

최소자승법을 이용한 고속 거리계전 알고리즘

권태원, 강상희
영지대학교

A High Speed Distance Relaying Algorithm Based on a Least Square Error Method

Tae-Won Kwon, Sang-Hee Kang
Myongji University

Abstract - A high speed digital distance relaying algorithm based on a modified least square error method is proposed. To obtain stable phasor values very quickly, first, a lowpass filter which has very short transient period and no overshoot is used. Secondly, the conventional least square error method is modified to the one having the data window of 3 samples by applying a FIR filter which removes the DC-offset component in current relaying signals.

1. 서 론

현재 왜곡된 계전신호에서 전류주파수 성분을 추출하는 일반적 방법은 직교변환법을 사용하는 것이다.[1,2,3] 이는 고조파 성분을 제거하는 데는 뛰어난 능력이 있으나 전류주파수의 한주기 보다 큰 데이터 윈도우를 사용하지 않는다면, 고조파와 직류 오프셋이 포함된 파형에서 큰 오차를 발생시키게 된다.

이러한 단점을 극복하고자 본 논문에서는 최소한의 데이터 윈도우를 갖는 최소자승법을 이용하였다. 최소자승법은 데이터 윈도우 선택의 자유도가 높은 장점을 지니고 있으나 계산해야 하는 성분의 수에 비례하여 데이터 윈도우가 증가하는 단점을 지니고 있다. 이와 같은 단점을 극복하고자 기본파 성분을 제외한 고조파 및 직류분을 저역통과필터와 FIR필터를 사용해 제거하여 최소자승법으로 계산해야 하는 성분의 수를 줄였으며 따라서 데이터 윈도우의 크기도 감소시켰다.

저역통과필터는 과도기간을 단축시키기 위한 새로운 개념으로 고안되었다. 정지대역 차단 주파수는 100[Hz]로 설정하여 전압·전류 신호에서 고조파성분을 제거한다. 직류오프셋 성분은 전류 신호에서 발생되므로 이를 제거하기 위해 전류신호만 FIR필터를 통과시키며, FIR필터를 통과하지 않은 전압신호와 함께 임피던스를 계산하기 위해 FIR 필터의 주파수응답 특성을 고려하여 전류의 크기와 위상이 보정된다. 이렇게 오프셋 성분이 제거된 전류 신호와 전압신호는 최소자승법에 의해 전류주파수 성분의 페이저가 구해진다.

2. 본 론

2.1 최소자승법

최소자승법은 계전신호의 페이저를 구하기위해 사용되는 방법중의 하나로 계전신호의 형태를 가정하고 샘플 값을 이용해 연립방정식을 푸는 것이다. 본 논문에서 사용한 수정 최소자승법은 기본적인 계전신호의 형태를 기본파 성분만을 가정한다. 이는 고조파는 중첩방지 저역

통과필터의 정지대역 차단 주파수를 100[Hz]로 낮추어 제거하고, 전류신호에 포함된 직류성분은 FIR 필터로 제거되기 때문에 가능하다. 따라서 미지량은 각 전압·전류의 기본파 성분의 페이저값이 되며 이는 연속적으로 얻어진 3개의 샘플을 통해 얻어진다.

즉, 가정된 전류파형 $i(t), v(t)$ 는 식 (1)과같은 형태를 갖으며, 시간변화에따라 순차적으로 3개의 샘플을 측정하면 3개의 방정식이 세워지고, 미지량 x 와 기지량 a , 샘플값 s 를 구분하여 행렬로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$i(t) = K_i \cos \theta_i \sin \omega_0 t + K_i \sin \theta_i \cos \omega_0 t \quad (1)$$

$$v(t) = K_v \cos \theta_v \sin \omega_0 t + K_v \sin \theta_v \cos \omega_0 t$$

여기서,

K_v, K_i : 전압, 전류 기본파 성분 크기

θ_v, θ_i : 전압, 전류 기본파 성분 위상각

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \end{bmatrix} \quad (2)$$

3×2 2×1 3×1

식 (2)의 미지수 행렬[X]의 해는 다음과 같이 의사역행렬을 이용해 얻는다.

$$[X] = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot S \quad (3)$$

2.2 저역필터의 설계

본 논문에 사용된 중첩방지 저역통과 필터의 전달함수는 식 (4)와 같다.

$$G(s) = \frac{43864.91}{s^2 + 418.88s + 43864.91} \quad (4)$$

이는 저역통과필터의 특성을 유지하며 필터의 과도특성에 진동이 없고 과도기간이 가급적 짧도록 설계된 것으로 중첩방지효과 외에 최소자승법이 고려해야할 고조파 차수를 줄여주는 역할을 한다.

