

# 전력계통에서 수렴성 향상을 위한 탐색기반 고분해능 주파수 추정기법

## A search-based high resolution frequency estimation providing improved convergence characteristics in power system

안 기 성\*, 서 영 덕\*, 장 태 규\*<sup>★</sup>, 강 상 희\*\*

Gi-Sung An\*, Young-Duk Seo\* Tae-Gyu Chang\*<sup>★</sup>, Sang-Hee Kang\*\*

### Abstract

This paper proposed a search-based high resolution frequency estimation method in power system. The proposed frequency estimation method adopts a slope-based adaptive search as a base of adaptive estimation structure. The architectural and operational parameters in this adaptive algorithm are changed using the information from context layer analysis of the signals including a localized full-search of spectral peak. The convergence rate of the proposed algorithm becomes much faster than those of other conventional slope-based adaptive algorithms by effectively reducing search range with the application of the localized full-search of spectrum peak. The improvements in accuracy and convergence rate of the proposed algorithm are confirmed through the performance comparison with other representative frequency estimation methods, such as, DFT(discrete Fourier transform) method, ECKF(extended complex Kalman filter), and MV(minimum variable) method.

### 요 약

본 논문에서는 전력계통에서 정밀하고 변화에 수렴성이 빠른 탐색을 기반으로 하는 주파수 추정 기법을 제안하였다. 제안된 주파수 추정 알고리즘은 고분해능 스펙트럼의 기울기를 추정하여 스펙트럼의 peak 점을 탐색하는 구조를 적용하였다. 과도적으로 주파수 변화가 큰 경우에 기존 방법들의 단점인 수렴속도가 늦는 점을 보완 또는 개선하기 위한 방법으로 Context analysis를 통하여 Full-search 기법과 주파수 추정변수들을 적응적으로 적용하여 주파수 추정의 정밀도와 수렴속도를 향상시키고 대표적인 주파수 추정기법인 DFT(discrete Fourier transform) 방법, ECKF(extended complex Kalman filter), MV(minimum variable) 방법들과 비교하여 수렴성과 정밀도가 우수함을 보였다.

*Key words* : Frequency estimation, spectrum analysis, iterative method,  $\alpha\beta$  transform, least mean square

\* Dept. of Electr. and Electronics Engineering, Chung-Ang University

\*\* Dept. of Electr. Engineering, Myung-Ji University

★ Corresponding author

tgchang@cau.ac.kr

※ Acknowledgment

This research was supported in part by Korea Electric Power Corporation. (Grant number: R17XA05-2)

Manuscript received Dec. 6, 2018; revised Dec. 21, 2018; accepted Dec. 24, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

전력계통 환경에서 실시간으로 정밀하고 신속하게 주파수를 추정하는 것은 계통의 보호 및 제어 측면에서 기술적으로 중요한 사항이다.[1], [2]

주파수를 추정하는 기법은 크게 시간영역에서 영점교차 정보에 대한 평균치를 추정하는 방식과 주파수 영역에서 스펙트럼의 peak점을 추정하는 방식으로 나눌 수 있다.

시간영역에서 주파수를 추정하는 기법은 알고리즘의 연산량이 적다는 장점이 있고 window 구간을 늘려서 정밀성의 개선을 얻을 수 있는 것이 장

점이다. 반면에 주파수의 변동이 큰 과도현상에 대한 추정 수렴성이 나빠서 신속한 보호 및 제어 목적에 사용하기는 어려워, 실질적으로는 단순한 설비 및 계통의 monitoring 등의 목적에 그 사용이 제한되어 있다.[3]

주파수 영역 접근법(frequency domain approach)은 기본적으로 신호로부터 고분해능 파워 스펙트럼을 얻어 이의 peak 점을 구하는 방식으로서 Periodogram, Correlogram, Parametric, Non Parametric 등으로 구분되는 여러 기법들이 있다.[4]-[6]

이러한 주파수영역 기법은 시간영역 기법과 달리 신호의 통계적 특성의 활용 등 최적의 해를 구하기 위한 해석적인 기법을 제공한다는 것이 큰 장점이라 하겠다. 하지만 일반적으로 이러한 고분해능 스펙트럼을 기반으로 한 최적의 해를 구하는 과정은 많은 연산량이 요구되어 임베디드 시스템을 기반으로 하는 실시간 보호 및 제어 시스템에 실질적 응용에는 큰 한계가 있다.[7]

