

광역계통의 실시간해석을 위한 고속 저주파수 파라미터 추정

논문

58-6-4

Fast Estimation of Low Frequency Parameter for Real-Time Analysis in Wide Area Systems

김은주* · 심관식† · 김용구** · 김의선*** · 남해곤§ · 임영철§

(Eun-Ju Kim · Kwan-Shik Shim · Yong-Gu Kim · Eui-Sun Kim · Hae-Kon Nam · Young-Chul Lim)

Abstract - This paper presents a Fourier based algorithm for estimating the parameters of the low frequency oscillating modes. The proposed methods estimates various parameters(frequency, damping factor, mode magnitude, phase) by fitting Fourier spectrum and phase with a damped exponential cosine function. Dominant frequency is selected by taking frequency corresponding to the peak spectrum, and damping factor is estimated using the left/right spectra of Fourier spectrum. In addition, mode magnitude is calculated by the normalized peak spectrum, and phase is estimated from spectrum phase. Also, we introduce an accuracy index in order to determine the accuracy of the estimated parameters, and the index is calculated using the deviations of the peak spectrum and the left/right spectra. The parameter estimation methods proposed in this paper include very simple arithmetical processes, so the algorithms are simple and the calculation speed is very fast. The proposed methods are applied to test functions with two dominant modes. The results show that the proposed methods are highly applicable to low frequency parameter estimation.

Key Words : Time signal, Low frequency, Parameter estimation, Fourier spectrum, Discrete Fourier transform

1. 서 론

최근 들어 세계 각국에서 전통신술에 급성장한 컴퓨터 네트워크기술을 접목하는 융합기술 개발을 활발하게 추진하고 있다. 전력계통에서도 계통 운전의 안전성확보를 위하여 고속 네트워크 기술과 데이터 취득기술을 이용하기 위한 다양한 노력을 시도하고 있다. 가장 활발한 분야 중에 하나로 WAMS(wide-area monitoring system) 및 WACS(wide-area control system)와 관련된 분야를 들 수 있다[1-3]. 이들은 실시간으로 시각동기화 된 신호를 취득하고 위상동기 기술(synchrophasor technology)을 적용하여 전력계통을 모니터링하고 제어하는 기술을 포함하고 있다.

이와 같이 실시간으로 데이터를 취득하였을 때, 취득데이터로부터 유용한 정보를 얻기 위하여 다양한 이산신호처리(discrete signal processing)를 필요로 한다. 지금까지 이산신호처리에서 가장 핵심적인 기술 중에 하나로 이산푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 들 수 있는데, 이산신호의 주파수영역 해석에서 필요한 주파수를 계산하는데, 빠른 계산속도와 정확도를 가지고 있어 다양한 산업 분야에 응용되고 있다.

전력계통과 같은 동적계통에서 계통 운용과 해석 목적에 따라서 1Hz 근처의 저주파수 대역 해석이 필요할 경우가 있다. 지금까지 전력계통에서 저주파진동해석은 선형모델에 기반을 둔 모드 해석[4]에 의해서 이루지고 있다. 취득한 데이터를 이용할 때는 동적특성을 파악할 수 있는 저주파수와 관련된 파라미터들을 추정해야하는데 최근 다양한 알고리즘들이 제안되고 있다[5-11]. 동적특성을 파악할 수 있는 파라미터들로 주파수와 함께 계동계수와 모드크기, 위상들이 있는데, 최근 빠르게 발달하고 있는 디지털 네트워크 기술을 실시간으로 이용하기 위해서는 저주파수 파라미터를 빠르게 추정하는 기법이 필요하다.

이 논문은 이산푸리에변환에서 계산한 푸리에스펙트럼으로부터 직접 신호에 포함된 저주파수 대역의 파라미터를 고속으로 추정하는 방법에 대해서 기술하고 있다. 문헌 [11]에서는 이산푸리에변환으로부터 파라미터를 추정하는 기초적인 방법을 기술하고 있는데, 이 논문에서는 보다 실제적이고 경험적인 방법을 기술하고 있다. 먼저 문헌 [11]에서 제안한 계동계수 추정 방법을 단순한 산술연산만으로 계산할 수 있도록 개선하였다. 그리고 첩두치 근처에서 스펙트럼 위상이 급변하는 특성을 보완하기 위하여 위상의 교점으로부터 정확한 위상을 추정할 수 있는 위상보정방법을 개발하고 이를 이용하여 보다 정확한 주파수를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 추정한 파라미터들의 정확성 판단을 위하여 첩두치와 좌우스펙트럼의 편차에 근거한 정확도 지표를 도입하였다.

이 논문에서 제안한 저주파 파라미터 추정방법은 매우 단순한 산술과정만 포함하고 있으므로 알고리즘이 단순하고 계산속도가 매우 빠르다. 또한 작은 컴퓨터 기억용량만 소

* 정 회 원 : 전남대 공대 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 한국폴리텍 V대학 전기계측제어과 조교수

*** 정 회 원 : 신경대 정보통신학과 조교수

§ 정 회 원 : 전남대 공대 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 전남대 공업기술연구소 선임연구원

E-mail : simgong@ieee.org

접수일자 : 2009년 2월 7일

최종완료 : 2009년 5월 18일

요되므로 실시간 신호처리에 매우 적합한 알고리즘이다. 제안한 알고리즘을 시험함수에 적용한 결과, 연산 속도와 정확도 측면에서 저주파수 파라미터 추정에서 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

2. 파라미터 추정

2.1 기본 개념

정현파와 같은 주기적인 신호를 푸리에변환 하면, 주파수 성분들이 고조파 성분들로만 구성되어 있으므로 선스펙트럼으로 표현된다. 그러나 비주기신호는 임의의 주파수 성분을 갖는 사인 함수나 지수함수들의 적분으로 나타낼 수 있으므로 스펙트럼은 연속적으로 표현된다. 대부분 실제 취득한 신호의 스펙트럼은 연속적으로 나타나므로 중요한 침두치 근처의 스펙트럼도 연속스펙트럼으로 생각할 수 있다.

