

진행파 모드 분해 기법을 이용한 고속 고장점 표정

홍 준희
경원대학교 전기공학과

조경래 김성수 박종근
서울대학교 전기공학과

A Fast Fault Location Method Using Modal Decomposition Technique of Traveling Wave

Jun-Hee Hong^{*}
Kyungwon University

Kyung-Rae Cho Sung-Soo Kim Jong-Keun Park
Seoul National University

Abstract: In this paper, a good fault location algorithm will be presented, which uses novel signal processing techniques and takes a new paradigm to overcome some drawbacks of the conventional methods. The main feature of the method is that it uses the high frequency components in fault signal and considers the influence of the source network by using a traveling wave concept.

1. 서론

진행파의 입장에서 본 선로에서의 사고발생은 파의 진파매질이 변하는 것이고 매질의 순간적인 변화는 사고지점에서 전압의 붕괴로 나타나며 이는 계전기가 설치된 지점에서 상용주파수 이외의 성분을 가지는 진행파의 형태로 감지가 된다. 이때 사고지점에서의 전압붕괴의 양상은 반사가 일어나는 매질의 경계 조건, 사고발생 전압 위상각 등 사고의 물리적 조건에 따라 달라지는데 그림 1과 같이 고장저항과 전원을 사용하여 회로적으로 표현할 수 있다.

즉, $t=0$ 인 순간에 사고가 발생한 경우, 사고지점에서 정상상태의 전압과 크기가 같고 부호가 반대인 전압이 인가되는 것으로 전압붕괴를, 고장저항으로 경계면의 전기적 특성을 나타낼 수 있다.

그리고 사고 이후의 전압과 전류 성분은 그림 1의 고장 모델에서 보는 바와 같이 사고 이전의 정상상태 성분과 사고로부터 인가된 성분의 합으로 표현할 수가 있다. 사고 이후의 값을 (i_{post}, v_{post})로, 사고 전의 값을 (i_{pre}, v_{pre})라 하면 중첩의 원리에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{post} &= i_{pre} + i_{fault} = i_{pre} + (i_{f-steady} + i_{f-transient}) \\ v_{post} &= v_{pre} + v_{fault} = v_{pre} + (v_{f-steady} + v_{f-transient}) \end{aligned} \quad (1)$$

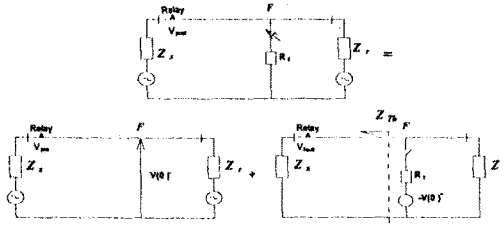


그림 1. 송전선로에서의 고장모델

v_{fault} 와 i_{fault} 가 사고와 관련된 모든 중요한 정보를 가지므로

사고를 감지하고 그 거리를 구할 때는 보통 v_{post} 와 i_{post} 에서 v_{pre} , i_{pre} 를 제거한 고장신호만을 이용한다. v_{fault} 와 i_{fault} 를 구성하는 성분중 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 는 상용주파수 성분만을 가지며 사고 후 충분한 시간이 흐른 뒤 새로이 도달하게되는 정상상태를 기술한다. 기존의 거리계전 방식들은 이 정상상태를 가급적 빨리 추정하여 사고 후의 계통상태를 알아내는 방식이라할 수 있으나 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 에 포함된 고조파 성분들로 인해 정확한 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 를 추정하는데 어려움이 있게 된다. 이 어려움은 사용하는 데이터의 수가 적을수록 커지는데 이는 60 Hz 성분과 같이 느린 신호를 정확히 추정하기 위해서는 그에 상응하는 최소한의 관측시간을 필요로 하기 때문이다. 즉, 고장신호 해석에 기본파 성분을 사용할 경우 필연적인 시지연이 따르는 것이다.

