의 연속된 데이터만으로도 임피던스를 추정할 수 있다. 그러나 너무 작은 수의 데이터로 연산하는 경우에 일시적인 잡음이나 과도초기의 신호의 진동으로 인해 심각한 에러를 유발할 수 있어 일정 크기 이상의 데이터 윈도우로 연산하는 것이 안정적이라고 할 수 있다. 그러나 데이터 윈도우의 크기가 너무 큰 경우에는 연산량의 증가로 수렴속도의 향상을 기대할 수 없어 적절한 데이터 윈도우 크기의 선정이 요구된다[10,11].

3.1.2 단락고장

단락고장의 경우에는 지락고장과 달리 영상분의 영향을 받지 않기 때문에 영상분 보상을 위한 항을 생략할 수 있다. AB상 2선 단락고장인 경우에 식 (7)과 같이 1차 미분방정식 형태로 표현하였다.

$$V_a - V_b = R_1(I_a - I_b) + L_1(\frac{dI_a}{dt} - \frac{dI_b}{dt}) \quad (7)$$

임피던스를 계산하기 위해서 위의 지락고장에서의 식 (4)과 같이 미지항과 기지항으로 분리하여 표현하면

$$y(k) = A(k) \cdot x(k) = [\, a_1(k) \;\; a_2(k) \,] \cdot x(k) \quad (8)$$

여기서, $y(k) = V_a(k) - V_b(k)$

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

$$a_1(k) = I_a(k) - I_b(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_a(k)}{dt} - \frac{dI_b(k)}{dt}$$

이며 식 (6)과 같이 의사 역행렬을 이용하면 고장 임피던스를 추정할 수 있다.

3.2 최소자승법을 이용한 적응형 데이터 윈도우

선로에 고장이 발생하기 전에는 전압과 전류신호의 변화가 그리 심하지 않기 때문에 작은 크기의 데이터 윈도우로도 임피던스를 정확하게 추정할 수 있지만 고장이 발생하는 경우에는 전압과 전류신호가 크게 변화하여 작은 크기의 데이터 윈도우로는 정확한 고장점 추정이 어렵게 되어 보다 큰 데이터 윈도우가 요구된다. 그러나 고장상황에 따라 전압과 전류신호에 나타나는 과도현상이 다르기 때문에 고정 크기의 데이터 윈도우로 고장점을 추정하는 경우에는 수렴의 안정성이 떨어지거나 또는 수렴속도가 늦어질 수 있다. 따라서 고장상황에 따라 데이터 윈도우의 크기를 점차로 증가시키면서 결과값을 추정하도록 하여 안정적인 고장 임피던스를 보다 신속하게 할 수 있다. 최적의 윈도우의 크기를 결정하기 위해서 식 (9)과 같이 이전시간인 (k-1)번째와 현재시간인 k번째 시점에서 추정된 임피던스 차가 설정된 값보다 큰 경우에는 윈도우의 크기를 계속 증가시키면서 고장점을 추정하며 그 크기가 설정된 값보다 작게 되는 시점의 크기를 최적의 윈도우 크기로 설정하였다.

$$Z_{set} > Z_{diff}(k) = | Z_{(k)} - Z_{(k-1)} | \quad (9)$$

따라서 연속된 임피던스의 추정값의 차가 한 주기 윈도우 크기 이내에서 설정값 이하가 되면 그 때의 크기를 최종의 데이터 윈도우 크기로 하여 결정하고, 한 주기가 넘도록 임피던스의 차가 설정값보다 작아지지 않는 경우에는 최종 윈도우의 크기를 한 주기로 고정하여 임피던스를 추정하도록 하여 계전기의 연산 부담을 감소시켰다. 그림 5는 최소자승법을 이용한 적응형 데이터 윈도우의 거리계전기법의 전체적인 동작 흐름도이다.