2.3 직류성분의 제거

전류신호에 포함된 직류성분을 제거하기 위해 식 (5)와 같이 감쇠특성을 고려한 2샘플 FIR 필터를 사용하였다.[5]

$$y_k = x_k - \frac{x_{k-1}}{\exp(\Delta t/\tau)} \quad (5)$$

여기서, Δt : 샘플링 간격 τ : 시정수

x_k : 현재 샘플의 값

이 필터의 크기 및 위상특성은 식 (6)과 같이 나타난다.

$$MAG = \sqrt{E_n^2 + F_n^2} \quad (6)$$

$$ph = \tan^{-1} \frac{F_n}{E_n}$$

$$E_n = 1 - \frac{1}{\exp(\Delta t/\tau)} \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right)$$

$$F_n = \frac{1}{\exp(\Delta t/\tau)} \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right)$$

여기서, n : 고조파 차수 N : 주기당 샘플링 수

따라서 식 (5)와 같은 FIR필터를 통과한 전류 신호는 식 (6)에 따라 크기와 위상 보정이 이루어진다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 선로 길이의 90[%]를 포함하며 임피던스 평면의 원점을 통과하는 모퉁성을 차단 영역으로 하였다. 제시된 거리계전 알고리즘은 FIR필터를 통과한 전류의 크기와 위상을 보상하고 영상전류를 보정한 후에 선로의 정상 임피던스를 계산한다. 알고리즘의 흐름도는 그림 1과 같다.

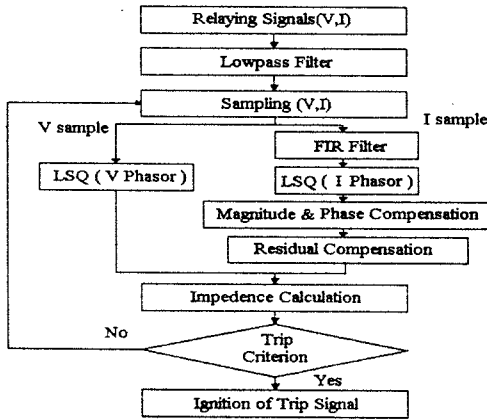


그림 1. 계전 알고리즘의 흐름도

본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 2에 나타난 4모선의 154[kV]급 송전계통에서 EMTP를 이용하여 사고 데이터를 생성하였다. 길이가 80[km]인 송전선에서 사고점을 변화시키면서 (10[%], 30[%], 50[%], 70[%], 90[%] ; 10[%] = 8[km]) 전압 위상각 0도인 경우와 90도인 경우에 대하여 a상 지락 사고를 모의하였다.

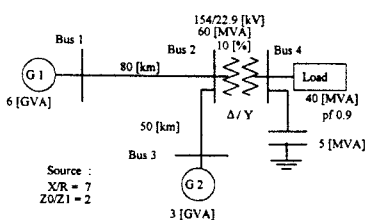


그림 2. 모델 계통

제안된 수정 최소자승법의 기본파성분 추출 능력을 보여주는 전류페이저 크기의 수렴특성이 그림 3에 나타나 있다.

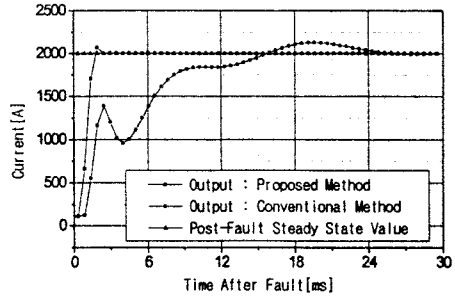
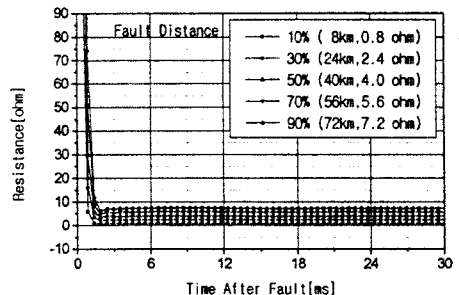


그림 3. 전류주파수 성분 실효치 수렴특성

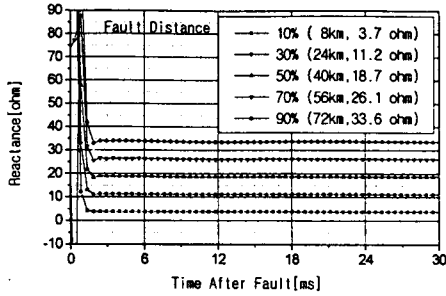
비교대상은 중첩방지 지역통과필터로 Butterworth 2차 필터를 사용하고 직류성분을 미지수로 포함시킨 최소자승법이다. 이때 정지대역 차단주파수는 100[Hz]로 논문에서 제시된 지역통과필터와 같다. 지역통과필터의 크기특성이 제안된 알고리즘에서 사용하는 것과 다르나 두 알고리즘의 비교를 위해 두 필터의 이득이 같도록 크기를 보상하였다.

제안된 알고리즘에 의한 결과가 사고후 1.9[ms]이후 5%범위내에서 보다 안정적으로 수렴하고 있다.