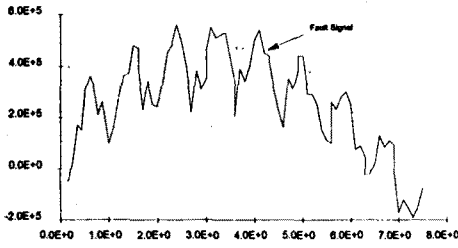
이런 관점에서 본 논문에서는 v_{fault} 와 i_{fault} 를 구성하는 성분 중 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 를 제외한 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 를 분석해 사고거리를 추정한다. 이를 위해 본 논문에서는 사고가 발생한 계통의 특성을 계전기단이 아닌 고장점에서 바라본 구동점 임피던스 함수의 꼴로 표현하였다. 이 구동점 임피던스 함수는 전원 임피던스와 사고거리 그리고 특성 주파수라는 특이 주파수 성분의 식으로 표현된다. 여기에 프로니 해석법에 의해 특성 주파수를 구하고, 진행파의 전파특성을 이용해 전원 임피던스 값을 추정하면 특성 주파수에서의 구동점 임피던스를 사고거리만의 함수로 나타낼 수 있고, 이로부터 쉽고 직접적인 풀이를 통해 사고거리를 구할 수 있다. 제안된 방식의 장점은 시시각각 변하는 전원측의 임피던스를 고려할 수 있다는 점과 60 Hz에 비하여 아주 높은 값의 특성 주파수 성분을 이용하므로 선로의 리액턴스 값이 상대적으로 강조되어 고장저항 값의 변화에 아주 강한 결과를 기대할 수 있다는 점이다. 그리고 사고 이후 반주기 정도의 데이터만으로도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 기존의 방식들에 비하여 월등히 빠른 고속의 사고거리 표정기법이라 할 수 있다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검토하였는데 기존의 방법들에 비하여 뛰어난 결과를 확인할 수 있었다.

2. 고장신호 분석 - 특성 주파수 검색

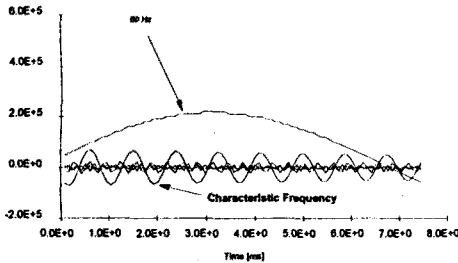
$v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 로부터 고장 거리 추정에 필요한 정보를 추출하기 위해서는 고장신호에 대한 분석기법이 뒷받침되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 프로니

해석(Prony analysis)을 사용하였다. 그림 2가 그 결과인데 주목할 점은 사고거리에 따라 사고파형에 존재하는 직류 성분이나 스펙트럼이 가장 강하게 나타나는 주파수 값 이하에서 특성 주파수라 한다. -이 달라진다는 점이다.

한편, 사고현상에 동반하는 써어지 등과 같이 시스템의 빠른 특성에 대한 정보는 직류 성분이나 저주파수 성분 보다는 고주파수 성분을 통해 효과적으로 관측될 수 있다. 이는 사고파형에 나타나는 직류 성분이나 저주파수 성분은 본질적으로 시스템의 느린 응답을 나타내는데 아주 빠른 응답에 대해서는 확률적 평균의 의미만-이것이 기본파 성분을 사용하는 방법에서는 오차가 된다.-을 반영하는 것이기 때문이다. 그리고 고주파수 성분들 중에서 사고정보를 가장 명확하게 담고있는 성분을 선택한다면 특성 주파수 성분이 될 것이다. 이 특성 주파수를 ω_r 이라면 ω_r 은 그림 1의 고장모델 시스템의 공진 주파수에 해당하며 이 값은 프로니 해석 결과로부터 쉽게 구할 수 있다.



(a) 고장 신호



(b) 고장 신호의 모드 분해

그림 2. 고장신호의 모드분해

본 논문에서 프로니 해석시 사용한 고장신호 모델은 식 (2)와 같다.