취득한 신호를 이산푸리에변환하면, 푸리에스펙트럼 크기와 스펙트럼위상을 얻을 수 있다. 이와 같은 푸리에스펙트럼이 1Hz 근처의 저주파수에서 연속적으로 표현될 때, 침두주파수를 중심으로 코사인(사인)함수와 지수함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠코사인(사인) 함수로 역변환 할 수 있다. 따라서 저주파수 대역의 푸리에스펙트럼과 위상으로부터 신호에 포함된 저주파수 파라미터인 제동계수와 주파수 그리고 모드의 크기와 위상을 추정할 수 있다. 그림 1은 이 논문의 기본 개념을 나타내고 있는데, 선택한 신호에 이산푸리에변환을 적용하여 푸리에스펙트럼과 위상을 계산하고, 계산한 푸리에스펙트럼에서 저주파수에 대응하는 침두주파수 근처의 스펙트럼으로부터 지수감쇠코사인(사인)함수를 계산하여 신호의 파라미터를 추정한다.

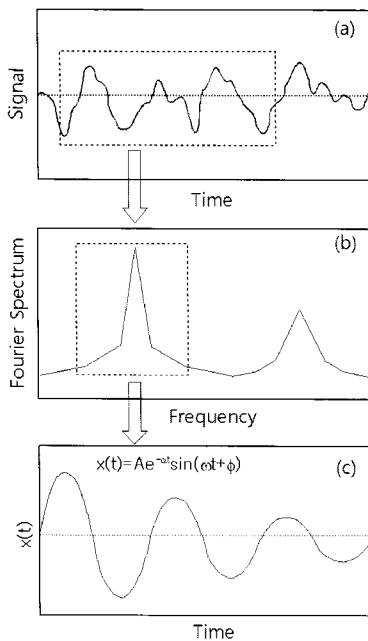


그림 1 기본 개념
Fig. 1 Basic Concepts

2.2 지수감쇠코사인함수의 푸리에변환

크기 A 를 가진 연속함수 $x(t)$ 가 주파수 ω_1 과 위상 ϕ_1 인 코사인함수와 제동계수 α 인 지수함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠코사인함수라 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = A e^{-\alpha t} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \tag{1}$$

이를 푸리에 변환하면[11], 푸리에스펙트럼 $X(\omega)$ 는 식 (2)와 같이 파라미터를 포함하는 복소함수로 표현된다. 이 논문에서는 복소함수의 크기를 푸리에스펙트럼 X_ω 라 하고, 위상을 스펙트럼위상 ϕ_ω 라 표현한다.

$$X(\omega) = \frac{A(\alpha + j\omega)\cos\phi_1 - A\omega_1\sin\phi_1}{\alpha^2 + \omega_1^2 - \omega^2 + j2\alpha\omega} = X_\omega \angle \phi_\omega \tag{2}$$

고주파수 대역에서는 주파수가 제동계수보다 매우 큰 값을 가지고 있으므로 단일 코사인함수나 사인함수로 표현할 수 있으나 주파수가 낮은 저주파수 대역에서는 제동계수에 따라서 지수감쇠사인함수나 지수감쇠코사인함수로 표현될 수 있다. 저주파수에서 지수감쇠코사인함수의 푸리에스펙트럼 크기와 위상의 전형적인 형태는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 침두주파수에서 제동계수가 작을수록 푸리에스펙트럼의 크기는 커지고, 다른 스펙트럼보다 날카롭게 표현된다.

식 (2)에서 주파수 ω_1 에 대응하는 위상을 ϕ_1 이라하고, 제동계수가 주파수보다 훨씬 작아 $\omega_1 \gg \alpha$ 가 성립하면, 주파수 ω_1 에서 푸리에스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(\omega_1) = \frac{A}{2\alpha} (\cos\phi_1 + j\sin\phi_1) \tag{3}$$

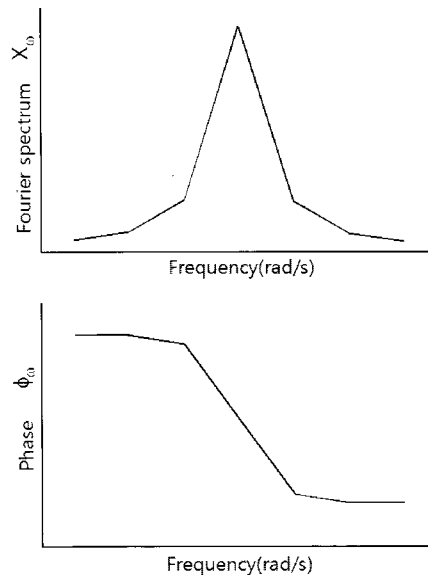


그림 2 지수감쇠코사인함수의 푸리에스펙트럼과 위상
Fig. 2 Fourier Spectrum & Phase of Damped Exponential Cosine Function

2.3 푸리에변환에서 파라미터 추정

지금까지 다양한 산업분야에 응용되고 있는 이산푸리에변환은 주로 시계열데이터에 포함된 정확한 주파수를 추정하는데 널리 이용되고 있다. 이산신호를 푸리에변환 하면 푸리에스펙트럼이나 전력스펙트럼을 얻을 수 있고, 이로부터 중요 주파수를 추정하여 주파수 해석을 한다. 그러나 푸리에스펙트럼의 위상은 주파수에 따라서 급변하므로 저주파수 해석에 제한적으로 이용되고 있다.

먼저 실제적인 파라미터 추정 방법을 기술하기 전에 푸리에스펙트럼의 크기와 위상으로부터 직접 지수감쇠코사인함수에 포함된 파라미터를 추정하는 방법에 대해서 간단하게 기술한다[11]. 식 (1)에 나타난 지수감쇠코사인함수에서 파라미터는 모드 크기 A와 제동계수 α , 주파수 ω_1 그리고 모드의 위상 ϕ 가 있다.

