

프로니해석을 이용한 과도신호에서 기본 주파수 검출

조경래*, 강용철, 김성수, 박종근
서울대학교

강상희
영지대학교

홍준희
경원대학교

Extraction of the Fundamental Frequency from Transient Signals Using Prony's Analysis

K.R. Cho, Y.C. Kang, S.S. Kim, J.K. Park
Seoul National University

S.H. Kang
Myong-Ji University

J.H. Hong
Kyung-won University

Abstract

This paper presents a method for the extraction of the fundamental frequency from transient signals using Prony's analysis. There exists transient voltage and current after a fault including an exponentially decaying dc component and harmonics as well as the fundamental frequency. As Prony's analysis uses exponentially decaying functions as basis functions it can extract the fundamental frequency precisely from transient signals. The results of comparison with DFT are also shown.

1. 서론

전압/전류의 기본파 성분을 추출하여 사고를 판정하는 계전기는 사고 발생 후의 과도 기간에 발생하는 신호로부터 얼마나 짧은 시간에 또는 정확하게 기본파 성분을 추출하느냐에 따라 계전기의 성능이 좌우된다. 과도 신호에서 기본파 성분을 추출하기 위하여 현재까지는 주로 사용하였던 방법으로는 푸리에 변환 등 직교함수법이 있다.[1,2]

푸리에(Fourier) 변환은 임의의 신호를, 직류 성분, 기본파 성분 및 고조파 성분들의 선형 결합으로 표현되며, 그 크기는 모두 일정하다고 가정하고, 각각 성분의 크기를 추출할 수 있는 방법이다. 이는 연산 부담이 적어 실제 구현이 용이하므로 기존의 디지털 계전 방식에서 주로 사용되어 왔다. 그런데, 계통에 고장이 발생하는 경우에는, 전압, 전류에 기본파 성분뿐만 아니라, 지수적으로 감소하는 직류 성분, 그리고 기타 고조파 성분이 존재한다. 그런데, 기본파 성분을 제외한 다른 성분은 지수적으로 감소하여 과도기간이 지난 후에는 존재하지 않으므로, 그들의 크기를 지수적으로 감소하지 않는 일정한 상수로 가정하는 푸리에 변환을 이용하는 경우에는 기본파 성분을 추출하는 과정에서 오차를 포함하게 된다. 또한, 푸리에 변환은 기본 주파수 성분을 추출하는데, 한주기 또는 어떤 조건하에서는 반주기 동안의 데이터가 필요하므로, 계전기 동작 시간을 단축하는 데, 근본적인 한계점을 갖고 있다.

프로니 해석은 신호를 지수적으로 감소하는 성분들의 선형결합으로 표현된다고 가정하고, 신호안에 포함되어 있는 각 성분의 주파수와 지수적으로 감소하는 그 성분의 크기를 구하는 방법이다. 그런데, 이 방식은 계산량의 부담으로 인한 구현의 어려움으로 인하여 과거에는 보호 계전 분야에는 거의 사용되고 있지 않았으나, 최근 들어 마이크로프로세서의 눈부신 발전으로

다시 연구되어지기 시작하였다.[3,4]

참고문헌 [3]에는 프로니 해석을 사고시 과도신호에 존재하는 공진주파수 성분을 추출하는 가능성을 검증하였다. 공진 주파수 성분은 기본파에 비해 매우 높은 주파수 성분을 가지므로, 비록 짧은 과도 기간이라 하더라도 그 성분을 추출할 수 있다. 하지만 사고시 발생하는 공진 주파수 성분은 매우 큰 대역에 존재하는데, 현재에 사용하고 있는 변류기, 전압 변성기의 저주파 통과 특성으로 인하여 계전기의 입력으로 들어오는 신호에는 그러한 성분이 존재하지 않게 되고, 이로 인하여 현실적인 문제점이 발생한다.

본 논문에서는 프로니 해석을 이용하여 고장시 발생하는 여러 성분이 포함된 신호에서 기본파 성분을 추출하는 방법에 대한 연구결과를 제시한다. 과도 신호에서 기본파 성분의 크기를 검출하는데 필요한 최소의 데이터 윈도우의 폭과 샘플링 수에 대하여 검토하였으며, 또한 푸리에 변환과도 비교하였다.

II. 프로니해석

프로니 해석법은 주어진 신호를 최소 자승오차의 관점에서 다음 식과 같이 지수적으로 감소하는 정현파들의 선형 결합으로 표현하는 방법이다.[4]

$$x(t) = \sum_{k=1}^q A_k e^{-\alpha_k t} \cos(2\pi f_k t + \theta_k)$$

여기서, q는 기저 함수의 개수 즉, 모드 수를 나타내며, A_k 는 크기, α_k 는 감쇄정수, f_k 는 주파수, θ_k 는 위상이다.