$$y(t) = Y_{dc} + Y_{pow} + Y_{r1} + Y_{r2} + Y_{r3} + Y_{r4} \quad (2)$$

여기서 Y_{dc} 는 직류 성분, Y_{pow} 는 기본파 성분, Y_{ri} 는 i 번째 공진 주파수 성분인데 송전계통의 경우 송전선로가 가진 분포성으로 인하여 연속적인 공진 주파수가 나타나게 되므로 이를 고려하는 것이다. 이들 공진 주파수들 중에서 특별히 첫 번째 공진 주파수 Y_{r1} 만을 사고 시스템에 대한 특성 주파수로 삼아 사고분석에 이용하는데 이는 $t=0$ 인 사고순간 고장모델 시스템에 인가되는 여기 신호가

$$v_f(t) = V_f \cos(\omega t + \varphi)u(t) \quad (3)$$

$$V_f(s) = V_f \left(\frac{s \cos \varphi - \omega \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) \cdot \frac{1}{s} \quad (4)$$

*: convolution integral in Laplace domain

와 같으므로 아주 높은 대역의 주파수 성분에 대해서는

여기 신호 자체가 작아서 관측되는 신호도 미약하기 때문이다.

3. 고장점에서 본 구동점 임피던스

송전선의 선로정수를 각각 $R[\Omega/km]$, $L[H/km]$, $C[F/km]$ 라고 하면 고장점 F에서의 전압과 전류 V_f, I_f 는 계전기에서의 전압과 전류를 V, I 라 할 때

$$\begin{aligned} V_f &= V \cosh \gamma l + Z_0 I \sinh \gamma l \\ I_f &= \frac{V}{Z_0} \sinh \gamma l + I \cosh \gamma l \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 위에서 Z_0 는 특성임피던스, γ 는 전파정수로써

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \\ \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{j\omega C(R+j\omega L)} \cong j\omega \sqrt{LC} = \frac{j\omega}{\mu} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같고, $\mu = \sqrt{LC}$ 는 진행파의 속도이다. 그러면 고장점에서 전원측을 바라본 구동점 임피던스를 Z_{th} 라면

$$Z_{th}(\omega, l) = \frac{V_f}{I_f} = Z_0 \frac{Z_r + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_r \tanh \gamma l} \quad (7)$$

이다. 위 식에서 구동점 임피던스 $Z_{th}(\omega, l)$ 에는 송전선로의 특성이 특성 임피던스 Z_0 와 전파정수 γ 를 통해 반영되고 있고, 보호구간 외부의 특성이 계전기단에서 전원측을 바라본 등가 전원 임피던스 Z_r 로 고려되고 있다. 이때 특성 임피던스 Z_0 와 전파정수 γ 는 주어진 값이므로 적절한 방식에 의하여 전원 임피던스 Z_r 를 구하고 $\omega = \omega_r$ 라면 Z_{th} 는 거리 l 만의 함수가 된다. 이때 ω_r 이 사고 시스템의 공진 주파수이므로

$$\omega_r = \min |Z_{th}(\omega, l)| \quad (8)$$

$$\text{Im}\{Z_{th}(\omega, l)_{\omega=\omega_r}\} = 0 \quad (9)$$

을 만족한다.

3.1 특성 주파수의 범위

고장거리가 l 일 때 관측할 수 있는 특성 주파수는

$$\frac{\mu}{4l} < f < \frac{\mu}{2l} \quad (10)$$

인 범위에 있게 된다.

3.2 반사계수를 이용한 전원 임피던스 추정

특성 임피던스 Z_0 인 선로가 계전기단의 모선에서 구동점 임피던스 혹은 전원 임피던스 $Z_r(\omega_r)$ 인 외부 전원계통과 연결되어 있고, 이 임피던스 부정합점에 후진파 $g_{fault}(\omega_r)$ 가 입사하여 전진파 $f_{fault}(\omega_r)$ 가 반사되어 나온다면 특성 주파수 성분에 대한 반사계수 $\rho(\omega_r)$ 은

$$\rho(\omega_r) = \frac{f_{fault}(\omega_r)}{g_{fault}(\omega_r)} \quad (11)$$

와 같이 정의되며

$$\rho(\omega_r) = \frac{Z_r(\omega_r) - Z_0(\omega_r)}{Z_r(\omega_r) + Z_0(\omega_r)} \quad (12)$$

인 관계가 성립한다. 따라서 전원 임피던스 $Z_r(\omega_r)$ 를

$$Z_s(\omega_r) = Z_0(\omega_r) \frac{1 + \rho(\omega_r)}{1 - \rho(\omega_r)} \quad (13)$$