(1) 주파수 추정

이산푸리에변환에서 첨두스펙트럼에 대응하는 주파수는 이산신호에 포함되어 있는 중요 주파수를 나타낸다. 그러므로 주어진 신호를 푸리에변환을 하면, 중요한 파라미터 중에 하나인 주파수를 쉽게 얻을 수 있다. 관심 있는 1Hz 근처의 저주파수 대역의 푸리에스펙트럼 첨두치에 대응하는 주파수를 중요 주파수로 선택한다.

(2) 제동계수 추정

문헌 [11]에서는 제동계수를 추정하는 다양한 방법에 대해서 기술하고 있는데, 주파수 $\omega = \omega_1$ 에서 스펙트럼 크기 X_{ω_1} 과 주파수 $\omega = \omega_1 + \alpha$ 에서의 스펙트럼 크기 $X_{\omega_1 + \alpha}$ 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$X_{\omega_1 + \alpha} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_{\omega_1} \quad (4)$$

이 식은 주파수가 첨두주파수에서 제동계수만큼 변화할 때, 푸리에스펙트럼은 첨두치의 0.707배만큼 감소함을 의미한다. 그러므로 이산신호에 푸리에변환을 적용해서 푸리에스펙트럼의 첨두치와 첨두주파수를 알면 제동계수를 계산할 수 있다.

(3) 모드 크기 추정

식 (3)에서 주파수 $\omega = \omega_1$ 일 때, 푸리에스펙트럼 크기 X_{ω_1} 과 모드의 크기 A 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$A = 2\alpha X_{\omega_1} \quad (5)$$

모드의 크기는 주파수에 독립적인 함수로 푸리에스펙트럼의 첨두값과 제동계수의 곱에 비례하는 함수이고, 제동계수가 0에 근접할수록 푸리에스펙트럼은 무한대로 접근함을 알 수 있다. 따라서 푸리에스펙트럼과 제동계수를 알면 모드 크기를 계산할 수 있다.

(4) 모드의 위상

주파수 ω_1 에 대응하는 위상 ϕ_1 을 가진 지수감쇠코사인함

수에서 푸리에스펙트럼의 위상을 ϕ_{ω_1} 이라 할 때, 식 (3)에서 모드의 위상 ϕ_1 은 푸리에스펙트럼의 위상과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_1 = \phi_{\omega_1} \quad (6)$$

그러므로 이산푸리에변환 결과에서 모드의 위상도 쉽게 추정할 수 있다. 그러나 위상은 주파수에 따라서 매우 민감하게 변화한다. 예를 들면 1Hz의 주파수에서 모드의 위상은 1초에 360도가 변화하므로 주파수 해상도에 따라서 매우 크게 변화할 수 있고, 고주파수에서 위상은 큰 의미가 없을 수 있다.

그림 3은 푸리에스펙트럼 크기와 제동계수의 관계 및 스펙트럼 위상과 모드의 위상 사이에 관계를 나타내고 있다.

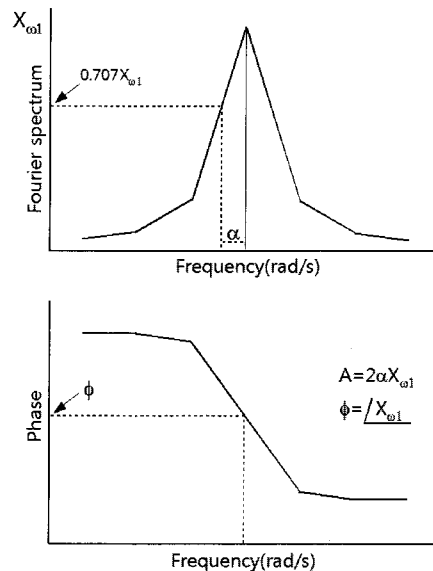


그림 3 푸리에스펙트럼과 파라미터
Fig. 3 Fourier Spectrum & Parameter

지금까지 푸리에스펙트럼에서 신호에 포함된 저주파수 파라미터를 직접 추정하는 수학적 방법을 기술하였다. 만일 신호에 다수의 모드가 포함되어 여러 개의 첨두치가 발생할 때, 각 첨두치와 첨두주파수에 대해서 지금까지 기술한 파라미터추정 방법을 각각 적용하면 중요 파라미터를 모두 추정할 수 있다. 한편 이산푸리에변환 결과, 근접한 모드가 존재할 경우, 두 모드는 서로 영향을 주어 추정한 파라미터에 오차를 포함할 수 있다. 이 경우에는 각 첨두치를 중심으로 좌우스펙트럼에서 영향을 받지 않는 푸리에스펙트럼으로부터 파라미터를 추정하면 오차를 감소할 수 있다.

III. 실제적인 파라미터추정 방법

이산푸리에변환은 주어진 신호의 샘플링과 시간간격, 데이터 수에 따라서 주파수 해상도가 변화하고, 스펙트럼 누설이 발생한다. 또한 데이터 취득 장치에서 실시간으로 취득한 데이터는 다양한 잡음을 포함하고 있기 때문에 정확한

파라미터 추정이 어려운 경우도 있다.

이산신호를 푸리에변환하면, 푸리에스펙트럼은 일정한 주파수 간격을 가진 이산 값으로 나타난다. 만일 시간구간 T_0 인 비주기 신호를 샘플링 간격 T 초로 N 개 샘플링 하였을 때, 시간구간은 $T_0 = NT$ 초로 표시된다. 따라서 주파수 간격을 Δf 라 할 때, 스펙트럼은 다음 식과 같은 주파수 해상도를 가진다.

$$\Delta f = \frac{1}{NT} \text{ [Hz]} \quad (7)$$

이와 같은 주파수 해상도는 시간구간에 영향을 받는 변수로 파라미터 추정 결과에 영향을 끼치는 중요한 변수 중 하나이며, 해상도가 높을수록 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3.1 실제적인 제동계수 추정

푸리에스펙트럼은 첨두치를 중심으로 좌측과 우측 스펙트럼으로 나타나므로 좌측과 우측 스펙트럼을 이용하여 각각 제동계수를 추정할 수 있다. 동적시스템에서는 제동계수가 작은 경우가 중요하므로 좌우 스펙트럼으로 각각 계산한 값 중에서 작은 것을 중요 제동계수로 선택할 수 있다.