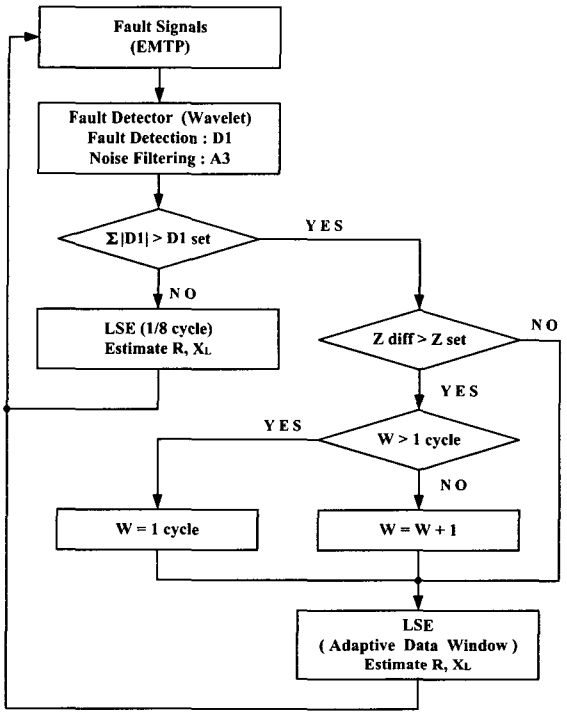


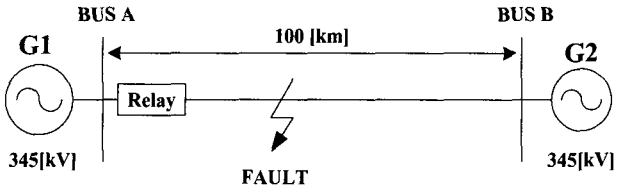
그림 5 적응형 데이터 윈도우 기법의 흐름도
Fig. 5 Flowchart of the adaptive data window algorithm

위의 흐름도에서 과도신호를 웨이브렛 변환을 이용하여 분해하고 D1성분으로부터 고장을 검출하고 A3성분으로부터 고조파 성분을 제거하였다. 고장이 발생하기 전에는 8샘플(1/8주기)의 작은 크기의 데이터 윈도우를 최소자승법에 적용하여 임피던스를 추정하다가 고장이 검출되면 임피던스가 수렴될 때까지 데이터 윈도우를 점차로 증가시키면서 고장 임피던스를 추정한다. 임피던스의 차가 한 주기 이전에 수렴하는 경우에는 그 시점에서의 데이터 윈도우를 최종 크기로 하고 한 주기가 넘도록 수렴하지 않을 경우에는 연산 부담을 줄이기 위해 한 주기의 고정 크기의 데이터 윈도우로 고장점을 추정하여 보다 신속하고 안정적인 고장점 추정이 가능하도록 하였다.

4. 사례 연구

4.1 모델 계통

그림 6은 345[kV] 양 전원을 가진 선로길이 100[㎞]의 1회선 송전선로의 단선도와 선로 정수에 대한 내용이며 고장은 A상 1선 지락고장과 AB상 2선 단락고장을 모의하였다.



	R [Ω/㎞]	X_L [Ω/㎞]	C [㎌/㎞]
영상분	0.3434	1.3158	0.0052
정상분, 역상분	0.1342	0.4765	0.0090

그림 6 모델 계통
Fig. 6 Model system

샘플링 주파수는 3840[Hz], 즉 한 주기당 64샘플로 선정하였으며, 고장거리, 고장발생각, 고장저항, 전원임피던스, 양 전원의 위상각에 변화를 주면서 다양한 고장데이터를 추출하였다. 전원 G1을 기준으로 하여 0[°] 고장은 176샘플 시점에서 그리고 90[°] 고장은 192샘플 시점에서 고장이 발생되도록 하였다.

4.2 고장검출과 고장점 추정 결과

그림 7은 A상 1선 지락고장의 경우에 고장검출을 위한 D1성분과 그리고 최소자승법을 이용한 적응형 데이터 윈도우 기법으로 추정한 저항성분과 리액턴스성분의 수렴 결과를 나타낸 것이다.