와 같이 표현할 수 있고, 식 (11)에서 전진파 $f_{fault}(\omega_r)$ 와 후진파 $g_{fault}(\omega_r)$ 는 계전기가 설치된 지점에서 측정된 전압, 전류 신호를 푸리에 해석하여 구해지는 값이므로 식 (13)에 의해 전원 임피던스 $Z_s(\omega_r)$ 를 구할 수 있다. 이때 식 (12)에 나타나는 $Z_0(\omega_r)$, $\rho(\omega_r)$ 그리고 $f_{fault}(\omega_r)$ 와 $g_{fault}(\omega_r)$ 는 모두 특성주파수 ω_r 에 대한 페이서 표현을 사용하며 복소수 값이다. 식 (13)은 진행파의 전파 및 반사 특성을 이용하여 사고 직후 외부 전원계통의 상태를 추정함을 의미한다.

4. 구동점 임피던스 함수의 해법

특성 주파수와 전원 임피던스를 구하면 식 (7)의 구동점 임피던스는 아래와 같이 고장거리만의 함수이다.

$$\begin{aligned} Z_{Th}(l) &= Z_0 \frac{Z_s + jZ_0 \tan(\omega_r l / \mu)}{Z_0 + jZ_s \tan(\omega_r l / \mu)} \\ &= Z_0 \frac{\text{Re}(Z_s) + j(\text{Im}(Z_s) + Z_0 \tan(\omega_r l / \mu))}{(Z_0 - \text{Im}(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu)) + j \text{Re}(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu)} \\ &= Z_0 \frac{C + jD}{A + jB} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서

$$A = Z_0 - \text{Im}(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu)$$

$$B = \text{Re}(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu)$$

$$C = \text{Re}(Z_s)$$

$$D = \text{Im}(Z_s) + Z_0 \tan(\omega_r l / \mu)$$

이다. 식 (15)의 분모를 실수화하면

$$\begin{aligned} Z_{Th} &= Z_0 \frac{C + jD}{A + jB} = Z_0 \frac{(C + jD)(A - jB)}{A^2 + B^2} \\ &= Z_0 \frac{AC + BD + j(AD - BC)}{A^2 + B^2} \end{aligned} \quad (16)$$

가 되고, 위 식의 허수부를 $\tan(\omega_r l / \mu)$ 에 대하여 정리하고 식 (9)에 따르면

$$\begin{aligned} \text{Im}(Z_{Th}) &= AD - BC \\ &= -Z_0 \text{Im}(Z_s) \tan^2(\omega_r l / \mu) \\ &\quad + (Z_0^2 - \text{Im}^2(Z_s) - \text{Re}^2(Z_s)) \tan(\omega_r l / \mu) + Z_0 \text{Im}(Z_s) \\ &= a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = a_1(x - \alpha)(x - \beta) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

와 같은 2차 방정식을 얻는다. $x = \tan(\omega_r l / \mu)$ 이므로

$$\tan(\omega_r l / \mu) = \alpha, \beta \quad (18)$$

$$\omega_r l / \mu = \tan^{-1}(\alpha) \pm n\pi, \quad \tan^{-1}(\beta) \pm n\pi$$

이고, 이로부터 고장 거리 l 을 구할 수 있다. 그런데 특성 주파수가 $\omega_r = 2\pi f_r$ 일 때, 고장거리의 범위가 식 (10)에서

$$\frac{\mu}{4f_r} < l < \frac{\mu}{2f_r} \quad (19)$$

로 주어지므로 $\omega_r l / \mu$ 은

$$\frac{\pi}{2} < \omega_r l / \mu < \pi \quad (20)$$

의 범위에 있어야 한다. 따라서 식(18)에서 n 은 식 (20)를 만족하도록 정해진다. 그러면 α 와 β 에 의해 두개의 거리 l_1 과

l_2 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\tan^{-1}(\alpha) \pm n\pi}{\omega_r / \mu} \\ l_2 &= \frac{\tan^{-1}(\beta) \pm n\pi}{\omega_r / \mu} \end{aligned} \quad (21)$$

이 두 값중 하나는 구동점 임피던스가 최대가 되는 값이고, 다른 하나는 최소가 되는 값이다. 따라서 $Z_{Th}(l_1)$, $Z_{Th}(l_2)$ 중에서 작은 값이 되는 거리가 고장 거리이다. 이는 그림 3을 보면 쉽게 이해할 수 있다. 구동점 임피던스의 허수부가 0이 되는 곳만 함수의 주기성 때문에 여러 곳이나 식 (20)를 만족하는 거리는 30km와 60km뿐이며 이 중 60km에서 구동점 임피던스가 최소가 된다.