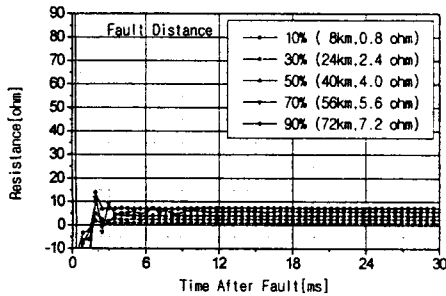
6[GVA]인 모선에 위치한 계전기에서 추정한 임피던스 궤적이 그림 4에 나타나 있다. 가로축은 사고후 시간을 나타내고, 세로축은 저항 또는 리액턴스를 나타낸다. 그림 4는 10[%], 30[%], 50[%], 70[%], 90[%]거리의 a상 사고인 경우의 저항 또는 리액턴스 궤적을 나타낸다. 그림 4(a)와 (b)는 전압 위상각이 0도인 경우의 저항과 리액턴스 궤적을 나타내며, 그림 4(c)와 (d)는 전압 위상각이 90도인 경우의 저항과 리액턴스 궤적을 나타낸다. 0도사고의 경우 임피던스 수렴특성은 사고후 2.4[ms] 이후에서 오차범위 5%내로 안정적으로 수렴 하고 있으며, 90도사고의 경우 임피던스 수렴특성은 사고후 6.1[ms] 이후에서 오차범위 5%내로 안정적으로 수렴 하고 있다.



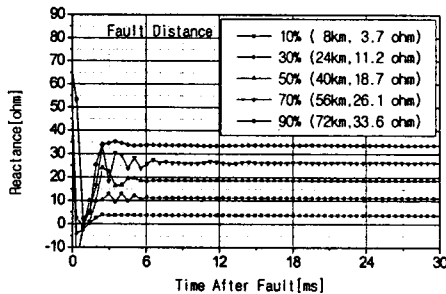
(a) 전압 위상각 0도 사고인 경우의 저항



(b) 전압 위상각 0도 사고인 경우의 리액턴스



(c) 전압 위상각 90도 사고인 경우의 저항



(d) 전압 위상각 90도 사고인 경우의 리액턴스

그림 4. 고장에 따른 임피던스 궤적

이 그림으로부터 제안된 알고리즘이 만족스럽게 동작함을 알 수 있으며, 실용적으로 중요한 수렴안정성과 속도의 특성이 매우 좋음을 알 수 있다.

그림 5는 사고 위상각 0도 및 90도인 내부 지락 사고에서의 계전알고리즘의 동작시간을 나타낸다. 그림 5의 결과로부터 제시된 알고리즘이 모델계통의 내부 사고에 대하여 4[ms] 내에 동작함을 알 수 있다.

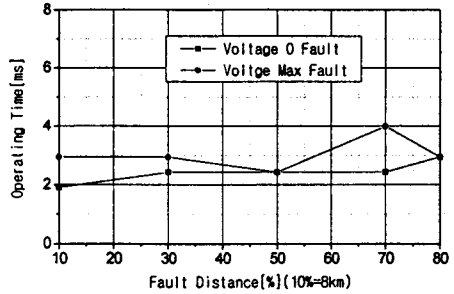


그림 5. a상 지락 사고에 대한 계전기 동작 시간

4. 결 론

본 논문에서는 고속거리계전 알고리즘으로 최소자승법에 기초한 왜곡 계전신호로부터의 페이서 추출법을 제안하였다. 페이서 추출의 속도와 정확도를 개선하기 위해 필터의 과도기간이 짧은 저역통과 필터를 제안 하였으며 전류에만 존재하는 직류요소를 제거하기 위해 전류신호에만 FIR필터를 적용하였다. 이 두 필터에 의해 최소자승법의 사용 데이터 윈도우를 3 샘플로 최소화 시켰다.

사례연구의 결과로부터 제안된 알고리즘은 사고이후 1/3주기정도에서 안정적으로 페이서값을 추출하고있음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Sang-Hee Kang, Raj K. Aggarwal, Allan T. Johns, "Digital Distance Relaying Based on Fast Haar Transformation Techniques", 27th Universities Power Engineering Conference, Bath, United Kingdom, Sep. 1992
- [2] D. D'Amore, A. Ferrero, "A Simplified Algorithm for Digital Distance Protection Based on Fourier Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, Jan. 1989, pp. 157-164
- [3] D. B. Fakruddin, K. Parthasarathy, "Simplified Algorithms Based on Haar Transforms for Signal Recognition in Protective Relays", Proceedings of the IEEE, Vol. 73, No. 5, May 1985, pp. 940-942.
- [4] M.S. Sachdev, M. Nagpal, "A Recursive Error Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July. 1991, pp. 1008-1015
- [5] Sang-Hee Kang, Jong-Keun Park, Nam-Ho Kim, "A New Digital Distance Relaying Based on the Fast Haar Transformation Using a Half Cycle Offset Free Signals", Trans. of the IEE of Japan, Pt. B, Vol. 114, No. 6, 1994, pp. 601-608