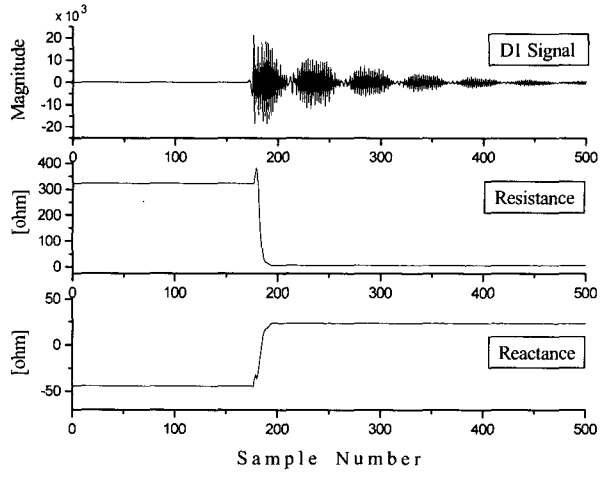


그림 7 고장검출과 고장점 추정 결과
Fig. 7 Result of the fault detection and location estimation

고장은 전체 선로의 50[%]지점이며, 발생각은 0[°], 고장저항은 0[Ω]이며 고장검출을 위해 설정값인 $D1_{set}$ = 1000으로 선정하였으며 한 주기 내에 D1성분의 계수값의 합이 이 설정값을 넘는 경우에 검출하도록 하였다. 또한 적응형 윈도우의 크기를 결정하기 위한 임피던스의 설정값은 전체 선로 임피던스의 ±0.5[%] 이내의 크기로 수렴시키기 위해서 Z_{set} = 0.2475로 선정하였다. 위의 결과에서 고장 발생 후 7샘플후인 182샘플에서 고장을 검출하였으며 저항성분은 30샘플 후에서 실제값에 1[%]이내로 수렴하였으며, 리액턴스성분은 25샘플 후에 1[%]이내로 수렴하였다. 여기서 수렴비율은 식 (10)과 같이 나타내었다. 여기서, Z_{total}은 전체 선로 임피던스의 크기이며, Z_{real}은 실제값이며, $Z_{estimate}$는 최소자승법을 이용한 추정값이다.

$$convergence\ ratio = \frac{Z_{real} - Z_{estimate}}{Z_{total}} \times 100[\%] \quad (10)$$

그림 8은 추정되는 임피던스 변화에 따른 적응형 윈도우의 변화를 나타낸 것이다. 고장전에는 8샘플(1/8주기)을 데이터 윈도우로 선정하여 저항성분과 리액턴스성분을 추정하다가 고장이 발생한 후에 임피던스가 전체 선로 임피던스의 1[%]이내인 0.2475보다 작아질 때까지 윈도우의 크기가 점차로 증가함을 알 수 있다. 이전 시간의 임피던스와 현재 시간의 임피던스의 차가 설정값보다 작아지면 최종적인 데이터 윈도우로 임피던스를 추정하게 되는데 이 경우에는 최종으로 21샘플 크기로 최적화되었다.