이 절에서는 보다 실제적으로 제동계수를 추정할 수 있는 방법에 대해서 기술한다. 제동계수가 작으면 첨두치는 좌측과 우측 첫 번째 스펙트럼보다 훨씬 큰 값을 갖고 날카롭게 표현된다. 따라서 첨두치와 좌우 스펙트럼 중에서 작은 값에 대응하는 제동계수가 더 작은 값을 가진다. 그러므로 좌우 스펙트럼에서 작은 값을 선택하여 제동계수를 추정하는데 이용할 수 있다. 한편 제동계수가 주파수보다 매우 작을 때, 첨두치는 좌우스펙트럼 보다 매우 큰 값을 가지므로 이 경우에는 첨두치와 좌우스펙트럼 사이를 직선으로 가정해도 큰 오차를 발생하지 않는다.

그림 4는 첨두치를 중심으로 좌우 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 첨두치 좌우 스펙트럼 사이를 직선으로 가정하면, 직선방정식으로부터 첨두치의 70.7%에 대응하는 주파수를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_\alpha = \omega_1 - \frac{\omega_1 - \omega_2}{X_{w1} - X_{w2}} (X_{w1} - X_\alpha) \quad (8)$$

이 식에서 X_{w1} , ω_1 은 각각 첨두치와 첨두주파수를 의미하고, X_{w2} , ω_2 는 첫 번째 좌우스펙트럼과 주파수이다. 그리고 X_α 는 첨두치의 70.7%에 대응하는 푸리에스펙트럼이다.

제동계수는 첨두주파수와 첨두치의 70.7%에 대응하는 주파수의 편차($\omega_1 - \omega_\alpha$)이므로 식 (9)로 계산할 수 있다. 식 (9)에서 첨두치와 좌우스펙트럼, 그리고 이들에 대응하는 주파수만 알면 단순한 산술식으로 제동계수를 계산할 수 있음을 알 수 있다.

$$\alpha = \frac{\omega_1 - \omega_2}{X_{w1} - X_{w2}} (X_{w1} - X_\alpha) \quad (9)$$

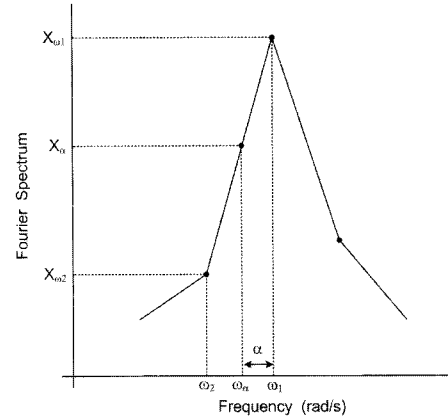


그림 4 푸리에스펙트럼과 제동계수
Fig. 4 Fourier Spectrum & Damping

일반적으로 제동계수가 작고 스펙트럼 누설이 없으면, 첨두치가 좌우스펙트럼보다 훨씬 크게 나타난다. 만일 스펙트럼의 누설이 발생하면, 첨두치와 비슷한 좌우스펙트럼이 발생하고 이 경우에는 오차를 수반할 수 있다. 보통 주어진 시간구간이 너무 작거나 제동계수가 커서 중요한 모드가 없는 경우, 첨두치와 좌우스펙트럼을 구분하기 어려운 경우가 발생한다. 또한 주파수 간격이 매우 작은 경우 첨두치에 인접한 좌우 스펙트럼이 첨두치의 70.7% 이상에서 형성될 수 있는데 이 경우에는 첨두치의 70.7%에 가장 근사한 스펙트럼을 좌우스펙트럼으로 설정한 후 위에서 기술한 방법을 적용하면 된다.

3.2 실제적인 위상각 추정

푸리에변환 결과 계산된 스펙트럼의 위상은 저주파수에서도 주파수에 따라 급변할 수 있다. 특히 위상은 역탄젠트 함수로 표현되므로 첨두 주파수 근처에서는 민감하게 변화한다. 따라서 주파수 해상도에 따라 스펙트럼 위상은 상당한 오차를 포함할 수 있다. 이 절에서는 이와 같은 위상의 오차를 감소하기 위해서 다른 시간구간 증첩을 통한 위상보정방법에 대해서 기술한다.

식 (7)에서 주어진 신호의 시간구간이나 샘플링 간격이 다르면 주파수 해상도가 변화함을 알 수 있다. 만일 첨두치 근처에서 스펙트럼위상이 역탄젠트 형태를 유지하고 있다고 가정하면, 주파수 해상도가 변화함에 따라 첨두치 근처에서 교점이 발생한다. 지수감쇠코사인함수의 이상적인 푸리에스펙트럼은 대칭이므로 이 교점은 정확한 위상과 주파수에 대응해서 형성된다.

파라미터를 추정하기 위한 시간구간을 T_0 라 할 때, 그림 5와 같은 새로운 시간구간 T_1 과 T_2 를 도입하여 보다 정확한 위상을 추정할 수 있다. T_1 과 T_2 는 시간구간 T_0 를 각각 2배와 4배 축소한 것으로 이들의 스펙트럼 위상은 그림 6과 같이 모두 동일한 주파수 평면에 나타낼 수 있다. 주파수 해상도는 시간구간에 비례하기 때문에 그림 6과 같이 시간구간 T_0 에서 주파수 해상도가 시간구간 T_1 보다 2배 더 높게 나타난다. 그림 6에서 시간구간 T_0 , T_1 의 위상 곡선이 교차하는 위상을 정확한 위상으로 추정할 수 있다. 만일 3개 이

상의 위상곡선을 사용할 경우, 위상이 한 점에서 교차하지 않을 수 있다. 따라서 이 경우에는 침두치를 중심으로 위상 편차의 합이 최소인 주파수에 대응하는 위상을 정확한 위상으로 선택할 수 있다.