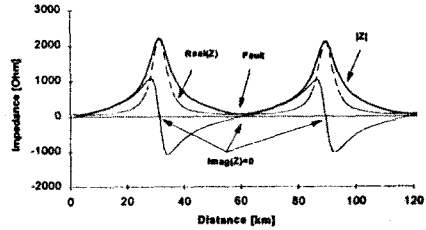


그림 3. 60 km 사고에 대한 구동점 임피던스

5. 사례 연구

제안된 방법의 타당성을 검토하기 위해 본 논문에서 수행한 모의실험에서 사용한 고장 데이터는 과도 현상 프로그램인 EMTP를 사용해 얻었으며 이때 샘플 속도는 11520 Hz로 이는 60Hz 한 주기당 192 샘플에 해당한다. 이 경우 검출 가능한 최대 주파수는 5760Hz가 된다. 한편 고장 데이터는 12 bit의 해상도에 약 2 bit의 오차를 가지도록 하였다. 또한 특성 주파수를 검출하기 위한 푸리에 해석시 기본파의 3/7주기에 해당하는 86개의 고장 데이터를 사용하였다.

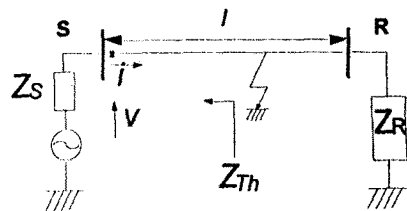


그림 4. 모델 계통

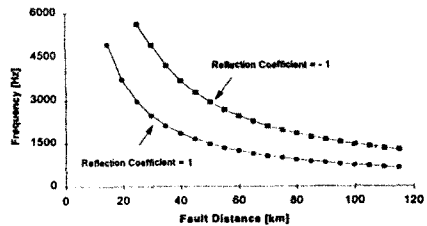


그림 5. 고장 거리에 대한 특성 주파수

그림 4가 사고모의 계통에서 먼저 사고거리와 특성 주파수와와의 관계를 알아보기 위하여 $Z_r = 0$ (반사계수가 -1)인 경우와

$Z_s = \infty$ 인(반사계수가 1)인 경우에 대하여 사고거리리를 바꾸어 가며 특성 주파수를 구해보았다. 그림 5가 그 결과인데 사고거리가 멀수록 특성 주파수는 작아지고 사고거리가 가까우면 특성 주파수는 커진다. 또한 $Z_s = 0$ 일 때의 특성 주파수는 $Z_s = \infty$ 일 때의 2배이다. 같은 거리에 대해서는 반사계수가 1일 때 최소의 특성 주파수가 나타나고 반사계수가 -1일 때는 최대의 특성 주파수가 구해진다. 한편 전원 임피던스 Z_s 가 0에 가까워지고 사고거리가 25km보다 작아지면 특성 주파수가 Nyquist 주파수보다 커지게 되므로 단락용량이 큰 곳의 근접사고에 대응하기 위해서는 샘플 속도를 키워야 할 것이다. 그림 6은 반사계수 1일 때와 -1일 때 제안된 방법에 의해 사고거리리를 추정한 결과이다. 25km 이상의 거리에서 두 경우 모두 매우 정확한 결과를 보이고 있다. 그림 7은 전원 임피던스 추정 오차와 사고거리 표정 결과 사이의 관계를 보이고 있다. 그림에서 전원 임피던스 추정이 다소 부정확해도 거리추정 결과의 정확성은 크게 영향받지 않음을 알 수 있는데 이는 제안된 알고리즘이 전원 임피던스 추정오차에 강인함을 의미하는 것이다.