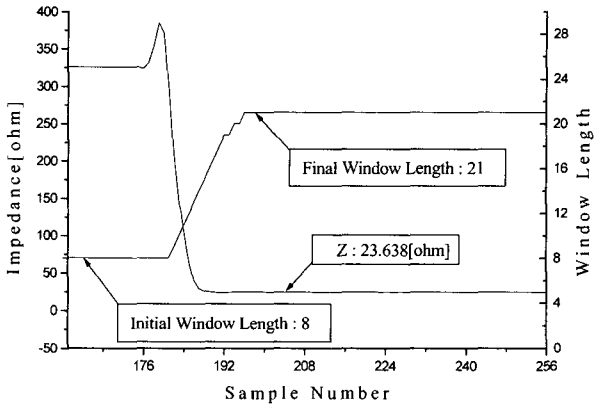
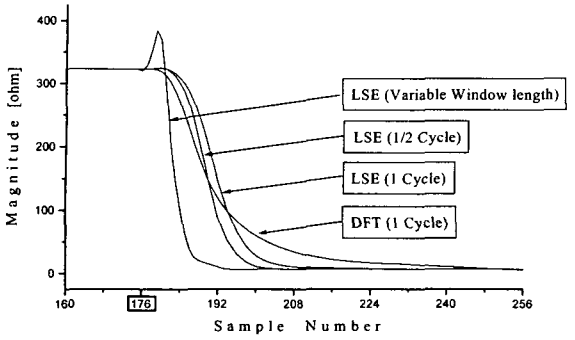
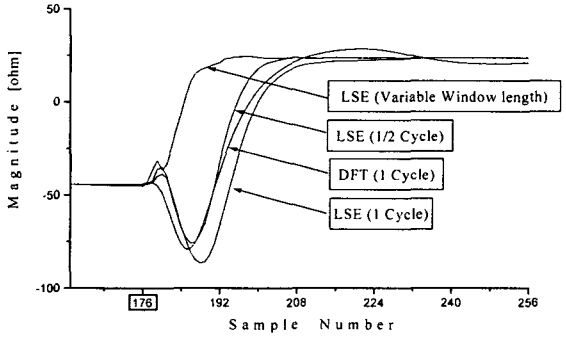


그림 8 임피던스에 따른 적응형 윈도우의 크기 변화
Fig. 8 Change of the adaptive window length according to impedance

그림 9는 적응형 데이터 윈도우 기법의 성능을 평가하기 위해서 그림 7에서 적용한 동일한 고장 상황에 대해서 1주기 윈도우의 DFT기법과 1/2주기 윈도우의 최소자승법, 1주기 윈도우의 최소자승법의 저항성분과 리액턴스성분의 수렴 특성을 비교하였으며, 표 1은 저항성분과 리액턴스성분의 추정값이 실제값에 1[%], 5[%]이내에 수렴하는 속도를 고장 발생 후 샘플수로 비교한 것이다.

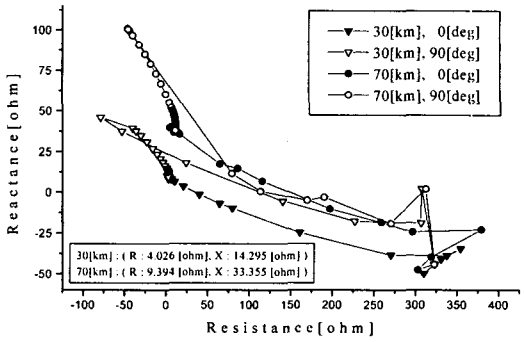


(a) 저항성분
(a) Resistance

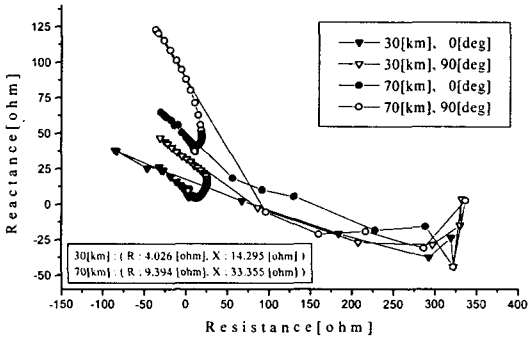


(b) 리액턴스성분
(b) Reactance

그림 9 수렴 특성 비교
Fig. 9 Comparition of the convergence characteristics



(a) 지락고장
(a) ground fault



(b) 단락고장
(b) short fault

그림 10 임피던스 궤적
Fig. 10 Impedance loci

표 1 수렴 속도 비교
Table 1 Comparition of the convergence speed

기법[샘플수] / 수렴비율		1주기 DFT	1주기 LSE	1/2주기 LSE	적응형 LSE
5[%]	R	76	54	32	25
	L	34	50	32	18
1[%]	R	88	63	31	30
	L	35	60	31	25

