

이산신호에서 실시간 저주파 진동 파라미터 추정 Part II : 응용

김의선*, 심관식**, 문채주**
 신경대*, 목포대**

A Real Time Parameter Estimation of Low Frequency Oscillation in Discrete Signal Part II : Application

Eui-Sun Kim*, Kwan-Shik Shim**, Chae-Joo Moon**
 Shin-Gyeong University*, Mokpo University**

Abstract - 이 논문은 이산푸리에변환을 이용하여 시계열데이터에 포함되어 있는 파라미터를 추정하는 새로운 방법과 그 응용 결과를 기술하고 있다. 제안한 방법은 푸리에스펙트럼으로부터 직접 파라미터를 추정하는 방법으로 FFT의 장점을 이용할 수 있으므로 신호에 포함되어 있는 중요 주파수를 비롯한 저주파 진동 파라미터를 빠르게 추정할 수 있다. 이 논문에서는 단순한 산술계산만 수행하여 계동계수를 추정할 수 있도록 알고리즘을 단순화 하였다. 그리고 WSCC 계통에서 실측한 데이터에 제안한 알고리즘을 적용하여 효율성을 검증하였다.

1. 서론

최근 컴퓨터 네트워크 기술의 발달로 디지털신호처리 기술이 빠르게 성장하고 있다. 1960년대에 고속푸리에변환(fast Fourier transform, FFT) 알고리즘이 개발된 이후, 이산푸리에변환(discrete Fourier transform, DFT)은 다양한 산업분야에 광범위하게 적용되고 있다[1-2].

이산신호에서 파라미터를 추정하기 위하여 다양한 파라미터 추정기법들이 제안되고 있는데, 파라메트릭 법(parametric method)과 비파라메트릭 법(non-parametric method)으로 분류할 수 있다. 비 파라메트릭법은 DFT에 기반을 두고 파라미터를 추정하므로 계산시간이 빠르고 알고리즘이 단순하다. 반면에 파라메트릭 법은 이산데이터를 자동회귀이동평균(Auto Regression Moving Average, ARMA) 모델로 변환하여 복소지수함수를 계산하는 방법이다. 따라서 통계신호처리에 기초한 파라메트릭법은 주파수해석에 기반을 둔 비파라메트릭 법보다 비교적 정확한 반면에 계산시간이 많이 소요된다.

전력계통에서 2.5Hz이하의 저주파진동 문제는 주로 선형모델을 이용하여 해석하였다. 선형해석과 함께 1980년대 후반부터 최근까지 시간영역의 이산데이터에서 직접 계통의 진동모드를 추정하고 이를 계통해석에 이용하려는 노력들이 진행되고 있다[3]. 전력계통에서 발생하는 진동은 계통의 안전성에 직접 영향을 주는 요인으로 저주파진동을 대규모 계통 붕괴의 원인으로 분석한 보고도 있다[4].

일정한 시간동안 계통에 잠재되어 있는 진동은 제어기를 포함한 계통 전체에 영향을 준다. 정상적인 상태에서는 충분히 극복할 수 있는 작은 진동이 장시간 지속되고, 동시에 다른 외란이 발생하면 대규모 계통붕괴로 이어질 수 있다. 그러므로 계통에서 발생하는 잠재적인 진동을 예측하는 것은 계통의 안전성을 유지하는데 필수적이다. 계동계수의 영향을 고려한 전력계통의 저주파 진동 해석에서는 1.0Hz 근처의 저주파수 대역이 주요 관심 주파수 대역이다. 그리고 주파수와 함께 전력계통의 동적특성을 파악할 수 있는 계동계수와 모드의 크기, 위상도 중요한 파라미터들이다.

이 논문에서는 FFT의 푸리에스펙트럼에서 이산신호를 지수감쇠사인함수로 적합하여 파라미터를 추정하는 방법의 실제적인 응용에 대해 기술하고 있다. 직선의 방정식과 푸리에 스펙트럼만으로 계동계수를 추정할 수 있으므로 단순 산술계산으로 파라미터를 추정할 수 있다.

이 논문에서 제안한 방법을 WSCC 계통 고장시 실측한 데이터에 적용하여 알고리즘의 효율성과 제안한 기법의 신뢰성을 검증하였다.