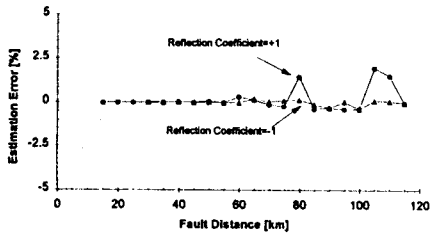


그림 6. 각각의 고장 거리에 대한 추정된 고장거리

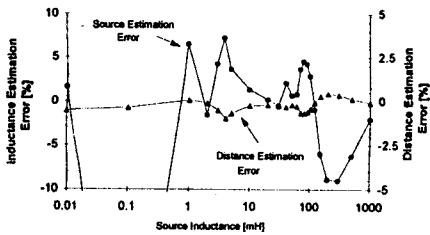


그림 7. 전원 인덕턴스 추정 오차와 추정거리

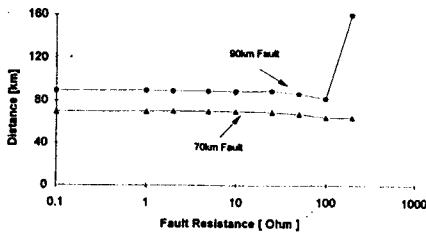


그림 8. 고장저항에 따른 고장 거리 계산 결과

제시된 알고리즘이 사고지점의 고장저항이 송전선의 특성 임피던스보다 매우 작은 경우를 가정한 것이므로 고장저항이 거리표정 결과에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 8이 그 결과인데 이로부터 50Ω 정도의 고장저항까지는 고장거리 계산에 영향을 거의 미치지 않으며 100Ω 이상에서 오차가 커지게 된다. 기존의 거리표정 기법들이 10Ω 정도의 고장저항 값에도 정확성이 크게 떨어졌음을 고려하면 제시된 방법이 고장저항에 매우 강인하다고 할 수 있다.

그림 9는 고장위상과 거리표정 결과와의 관계이다. 고장위상 θ 부근에서 일어난 사고는 사고신호에 고주파 성분이 거의 없어 특성 주파수 성분 추정시 오차가 발생하게 되고 그에 따라 거리표정 결과도 영향을 받게 된다. 그러나 고장위상이 90° 이상이 되면 큰 오차를 보이지 않는다.

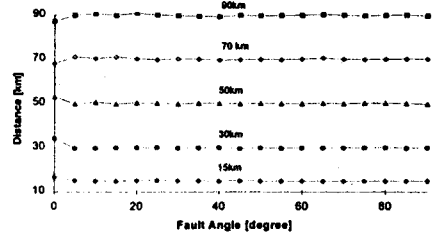


그림 9. 고장 위상에 따른 고장 거리

6. 결론

본 논문에서는 진행파 모드분해 기법을 이용한 고속 고장점 표정 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 시시각각 변하는 전원측의 임피던스를 고려할 수 있다는 점과 60 Hz에 비하여 아주 높은 값의 특성 주파수 성분을 이용하므로 선로의 리액턴스 값이 상대적으로 강조되어 고장저항 값의 변화에 아주 강인한 결과를 기대할 수 있다. 그리고 사고 이후 반주기 정도의 데이터만으로도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있다. 단, 본 고장점 표정기법이 진행파를 이용함에 따라 고장위상 0° 사고와 근접사고에 대한 단점은 그대로 가지므로 이에 대한 대책이 필요할 것이다.

참고 문헌

- [1] O. Chaari, P. Bastard and M. Meunier, "Prony's Method: An Efficient Tool for the Analysis of Earth Fault Currents in Peterson-Coil-Protected Networks", IEEE PES Winter Meeting, Jan./Feb. 1995, 95 WM 031-5 PWRD.
- [2] Junhee Hong, Jongkeun Park, "A Time-Domain Approach to Transmission Network Equivalents Via Prony Analysis for Electromagnetic Transients analysis", IEEE PES Winter Meeting, Jan./Feb. 1995, 95 WM 112-3 PWRD.
- [3] 조경래, 정병태, 홍준희, 박종근, "송전선보호를 위한 적분 근사 거리 계산 알고리즘의 최적 적분 계수 결정", 대한 전기 학회 논문지 제 44권 제 2호, pp. 153- 159, 1995년 2월.