위의 수렴특성과 속도의 비교에서 알 수 있듯이 1주기 윈도우의 DFT기법에서의 저항성분은 한 주기가 지나서야 1[%], 5[%]내로 수렴하며 리액턴스성분은 대략 반주기만에 수렴하나 수렴후에도 수렴값에 진동이 나타나는 특징이 있다. 1주기 LSE는 거의 한 주기가 지나서야 수렴오차 안에 수렴하였으며, 윈도우의 크기를 반으로 줄인 1/2주기 LSE기법에서는 반주기 정도에는 수렴하였다. 이에 반해 적응형 윈도우 크기의 LSE는 데이터 윈도우의 크기가 작은 고장초기에는 수렴값이 오차가 심하지만 고장상황에 따라 윈도우 크기가 적절하게 증가되어 수렴속도가 현저히 빨라짐을 알 수 있다.

그림 10은 적응형 윈도우 크기의 LSE를 이용하여 지락고장과 단락고장시의 임피던스 궤적을 나타내었다. 고장은 전체 선로 길이의 30[%], 70[%]지점에서, 고장발생각은 0[°], 90[°]에서 발생한 것을 비교하였다.

지락고장과 단락고장의 고장유형에 상관없이 고장거리나 고장발생각이 변화하여도 정확하게 고장점을 추정하였다. 다만 임피던스의 궤적을 볼 때 0[°] 고장에 비해 90[°]고장의 경우에 고조파의 영향이 심하여 수렴궤적의 궤도가 커져 수렴속도가 약간씩 늦어짐을 알 수 있다.

4.3 고장상황 변화에 대한 결과

표 2 ~ 6은 고장거리, 고장저항, 고장발생각, 전원 임피던스, 그리고, 양 전원의 위상각을 변화시킨 경우에 발생한 1선 지락고장에 대해 제안한 알고리즘의 성능을 평가한 결과이다. 고장검출 시간은 웨이브렛 변환을 통해 추출한 D1 성분의 절대값의 합이 설정값을 넘는 시점을 고장 발생후의 샘플수로 나타내었으며, 수렴시간은 추정값이 실제 임피던스의 1[%]이내로 수렴되는 샘플수이며, 최종 윈도우 크기는 임피던스의 차이가 설정값인 Z_{set}보다 작아졌을 때의 최종 데이터 윈도우의 크기를 샘플수를 표시하였다.

표 2는 고장거리 변화에 따른 결과로 고장거리에는 거의 무관하게 고장 발생 후 10샘플 정도에는 고장을 검출하였다. 그러나 고장거리가 10[%]정도의 근거리 고장을 제외하고는 고장거리가 멀어질수록 임피던스의 수렴시간이 길어졌다. 하지만 고장 발생 후 1/2 주기 전후에는 저항성분과 리액턴스성분을 정확하게 추정하였으며, 윈도우의 크기도 1/2 주기보다도 작은 최대 23샘플이내여서 계전기의 연산부담을 크게 줄일 수 있다.

표 2 고장거리에 따른 결과

Table 2 Result to the fault distance

항목 \ 거리[%]		10	30	50	70	90
고장검출 시간 [샘플수]		11	9	7	10	10
수렴 시간 [샘플수]		32	19	25	30	35
최종 윈도우 크기 [샘플수]		18	15	21	22	23
R[Ω]	실제값	1.342	4.026	6.710	9.394	12.078
	추정값	1.372	4.012	6.724	9.454	12.263
X[Ω]	실제값	4.765	14.295	23.825	33.355	42.885
	추정값	4.650	14.171	23.627	33.149	43.219

표 3 고장저항에 따른 결과

Table 3 Result to the fault impedance

항목 \ 저항[Ω]		0.1	1	5	10	100
고장 검출 시간 [샘플수]		7	7	7	7	8
수렴 시간 [샘플수]		24	25	24	23	24
최종 윈도우 크기 [샘플수]		21	22	22	22	22
R[Ω]	실제값	6.81	7.71	11.71	16.71	106.71
	추정값	6.856	8.018	13.093	19.215	99.030
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.612	23.550	22.912	22.206	10.773