다른 시간구간을 중첩해서 정확한 위상을 추정할 때, 주어진 시간구간에 대한 스펙트럼위상이 모두 역탄젠트 함수의 형태를 유지해야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

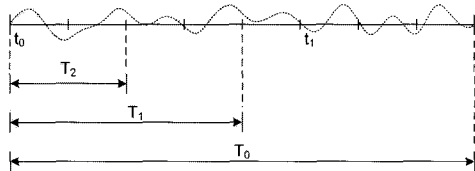


그림 5 다양한 시간 구간
Fig. 5 Various Time Interval

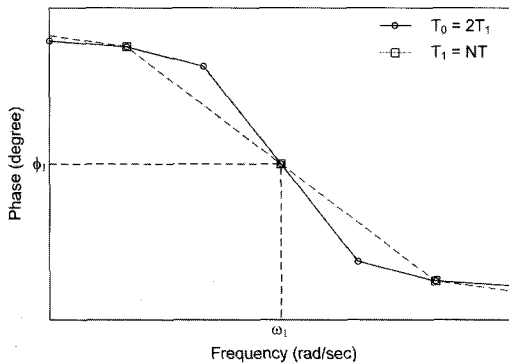


그림 6 푸리에스펙트럼과 제동계수
Fig. 6 Fourier Spectrum Phase & Damping

3.3 정확한 주파수 추정

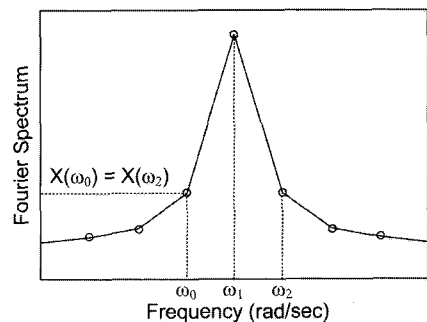
시간구간을 크게 하면 주파수 해상도가 높아져서 보다 부드러운 스펙트럼 위상곡선을 얻을 수 있다. 전 절에서 기술한 위상보정방법에 의해서 정확한 위상을 추정한 후, 위상곡선에서 정확한 위상에 대응하는 주파수, 즉, 교점이 발생한 주파수를 정확한 주파수로 선택할 수 있다. 이것은 주파수 해상도와 스펙트럼 누설에 의해서 발생하는 오차를 감소하는 역할을 한다.

3.4 정확도 지표

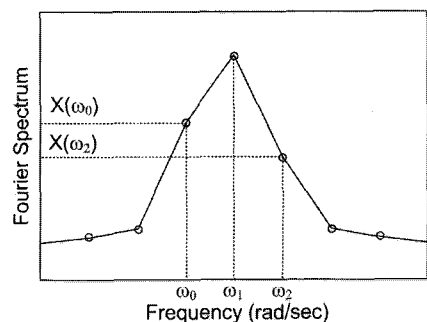
이산신호에서 파라미터를 추정한 후, 파라미터의 정확도를 검증하고자 할 때, 신호대잡음비(SNR, signal to noise ratio)를 많이 사용한다[6]. 이것은 신호와 추정된 신호의 값을 비교하여 정량적인 값을 계산하는 것으로 SNR이 클수록 추정된 파라미터가 정확함을 의미한다. 그러나 SNR은 상대적인 값이 아니므로 큰 값이 계산되었어도 추정된 파라미터가 얼마나 정확하게 추정되었는지 알 수 없다.

이 논문에서는 추정된 주파수의 정확도를 푸리에스펙트럼의 대칭 정도로 결정한다. 이상적인 지수감쇠코사인함수의 푸리에스펙트럼은 완전 좌우대칭의 형태로 나타나므로 이산 푸리에변환 결과도 침두치를 중심으로 대칭이 되어야한다. 그러나 이산푸리에변환에서는 스펙트럼 누설과 샘플링, 데이터 수, 그리고 인접 모드 유무에 따라서 정확한 대칭 보다는 비대칭 형태의 스펙트럼이 자주 나타난다. 그림 7에는 저주파수 대역에서 나타날 수 있는 대칭 스펙트럼(a)과 비대칭 스펙트럼(b)을 나타내고 있다. 대칭 정도의 판별은 침두스펙트럼의 좌우 첫 번째 스펙트럼의 비로써 판별할 수 있다. 침두스펙트럼 $X(\omega_1)$ 의 좌측스펙트럼을 $X(\omega_0)$ 라 하고 우측스펙트럼을 $X(\omega_2)$ 라 하면, 정확도 인덱스는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다. 식에서 정확도 인덱스가 1에 가까울수록 좌우스펙트럼은 비슷한 값을 가지고 있고 푸리에스펙트럼은 대칭에 가깝게 된다. 따라서 1에 근접할수록 정확한 주파수를 추정된 것으로 생각할 수 있고 0에 근접할수록 오차를 많이 포함한 것으로 생각할 수 있다.

$$A_{idx} = \frac{X(\omega_1) - X(\omega_0)}{X(\omega_1) + X(\omega_2)}, \quad (X(\omega_0) > X(\omega_2)) \quad (10)$$



(a)



(b)

그림 7 푸리에스펙트럼의 유형
Fig. 7 Fourier Spectrum Pattern

푸리에 스펙트럼을 이용한 실제적인 파라미터 추정과정은 그림 8과 같다. 데이터입력, 푸리에스펙트럼 계산, 파라미터 추정, 정확도 판단 단계로 구분하여 정확한 파라미터를 추정한다. 샘플링 간격이나 시간구간 변화로부터 위상보정방법을 적용하여 정확한 위상과 주파수를 얻을 수 있다.