프로니 해석법은 주파수 대역의 스펙트럼을 정확하게 구할 수 있고, 인접한 주파수 성분을 구별하는 주파수 분해능력이 뛰어난 방법이다. 주어진 신호의 주파수 뿐만 아니라 감쇄정수까지 구하므로 푸리에 해석의 한계를 극복하고 주어진 신호를 s평면에서 근사 유리함수 꼴로 표현할 수 있다.

III. 사례 연구

4.1 모델 계통 및 지역통과 필터

사례연구에서 사용한 모델 계통은 345[kV]이며, 그림 1과 같고, S 모선과 R 모선사이의 송전선에 지락사고를 모의하고, EMTP를 이용하여 그림 1의 계전기위치에서 주기당 192 샘플로 전압, 전류를 얻었으며, 이를 설계한 3차 Butterworth 저역통과 필터를 통과시켰으며, 이의 크기특성과 위상특성은 그림 2에 나타나 있다.

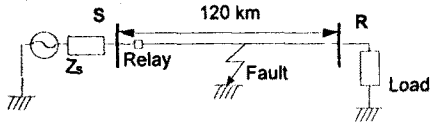
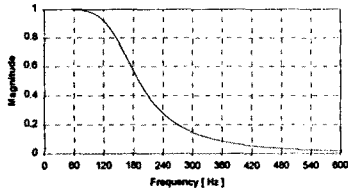
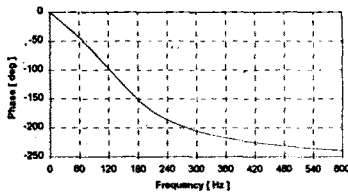


그림 1. 모델 계통



(a) 주파수 특성



(b) 위상특성

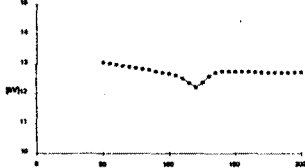
그림 2. 설계한 저역 통과 필터

4.2 기본파 성분 추출

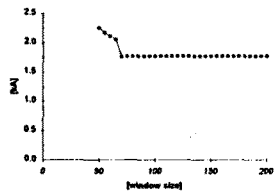
4.2.1 사고 위상각에 따른 전압, 전류 추정

사고 거리를 일정하게 하고, 사고 위상각이 0도, 50도 90도인 사고에 대하여, 윈도우의 시작점은 사고 발생 순간으로 고정하고, 윈도우 크기를 변화시면서 프로니 해석으로부터 얻은 기본파의 전압, 전류의 크기를 도출하였다.

(1) 15 [km] 지점의 0도 사고시 전압, 전류



(a) 전압



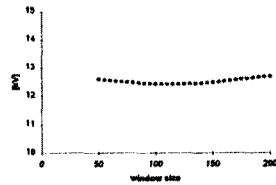
(b) 전류

그림 3. 15 [km] 지점의 0도 지락사고시 전압, 전류

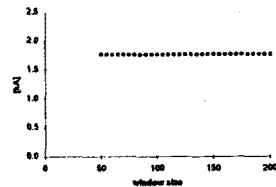
그림 3의 결과에서 알 수 있듯이, 0도 사고인 경우에 전압은 윈도우의 크기가 120-130인 경우에 약간 흔들리지만, 윈도우의 크기가 50(약 1/4 주기) 이상이 되면, 어느 정도 추정함을 알 수 있다. 또한 0도 사고이므로 전류에는 지수적으로 감소하는 성분이 많이 존재하지만, 프로니를 사용하는 경우에는 윈도우의 크기가

60(약 1/3 주기) 이상이 되면, 거의 완벽하게 기본 주파수의 크기를 추정함을 알 수 있다.

(2) 15 [km] 지점의 50도 사고시 전압, 전류



(a) 전압

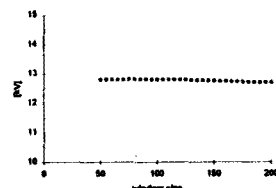


(b) 전류

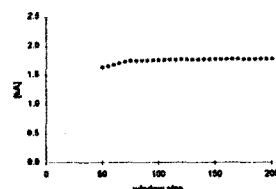
그림 4. 15 [km] 지점의 50도 사고시 전압, 전류

사고 위상각이 50도인 경우에는, 윈도우의 크기가 50(약 1/4 주기) 이상이 되면 전압, 전류 모두 정확하게 추정하였다.

(3) 90도 사고



(a) 전압



(b) 전류

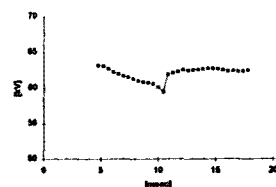
그림 5. 15 [km] 지점의 90도 사고시 전압, 전류

90도 사고의 경우에도 50도 사고의 경우와 마찬가지로 전류뿐만 아니라, 전압의 경우에도 매우 정확하게 추정하였다.