고장저항에 대해서는 고장검출 시간, 수렴 시간, 그리고 최종 윈도우의 크기는 거의 비슷하였다. 그러나 5[Ω]이내의 저저항 지락고장의 경우에는 실제값에 거의 유사한 값을 추정하였으나, 10[Ω]이상의 고저항 지락고장의 경우에는 수렴시의 오차가 커져 정확한 고장점 추정이 어려웠다. 따라서 고저항 지락고장에 대해서는 별도의 대책이 요구된다.

표 4 고장발생각에 따른 결과

Table 4 Result to the fault angle

항목 \ 각[°]		0	30	45	60	90
고장 검출 시간 [샘플수]		7	8	4	6	4
수렴 시간 [샘플수]		25	38	41	44	47
최종 윈도우 크기 [샘플수]		22	22	30	33	43
R[Ω]	실제값	6.71				
	추정값	6.725	6.717	6.719	6.708	6.816
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.632	23.616	23.636	23.610	23.603

고장시의 전압위상각이 0[°]에서 90[°]방향으로 커지는 경우에는 고조파 성분이 많이 발생되어 D1성분의 크기 변화가 크게 나타나기 때문에 보다 빠르게 고장을 검출할 수 있다. 하지만 이러한 고조파 성분의 영향으로 인해 임피던스의 수렴속도가 늦어지며 최종 윈도우의 크기도 최대 47샘플까지 증가하였다.

표 5 전원 임피던스의 비율에 따른 결과

Table 5 Result to the source impedance ratio

항목 \ G1/G2		1/0.2	1/0.5	1/1	1/2	1/5
고장 검출 시간 [샘플수]		7	7	7	7	7
수렴 시간 [샘플수]		30	27	25	24	20
최종 윈도우 크기 [샘플수]		22	22	22	21	21
R[Ω]	실제값	6.71				
	추정값	6.694	6.729	6.725	6.696	6.732
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.655	23.662	23.632	23.608	23.646

전원 임피던스의 경우에는 계전기단의 전원 G1의 임피던스의 크기를 고정한 상태에서 상대단 전원 G2의 임피던스가 변화한 경우에 알고리즘의 성능을 비교하였다. 전원 임피던스의 비율에 무관하게 고장검출 시간이나 최종 윈도우의 크기에는 큰 차이가 없으나 상대단의 전원 임피던스가 커지는 경우에는 상대적으로 계전기단의 임피던스가 작아져 고장전류가 약간 더 흐르고 전압성분에 대한 고조파의 영향이 적어져 수렴속도는 더 빨라짐을 알 수 있다. 즉 상대단에 비해 계전기단의 전원 임피던스가 커질수록 수렴속도가 약간씩 늦어짐을 알 수 있다.

표 6 양 전원 위상차의 변화에 따른 결과

Table 6 Result to the difference of the two source phase angle

항목 \ G2[°]		-25	-5	0	5	25
고장 검출 시간 [샘플수]		7	8	11	10	9
수렴 시간 [샘플수]		28	21	18	24	34
최종 윈도우 크기 [샘플수]		23	18	17	18	28
R[Ω]	실제값	6.71				
	추정값	6.726	6.728	6.727	6.725	6.720
X[Ω]	실제값	23.825				
	추정값	23.644	23.631	23.612	23.626	23.639