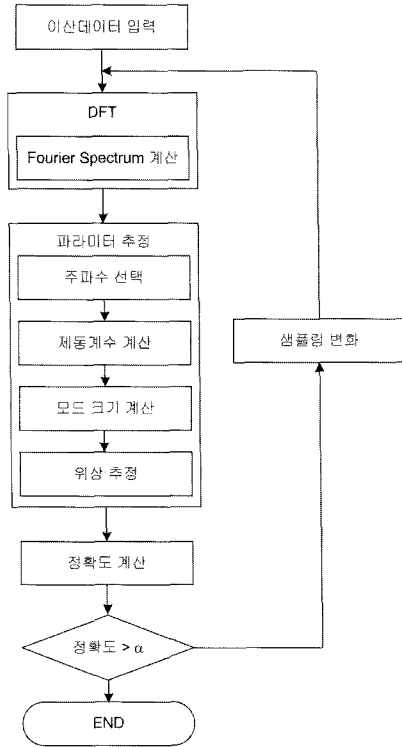


그림 8 파라미터 추정 과정
Fig. 8 Parameter estimation Process

IV. 사례연구

지금까지 기술한 푸리에 변환에 의한 파라미터 추정 방법을 시험함수에 적용하여 그 효율성을 검증하였다. 시험함수는 두 개의 모드를 가진 지수감쇠코사인함수로 제안한 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해서 잡음(w(t)=0)의 영향을 배제하였다.

$$y_t = 1.0e^{-0.1t} \cos(4.35t + 60^\circ) + 1.0e^{-0.1t} \cos(6.28t + 30^\circ) + w(t) \quad (11)$$

이 함수에 대해서 시간 간격을 1/10초로 설정하고, 30초 동안 취득한 데이터(N=300)를 그림 9에 나타내었다.

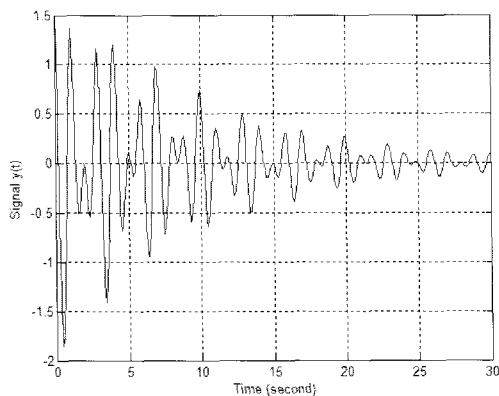


그림 9 시험함수
Fig. 9 Test Function

위에서 기술한 시험함수를 이산푸리에변환하여 푸리에스펙트럼과 위상을 계산하고, 그 결과를 그림 10에 도식하였다. 그림 10에는 시험함수의 전체 시간구간인 30초와 초기 10초에 대해서 각각 이산푸리에변환을 수행하여 그 결과를 나타낸 것으로 각 모드에서 주파수와 첨두치는 표 1에 나타나있다.

모드 1에서 시간구간 10초와 30초에 대해서 각각 31.59, 44.91의 첨두치를 얻었고, 모드 2에서는 각각 32.81, 48.98의 첨두치를 계산하였다. 이와 같은 첨두치는 주어진 시간구간과 샘플링 간격에 따라서 달라지는데, 동일한 시간구간에 샘플링 간격이 작으면 작을수록 시간데이터 수가 많아지므로 더 큰 첨두치를 얻을 수 있다. 그러나 주파수 간격은 시간구간에 종속되므로 동일한 시간구간에 대해서 동일한 주파수 간격을 갖는다.

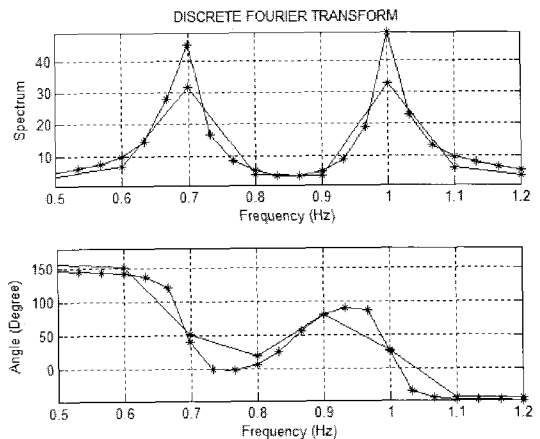


그림 10 푸리에스펙트럼과 위상
Fig. 10 Fourier Spectrum & Phase

표 1 이산푸리에변환 결과
Table 1 Descrete Fourier Transform Results

| Mode No | frequency (rad/sec) | Peak spectrum | |
|---------|---------------------|---------------|-------|
| | | 10sec | 30sec |
| 1 | 4.398(0.7Hz) | 31.59 | 44.91 |
| 2 | 6.283(1.0Hz) | 32.81 | 48.98 |

4.1. 주파수 추정

그림 10에 나타난 푸리에스펙트럼에서 첨두치는 주파수 0.7Hz와 1.0Hz에 존재하고 있음을 알 수 있다. 시간구간 30초일 때, 주파수간격은 0.033Hz이므로 정확한 해에서 0.033만큼 오차가 포함될 수 있다. 그림 10에서 모드 1(0.7Hz)의 첨두치 좌우측스펙트럼은 각각 27.98, 16.61이고, 모드 2(1.0Hz)의 첨두치 좌우측스펙트럼은 각각 19.05, 22.86이다. 따라서 모드 1과 비교하여 모드 2가 비교적 대칭으로 스펙트럼이 형성되어 있음을 알 수 있다. 정확도 지표는 식 (10)

으로 계산하였는데, 모드 1과 모드 2에서 각각 0.598, 0.873의 정확도 지표를 계산하였다. 모드 2의 정확도 지표는 1에 근접하여 있으므로 모드 2의 주파수는 비교적 정확하게 추정되었음을 예상할 수 있다. 즉 이산푸리에변환에서 계산한 모드 1의 주파수 0.7Hz는 다소 오차가 포함되어 있고, 모드 2의 주파수 1.0Hz는 거의 정확한 주파수에 근사할 것으로 예상할 수 있다.

실제 모드 1과 모드 2의 정확한 주파수가 각각 0.6923Hz, 0.9995Hz이므로 오차율은 각각 0.011, 0.0005이다. 그러므로 이 논문에서 계산한 정확도 지표와 일치함을 알 수 있다. 정확도 지표는 주파수의 정확성뿐만 아니라 다른 파라미터의 정확성 판단에 좋은 지표가 될 수 있다.