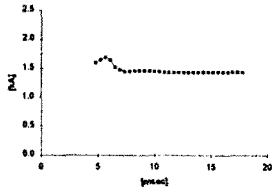
4.2.2 시간에 따른 추이

윈도우의 크기를 84 샘플로 일정하게 하고, 시간에 따라 데이터 윈도우를 옮겨 가며 얻은 프로니 해석 결과를 제시하였다.

(1) 0도 사고, 15 [km] 사고



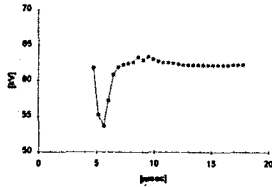
(a) 전압



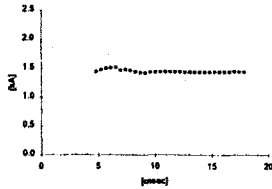
(b) 전류

그림 6. 0도 사고, 15 [km] 사고의 시간에 따른 추이

(2) 90도 사고, 15 [km] 사고



(a) 전압



(b) 전류

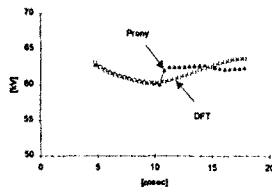
그림 7. 90도 사고, 15 [km] 사고

그림 6, 그림 7의 결과에서 알 수 있듯이, 시간에 따라 윈도우를 변화하더라도, 약간의 오차가 있지만, 참값에 가까운 값을 추정함을 알 수 있다.

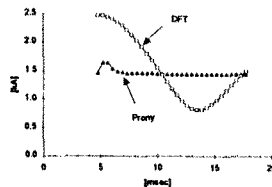
4.3 푸리에 변환과 프로니 해석의 비교

데이터 윈도우를 반주기인 96 샘플로 고정하고, 시간을 변화시켜 DFT와 프로니 해석의 결과를 비교하였다.

(1) 0도 사고, 15 [km]의 경우의 비교



(a) 전압



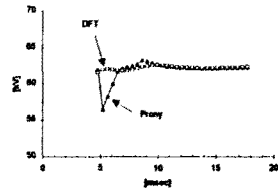
(b) 전류

그림 8. 0도 사고, 15 [km]의 경우의 비교

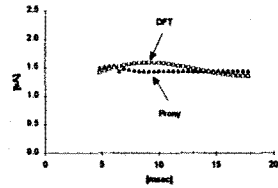
전압의 경우에는 DFT와 프로니 해석의 결과는 거의 같았으나, 전류의 경우에는 지수 감소하는 직류 성분을 고려하지 못하는 DFT에 비하여 프로니해석의 결과

가 좋았다.

(2) 90도 사고, 15 [km] 사고의 비교



(a) 전압



(b) 전류

그림 9. 90도 사고, 15 [km] 사고의 비교

전압의 경우에는 0도 사고의 경우와 비슷하지만, 90도 사고이므로 전류에는 직류 성분이 적어 전류의 경우에는 DFT의 결과와 프로니 해석의 결과가 거의 비슷하지만, 프로니 해석의 결과가 약간 나음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 지수적으로 감소하는 함수를 기저함수로 선택하는 프로니 해석을 사용하여 과도신호를 해석하였고, 푸리에 변환과 비교하였다. 그 결과, 전압의 경우에는 푸리에 변환보다 큰 장점이 없었으나, 지수적으로 감소하는 직류 성분이 많은 전류의 경우에는 프로니 해석이 적은 데이터 윈도우로도 기본파 성분을 검출할 수 있음을 보였다. 같은 데이터 윈도우를 사용하는 경우에는 전압의 경우에는 결과가 비슷하지만, 전류의 경우에는 옵션이 많으면 많을 수록 프로니 해석이 정확함을 알 수 있었다.

V. 참고문헌

- [1] D.D'Amore, A. Ferrero, "A Simplified Algorithm for Digital Distance Protection Based on Fourier Techniques",
- [2] 강상희, 박종근, "Offset이 제거된 반주기 데이터를 사용하는 고속 Haar변환에 기초한 디지털 거리 계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제41권, 제9호, pp.973-983, 1992년 9월
- [3] 조경래, 정병태, 홍준희, 박종근, "송전선보호를 위한 적분 근사 거리 계전 알고리즘의 최적 적분 계수 결정" 대한 전기학회 논문지, 제44권 제2호 1995 2, pp.153-159
- [4] O. Chaari, P. Bastard and M. Meunier, "Prony's Method: An Efficient Tool for the Analysis of Earth Fault Current in Petersen-Coil-Protected Networks", IEEE Trans on PWRD, Vol. 10, No. 3, July 1995, pp.1234-1241