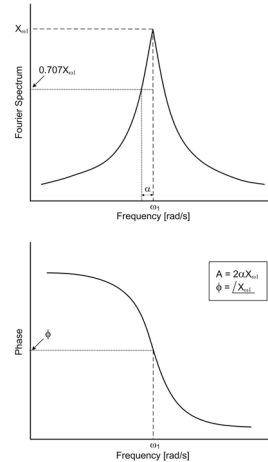
2. 이산푸리에변환과 파라미터 추정

이산푸리에변환을 이용해서 이산신호에 포함된 저주파 진동 파라미터를 추정하는 자세한 방법은 Part I에 기술되어 있다. Part I에서 기술한 파라미터 추정방법을 요약하면 다음과 같다.

먼저 정현파함수와 지수함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠정현파함수에서 중요한 파라미터는 계동계수와 주파수 그리고 모드의 크기와 위상이다. 이산신호를 푸리에변환하면 주파수에 대한 푸리에스펙트럼이 계산된다. 그러므로 관심 있는 저주파수에서 스펙트럼의 첨두치에 대응하는 주파수를 중요 주파수로 선택할 수 있다. 그리고 지수감쇠정현파함수의 푸리에스펙트럼에서 주파수가 첨두주파수에서 계동계수만큼 변화하면 첨두치는 70.7%만큼 감소하므로 푸리에변환 결과 계산된 첨두치와 첨두치 근처 스펙트럼에서 계동계수를 추정할 수 있다. 이들 관계는 그

림 1에 나타나있다.

모드의 크기는 계동계수와 첨두치의 곱의 2배이므로 첨두치와 계동계수를 알면 모드의 크기를 계산할 수 있다. 또한 지수감쇠코사인함수에서 모드의 위상은 지수감쇠코사인함수를 푸리에변환한 푸리에스펙트럼의 위상과 같으므로 푸리에스펙트럼의 위상으로부터 모드의 위상을 추정할 수 있다. 푸리에스펙트럼의 위상은 그림 1에 나타나있다.



〈그림 1〉 푸리에스펙트럼과 위상

3. 실제적인 방법

이산푸리에변환은 주어진 신호의 샘플링과 구간간격 및 데이터 수에 따라서 스펙트럼 누설이 발생한다. 또한 데이터 취득 장치에서 실시간으로 취득한 데이터는 잡음을 포함하고 있기 때문에 파라미터를 정확하게 추정하는 것이 어려운 경우도 있다.

이산신호를 푸리에변환 하면, 푸리에스펙트럼은 일정한 주파수 간격을 가진 이산 값으로 나타난다. 스펙트럼은 첨두치를 중심으로 좌측과 우측 스펙트럼으로 나타나므로 좌측과 우측 스펙트럼을 이용하여 각각 계동계수를 추정할 수 있다. 동적시스템에서는 계동계수가 작은 경우가 중요하므로 좌우 스펙트럼으로 각각 계산한 값 중에서 작은 것을 중요 계동계수로 선택한다. 계동계수가 작으면 첨두치는 좌측과 우측 첫 번째 스펙트럼보다 훨씬 큰 값을 갖고 날카롭게 표현된다. 따라서 첨두치와 좌측 또는 우측 스펙트럼 사이를 직선으로 가정해도 큰 오차를 발생하지 않는다.

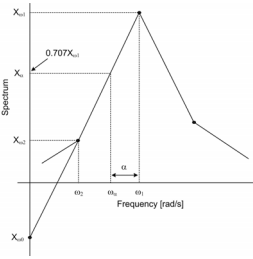
그림 2에는 첨두치를 중심으로 좌측과 우측 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 2에서 첨두치 좌측과 우측 첫 번째 스펙트럼을 직선으로 가정하면, 직선방정식으로부터 첨두치의 70.7%에 대응하는 주파수를 유도할 수 있다. 그리고 계동계수는 첨두치의 70.7%에 대응하는 주파수와 첨두주파수의 편차로부터 계산할 수 있다.

$$\omega_\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\omega_1 - \omega_2}{X_{\omega_1} - X_{\omega_2}} (X_{\omega_1} - \sqrt{2} X_{\omega_0}) \quad (1)$$

이 식에서 X_{ω_0} 는 직선방정식에서 $\omega = 0$ 일 때, 푸리에스펙트럼으로 다음 식과 같다.

$$X_{\omega_0} = X_{\omega_1} - \left(\frac{X_{\omega_1} - X_{\omega_2}}{\omega_1 - \omega_2} \right) \omega_1 \quad (2)$$