4.2. 제동계수 추정

제 3장에서 기술한 식 (9)를 이용하여 시험함수의 제동계수를 추정하였다. 식 (9)는 침두치의 좌우스펙트럼과 주파수만 알면 제동계수를 추정할 수 있는 매우 단순한 산술과정만 포함하고 있으므로 계산속도가 빠르고 알고리즘이 매우 단순하다.

먼저 모드 1에서 침두스펙트럼과 우측스펙트럼은 각각 44.91, 16.61이고, 이에 대응하는 주파수는 각각 4.3982(rad/sec)와 4.6075(rad/sec)이다. 이들을 식(9)에 대입하여 제동계수를 추정한 결과, 0.0973을 계산하였다. 그리고 모드 2에서 침두스펙트럼과 좌측스펙트럼은 각각 48.98, 19.05이고, 이에 대응하는 주파수는 각각 6.2832(rad/sec)와 6.0740(rad/sec)이다. 이들을 이용하여 제동계수를 추정한 결과 0.1를 계산하였다.

모드 1과 모드 2의 정확한 제동계수는 모두 0.1이므로 모드 1의 제동계수 추정치는 약 2.7%의 오차를 포함하고 있고 모드 2의 제동계수는 정확하게 추정하였다. 이것은 모드 2의 스펙트럼이 비교적 대칭으로 이루어진 반면, 모드 1의 좌우스펙트럼은 비대칭을 나타내어 침두주파수에 대응하는 푸리에스펙트럼에 오차가 포함되어 발생한다.

결과적으로 주어진 시험함수의 푸리에스펙트럼에서 중요한 저주파 진동모드로 모드 1(-0.0973+j4.6075)과 모드 2(-0.1+j6.2832)를 추정하였다.

4.3. 모드크기 추정

파라미터 추정은 지수감쇠코사인함수로 신호를 모의하므로 각 모드마다 크기를 각각 계산해야 한다. 식 (5)는 제동계수와 푸리에스펙트럼, 그리고 모드 크기 사이에 관계를 나타내고 있는데, 이 식으로부터 제동계수를 알면 모드 크기를 추정할 수 있다.

한편 동일한 시간구간에 대해서 이산푸리에변환을 적용할 때, 샘플링에 따라서 푸리에스펙트럼의 크기는 다르게 계산된다. 따라서 시간구간과 샘플링에 따라서 각기 다른 값들이 산출되지 않도록 푸리에스펙트럼을 정규화 해야 한다. 시간구간(T_0)과 샘플링 및 데이터 수(N)의 관계는 다음과 같다.

$$T_0 = NT \tag{12}$$

이산푸리에변환에서 푸리에스펙트럼은 데이터 수에 비례하므로 푸리에스펙트럼을 동일한 기준으로 정규화하면 다음과 같다.

$$X_{norm} = X_{\omega_1} (T_0/N) = X_{\omega_1} T \tag{13}$$

모드 크기와 푸리에스펙트럼 사이에 관계를 나타내는 식 (5)에 정규화한 푸리에스펙트럼을 적용해서 시험함수의 모드 크기를 추정하였는데, 모드 1의 크기는 0.874, 모드 2의 크기는 0.9796을 계산하였다. 두 모드의 크기가 모두 1.0이므로 모드 1에서는 12.6%의 오차를 포함하고 있고, 모드 2는 약 2%의 오차를 포함하고 있어 제동계수나 주파수의 경우와 마찬가지로 모드 2가 더 정확하게 추정되었음을 알 수 있다.

4.4 위상 추정

푸리에스펙트럼의 위상에서 중요 모드의 위상은 각각 39.67°와 25.53°를 추정하였다. 모드 1과 모드 2의 정확한 위상은 각각 60°, 30°이므로 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 침두치 근처에서 위상이 급변하기 때문에 발생한다. 그림 11에는 10초와 30초에서 각각 계산한 푸리에스펙트럼 위상을 확대하여 나타낸 것이다. 두 위상의 교점이 발생하는 지점의 위상을 정확한 위상으로 추정할 수 있는데, 교점이 발생한 위상과 주파수는 표 2에 나타나 있다.

표에서 모드 1의 교점에 위상과 주파수는 각각 58.98, 0.6921Hz이고 모드 2의 위상과 주파수는 각각 27.25, 0.9991Hz이다. 주어진 시험신호의 위상에 상당히 근사한 값으로 위상을 추정하였음을 알 수 있다. 또한 위상의 교점을 사용하면 더욱 정밀한 주파수를 얻을 수 있는데, 위에서 계산한 정확한 위상에 대응하는 주파수를 정밀한 주파수로 선택하면 된다.

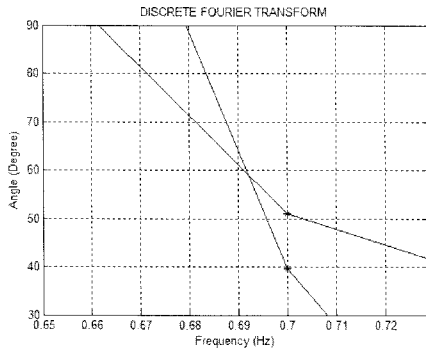
한편 이산푸리에변환의 위상은 침두치 근처에서는 급변하므로 주파수 간격을 적당히 설정하여 침두치 근처에서 역탄젠트 함수 형태의 원래 위상곡선의 특성을 유지하는 2개 이상의 스펙트럼 위상 곡선을 사용하여 교점을 구해야 정확한 위상과 주파수를 얻을 수 있다.