계전기단의 전원 G1의 위상각은 고정시켜 놓고 상대단의 전원의 위상각을 -25[°]~+25[°]로 변화하여 조류 변화에 따른 계전기의 동작을 비교하였다. 두 전원의 위상차가 커질수록 전력량이 증가하여 부하전류가 커지며 이런 경우에 고장이 발생하면 전압신호에 고조파의 영향이 커져 고장검출 시간은 조금씩 빨라지나 이로 인해 고장 임피던스의 수렴속도가 늦어지고 최종 윈도우의 크기가 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 송전선로 보호를 위한 보다 빠르고 정확한 고장검출과 고장점 추정기법을 제시하였다. 이를 위해 웨이브렛 변환을 이용하여 고장을 검출하고 최소자승법을 이용하여 데이터 윈도우의 크기를 자유롭게 하여 고장상황에 따라 데이터 윈도우의 크기를 최적으로 선정하여 보다 신속한 고장점 추정이 가능하도록 하였다. 본 논문을 통해 나온 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 웨이브렛 변환을 이용하여 과도신호를 분해하여 고주파수 영역인 D1성분으로부터 고장을 검출하고 저주파수 영역인 A3성분을 추출하여 고조파 성분을 제거하였다.
2) 지락, 단락고장에 따라 고장점을 추정할 수 있도록 최소자승법을 이용한 알고리즘을 제시하였으며, 또한 과도현상에 따라 데이터 윈도우의 크기를 가변할 수 있도록 하는 적응형 기법을 적용하여 최적의 데이터 윈도우 크기를 선정하였다.
3) 다양한 고장상황을 모의하여 제시한 알고리즘에 적용한 결과, 고장발생 후 1/4주기 이내에는 고장을 검출하였으며 1/2주기 이내에는 고장점을 추정하였다.

그러나 고저항 지락고장의 경우에는 수렴시의 오차가 발생하였으며, 또한 고장회로를 표현한 미분방정식에서 커패시터 성분을 배제하였기 때문에 이 성분이 큰 계통에 적용하는 경우에는 임피던스 추정의 오차가 발생할 우려가 있어 이에 대한 연구가 향후에는 보완되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] P. G. McLaren, "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", Proceedings of the IEE, Vol. 122, No. 11, pp. 1301-1305, 1975. 11

[2] J. W. Horton, "The use of Walsh functions for high-speed digital relaying", IEEE PES Summer Meeting, Paper A 75 582-7, pp. 1-9, 1975. 7

[3] S. R. Kolla, "Digital Protection of Transmission Lines using Block Pulse Functions", International Journal of Electric Power & Energy Systems, vol 10, pp. 274-276, 1988,

[4] 강상희, "최소자승법을 이용한 고속 계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 48A권, 7호, pp. 855-862, 1999. 7

[5] 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, pp. 60-67, 1999

[6] 정호성, 신명철, "거리계전기법을 위한 신경회로망 고장패턴 추정기", 대한전기학회 논문지, 47권, 11호, pp. 1804-1811, 1998. 11

[7] 신명철, 박철원, 정호성 "적응형 퍼지 시스템에 의한 송전선로보호의 고장검출 계전기법", 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, Vol. 9, No. 5, pp. 538-544, 1999. 10

[8] Michel Misiti, Wavelet Toolbox User's Guide, MathWorks, 1996

[9] Xia Tibin, "A New Technique using Wavelet Analysis for Fault Location", IEE Conference Publication, No. 434, pp. 231-234, 1993

[10] K. K. Li "An adaptive window length algorithm for accurate high speed digital distance protection", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 375-383, 1997

[11] M. S. Sachdev, "Design of a Distance Relay Using Adaptive Data Window Filters", Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference, Vol. 2, pp. 610-614, 2000

저 자 소 개

정 호 성 (鄭 澔 聖)

1971년 10월 4일생. 1995년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대학교 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공박). 2002년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : hsjung@krri.re.kr

최 상 열 (崔 相 烈)

1970년 8월 24일생. 1996년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대학교 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공박). 2002년 ~ 현재 안양대학교 디지털미디어학부 강의전임강사

E-mail : ppk99@aycc.anyang.ac.kr

신 명 철 (申 明 澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1978년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수. 2000년~2001년 미국 펜실베니아 주립대학교 방문교수. 1978년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수

E-mail : mcshin@speed.skku.ac.kr