식 (1)은 첨두치 좌우스펙트럼이 첨두치보다 크게 작은 경우이다. 스펙트럼 누설이 없을 때, 계동계수가 작으면 첨두치가 좌우스펙트럼보다 훨씬 크게 나타난다. 만일 스펙트럼의 누설이 발생하면, 첨두치와 비슷한 좌우스펙트럼이 발생하고 이 경우에는 오차를 수반할 수 있고, 계동

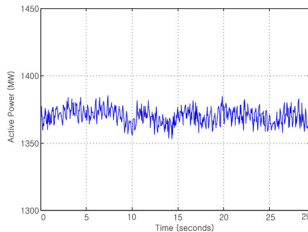


〈그림 2〉 푸리에스펙트럼과 제동계수

계수가 큰 경우에는 중요한 모드가 아니므로 동적해석에서는 이를 고려할 필요가 없다. 또한 주파수 간격이 매우 작은 경우 첩두치에 인접한 좌우 스펙트럼이 첩두치의 70.7% 이상에서 형성될 수 있는데 이 경우에는 첩두치의 70.7%에 가장 근사한 스펙트럼을 좌우스펙트럼으로 설정한 후 위에서 기술한 방법을 적용하면 된다.

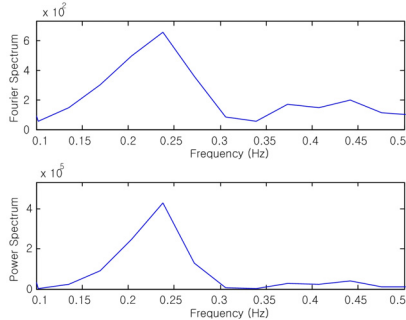
4. 실제 신호에 응용

이 논문에서는 문헌 [3]에 기술된 실제 전력계통의 고장에서 실측한 데이터에 제안한 알고리즘을 적용하였다. 그림 3은 고장 전 실측한 파형으로 샘플링 간격은 0.05초이고 29.5초까지 나타난 그림이다. 그림 3에서 진동의 크기가 작고, 주기가 뚜렷이 구별되지 않으므로 중요 모드를 판별하기 어렵다. 취득한 데이터에 이 논문에서 제안한 알고리즘과 Prony 법을 적용하여 저주파진동 파라미터를 추정하였다.



〈그림 3〉 WSCC 고장파형

그림 3에 나타난 데이터 FFT를 적용한 결과, 그림 4와 같은 푸리에 스펙트럼과 전력스펙트럼을 얻었다. 그림 4에서 첩두주파수는 0.2377Hz 이고, 주파수 구간 간격은 0.0339Hz이다. 그리고 푸리에스펙트럼의 첩두치는 430,190이다.



〈그림 4〉 푸리에스펙트럼과 전력스펙트럼

〈표 1〉 파라미터 추정결과

Method	Mode		Damping	주파수 (Hz)	A	angle (degree)
	Real	Imag				
FFT	-0.071	1.494	4.75	0.238	3.109	100.46
Prony	-0.094	1.363	6.86	0.217	5.465	149.90

표 1에는 그림 4에 나타난 스펙트럼에서 각각 파라미터를 추정된 결과를 나타내었다. 표 1에서 “FFT”는 이 논문에서 제안한 방법을 의미하고 “Prony”는 확장 Prony 법을 의미한다.

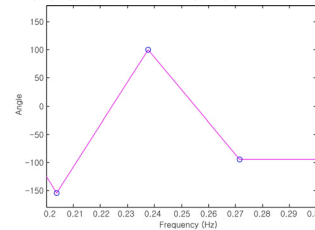
그림 4에 나타난 스펙트럼에서 첩두치에 대응하는 첩두주파수는 1.494[rad/sec]이다. 이 주파수가 신호를 지배하는 중요 주파수이다. 즉 그림 3에 나타난 실측 파형에서 중요한 주파수는 0.238[Hz]이다. 주어진 데이터수가 591개로 제한되어 있어 FFT의 주파수 해상도가 낮으므로

주파수 해상도 편차만큼 오차를 포함하고 있다. 푸리에변환의 특성상 더욱 정확한 주파수를 얻기 위해서는 해석시간을 더욱 크게 해서 주파수 간격을 작게 해야 한다.