표 2 위상 추정

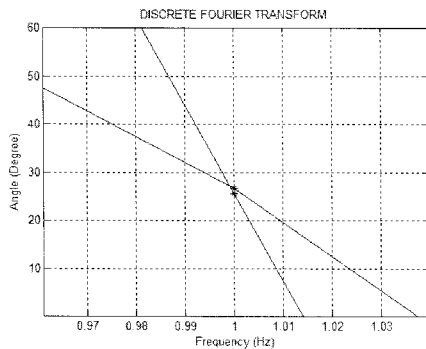
Table 2 Phase Estimation

| Mode No | 정확한 값 | | 기존방법 | | 새로운 방법 | |
|---------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 위상 | f(Hz) | 위상 | f(Hz) | 위상 | f(Hz) |
| 1 | 60° | 0.6923 | 39.67° | 0.7 | 58.98° | 0.6921 |
| 2 | 30° | 0.9995 | 25.53° | 1.0 | 27.25° | 0.9991 |

참 고 문 헌



(a) Mode1



(b) Mode 2

그림 11 푸리에스펙트럼 위상
Fig. 11 Fourier Spectrum Phase

V. 결 론

이 논문은 이산푸리에변환에서 신호에 포함된 저주파수 파라미터를 빠르게 추정하는 방법에 관한 것으로 모든 연산 과정이 단순한 산술계산만 포함하고 있으므로 연산속도가 매우 빠르고 알고리즘이 단순하다.

중요 모드의 주파수는 이산푸리에변환에서 계산한 첨두스펙트럼에 대응하는 주파수를 선택한 후, 정확한 위상에 대응하는 주파수로 보정하였다. 계동계수는 푸리에스펙트럼의 첨두치와 좌우스펙트럼을 단순 산술식에 대입하여 추정하고, 모드 크기는 정규화한 첨두치와 계동계수를 이용하여 추정하였다. 그리고 푸리에스펙트럼 위상으로부터 모드의 위상을 추정하였는데, 첨두치 근처에서 스펙트럼 위상의 급변하는 특성을 보완하기 위하여 다양한 시간구간의 위상곡선 교점을 이용한 위상보정방법을 개발하였다. 위상곡선에서 교점이 발생한 위상을 정확한 위상으로 선택하고, 그 위상에 대응하는 주파수를 정확한 주파수로 보정하였다. 또한 푸리에스펙트럼의 대칭 정도로부터 추정된 파라미터들의 정확성을 판단할 수 있는 단순한 정확도 지표를 개발하여 적용한 결과, 파라미터들의 정확성을 판단할 수 있는 정량적인 지표가 될 수 있음을 확인하였다.

제한한 알고리즘을 시험함수에 적용한 결과, 속도와 정확도 측면에서 실시간 저주파수 파라미터 추정에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

- [1] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, K. E. Martin, J. W. Burns, H. Lee, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, "Use of the WECC WAMS in Wide-Area Probing Tests for Validation of System Performance and Modeling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp.250-257, Feb. 2009.
- [2] Ning Zhou, J. W. Pierre, J. F. Hauer, "Initial Results in Power System Identification from Injected Probing Signals using a Subspace Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1296-1302, Aug. 2006.
- [3] I. Kamwa, R. Grondin, Y. Hébert, "Wide-Area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems-A Decentralized/Hierarchical Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp.136-153, Feb. 2001.
- [4] M. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, pp.914-921, 1991.
- [5] L. L. Scharf, Statistical Signal Processing : Detection, Estimation, and Time Series Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1991.
- [6] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, pp.80-89, Aug. 1990.
- [7] J. F. Hauer, D. Trudnowski, G. Rogers, B. Mittelstadt, W. Litzenberger, J. Johnson, "Keeping an Eye on Power System Dynamics", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, pp.50-54, 1997.
- [8] Peter O'Shea, "The Use of Sliding Spectral Windows for Parameter Estimation in Power System Disturbance Monitoring", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp.1261-1266, 2000.
- [9] R. W. Wies, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, "Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-frequency Electromechanical Modes of Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, pp.167-173, Feb. 2003.
- [10] J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, M. K. Donnelly, "Initial Results in Electromechanical Mode Identification from Ambient Data", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, pp.1245-1251. Aug. 1997.
- [11] 심관식, 남해곤, "이산푸리에변환과 시계열데이터의 고속 파라미터 추정", 대한전기학회논문지, Vol.55, No.7, pp.265-272, 2006.
- [12] W. L. Briggs, V. E. Henson, The DFT, An Owner's Manual for the Discrete Fourier Transform, SIAM, Philadelphia, 1995.

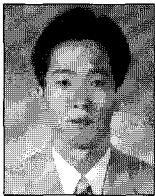
- [13] P. A. Lynn, W. Fuerst, Introductory Digital Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [14] L. Ljung, System Identification, Theory for The User, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- [15] Numerical Recipes in FORTRAN, Cambridge University Press, New York, 1992.

저 자 소 개



김 은 주 (金 恩 主)

1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업.
 2002년 동 대학원 졸업(석사). 2006년 동 대학원 박사과정 수료. 1991년~2000년 산업기술정보원 근무. 2001년~현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원
 Tel : 062-951-7111, Fax : 062-953-2472
 E-mail : ejkim@kisti.re.ke



심 관 식 (沈 冠 埴)

1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업.
 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~2004년 서남대 전기전자공학과 조교수
 Tel : 062-530-3920, Fax : 062-530-3919
 E-mail : simgong@ieec.org



김 용 구 (金 容 九)

1995년 전남대학교 전기공학과 공학사.
 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)
 2004년~현재 한국폴리텍 V대학 전기계측제어과 조교수.
 E-mail : kimyg69@hanmail.net



김 의 선 (金 義 善)

1981년 전남대 공대 전기공학과 졸업.
 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~2006년 서남대 전기전자공학과 조교수. 2006년~현재 신경대 정보통신공학과 조교수
 Tel : 031-369-9172
 E-mail : eskim@sgu.ac.kr



남 해 곤 (南 海 鯤)

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사).
 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(박사). 1975년~1978년 한국전력 원자력 건설부 근무. 1986년~1988년 한국전기연구소 근무. 1988년~현재 전남대 전기공학과 교수
 Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749
 E-mail : hknam@chonnam.ac.kr



임 영 철 (任 永 徹)

1975년 전남대 공대 전기공학과 졸업
 1977년 고려대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대학교 전기공학과 졸업(박사). 1983년~현재 전남대 공대 전기공학과 교수
 Tel : 062-530-1743
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : yclim@chonnam.ac.kr