그림 4에 나타난 푸리에스펙트럼에 대하여 FFT에 의한 파라미터 추정 방법을 적용해서 제동계수를 추정한 결과, -0.071을 추정하였다. 주파수가 1.494[rad/sec]이므로 푸리에스펙트럼에서 추정한 모드는 -0.071+j1.494이다.

모드의 크기는 정규화한 푸리에스펙트럼과 위에서 추정한 제동계수 크기 0.071과의 곱의 2배인 값으로 3.109로 계산된다. Prony 법에서는 5.465를 추정하여 약간의 오차가 있음을 알 수 있다. 그림 3에 나타난 실제 유효전력은 1375MW~1385MW 사이에서 변화하므로 주어진 신호의 변동폭이 작다. 따라서 모드의 크기는 상대적인 값이므로 두 방법의 오차가 큰 값은 아니다.

모드의 위상은 첩두 주파수 1.494[rad/sec]에 대응하는 스펙트럼의 위상으로 100.46°를 계산하였다. Prony 법에서는 149.9°를 추정하여 두 방법이 상당한 차이가 있다. 앞에서 기술한 것과 같이 FFT 법은 정확한 주파수에 대응하여 위상을 추정하기 때문에 주파수가 정확해야 한다. 이 논문에서 적용한 실제 시스템에서 취득한 데이터 수가 작아서 정확한 파라미터 추정에 한계가 있음을 알 수 있다.



〈그림 5〉 푸리에스펙트럼 위상

이산신호에서 파라미터를 추정하는 Prony 법과 같은 파라메트릭 법은 선형예측행렬을 구성하고 미지수를 계산할 때, 최소자승법을 필요로 한다. 그리고 예측다항식의 계수들로 구성된 다항식의 해를 계산해야 한다. 따라서 파라메트릭 법은 주어진 데이터수와 설정한 미지수의 수에 따라서 계산 시간이 많이 소요되고 복잡한 알고리즘을 필요로 하므로 많은 메모리를 필요로 한다.

반면에 이 논문에서 제안한 FFT에 의한 파라미터 추정 방법은 잘 개발된 FFT 알고리즘을 이용함으로써 계산시간이 빠르다. FFT는 주어진 이산데이터와 샘플링에 따라서 주파수 해상도가 민감한 영향을 받으므로 이 논문에서 제안한 알고리즘의 결과도 주어진 데이터와 구간간격에 영향을 받는다. 결과적으로 푸리에스펙트럼을 이용한 파라미터 추정에서 가장 중요한 요소 중에 하나는 FFT 결과 특정 주파수에 스펙트럼 누설이 적어야 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이 논문에서 제안한 알고리즘은 단순하고 계산 기억장소를 작게 필요하므로 FFT 알고리즘을 구현할 수 있는 DSP에도 탑재될 수 있어 전력계통의 실시간 신호처리에 적합하다.

5. 결 론

이 논문에서는 FFT로부터 시계열데이터에 포함되어 있는 파라미터를 추정하는 새로운 방법에 대해서 기술하고 있다. FFT에 기반을 둔 푸리에스펙트럼으로부터 파라미터를 추정하는 직접적인 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 FFT의 장점을 이용할 수 있으므로 신호에 포함되어 있는 중요 주파수를 비롯한 저주파 진동 파라미터를 빠르게 추정할 수 있다.

이 논문에서는 단순한 산술계산만 수행하여 제동계수를 추정할 수 있도록 알고리즘을 단순화 하였다. 그리고 전력계통에서 실측한 데이터에 적용한 결과, 제안한 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] W. L. Briggs, V. E. Henson, The DFT, An Owner's Manual for the Discrete Fourier Transform, SIAM, Philadelphia, 1995.
- [2] K. B. Howell, Principles of Fourier Analysis, Chapman & Hall/CRC, New York, 2001.
- [3] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf (1990) Initial Results in Prony Analysis of power System Response Signals, IEEE Trans. on power Systems, vol. 5 : 80-89
- [4] D. N. Kosterev, C. W. Taylor and W. A. Mittelstadt (1999) Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage, IEEE Trans. on power Systems, vol. 14, No. 3 : 967-979
- [5] 심관식, 남해론, "이산푸리에변환과 시계열데이터의 고속 파라미터 추정," 대한전기학회 논문지, Vol. 55A, No. 7, 2006.