본 논문에서는 고분해능 스펙트럼을 주파수추정에 활용 하되 연산량의 부담을 줄이기 위하여 해석적인 해를 구하는 대신 스펙트럼의 기울기에 기반한 탐색을 적용하는 주파수추정기법을 제시하였다. 제안한 주파수 추정기법은 기울기 탐색에 의해 스펙트럼 peak를 추종하는 구조를 바탕으로 과도현상에 대한 수렴성을 높여주기 위하여 적응적으로 알고리즘 변수와 적용구조를 얻어 이를 주파수 추정에 활용하는 형태이다. 이에는 과도현상의 정도 및 형태에 따라 과도현상의 유형을 구분하고, 분석 window 길이의 가변적 설정, 탐색 step-size의 가변적 설정, 탐색영역의 가변적용 등의 기능을 갖도록 알고리즘을 구성하였다. 영역내에서 급격한 과도현상이 있을 경우는 가변적으로 좁혀진 영역을 대상으로 Full-search를 수행하며 그 결과를 이용하여 기울기 탐색 기반 스펙트럼 peak 추종 알고리즘의 탐색 범위를 축소시켜 주는 방식이다. 본 연구에서 제시한 탐색기반의 주파수 추정기법은 높은 정밀도로 주파수를 추정하는 것은 물론이고 기존의 LMS[4] 알고리즘 등 일반적인 탐색 알고리즘이 갖는 가장 큰 단점인 급격한 변동에 대한 낮은 수렴속도 문제를 획기적으로 줄여준다는 것이 큰 장점이라 하겠다.

본 논문에서 제안한 탐색기반 주파수 추정방법의 수렴성과 정밀도의 우수함을 보여주기 위하여 고

분해능 스펙트럼의 대표적인 방법인 ECKF(extended complex Kalman filter)[2], [3], [8], MV(minimum variable)스펙트럼, DFT기법들과 수렴속도와 주파수 추정 오차를 비교하였다. 스텝함수, 램프함수 등의 주파수의 변화와 실제 발전소 모델링을 통해 전력계통의 부하 증가 상황에 대하여 얻어지는 신호들을 대상으로 수렴속도와 주파수 오차를 얻어 제안한 주파수 추정기법의 우수성을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 주파수 추정기법은 빠른 수렴성과 높은 정밀도를 바탕으로 전력시스템에서 높은 수준의 보호기능 및 제어를 수행을 가능케 함으로써 실질적 응용에 대한 기여가 크다 하겠다.

## II. 고분해능 스펙트럼 기반의 주파수 추정 기법

본 연구에서 제시한 주파수 추정기법은 그림 1에 나타난 바와 같이 크게 Adaptive Frequency estimation 부분과 Context Analysis 부분으로 구성하였다. 고분해능 스펙트럼 기반의 주파수 추정방법은 입력 신호로부터 파워 스펙트럼의 peak 점을 찾는 것이며 Adaptive Frequency estimation부에서는 파워 스펙트럼을 기반으로 LMS[7] 알고리즘을 적용하여 주파수를 추정하는 기능을 수행한다. Context Analysis부에서는 입력신호의 특성을 분석하여 주파수 추정범위를 가변적으로 구하고 Adaptive Frequency estimation부에 적용한다.

제안한 알고리즘을 세부적으로 보면  $V(n)$ 은 전력계통의 디지털화된 3상 전압이며 식 (1)로 나타낸다.  $V_p$ 와  $\phi$ 는 각각 피크 값과 기준 주파수의 위상이고  $T$ 는 샘플링 간격이다. 전처리부에서는 3상 전압을 식 (2)와 같이  $\alpha\beta$ 변환하여 [1], [2], [8] 식 (3)의 복소수 전압인  $V_c(n)$ 을 구한다.  $V_\alpha(n)$ 와  $V_\beta(n)$ 는 각각  $V_c$ 의 실수와 허수 부분이다.

$$\begin{aligned} V_1(n) &= V_p \cos(\omega n \Delta T + \phi) \\ V_2(n) &= V_p \cos(\omega n \Delta T - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ V_3(n) &= V_p \cos(\omega n \Delta T + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(n) \\ V_\beta(n) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(n) \\ V_2(n) \\ V_3(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V_c(n) = V_\alpha(n) + jV_\beta(n) \quad (3)$$

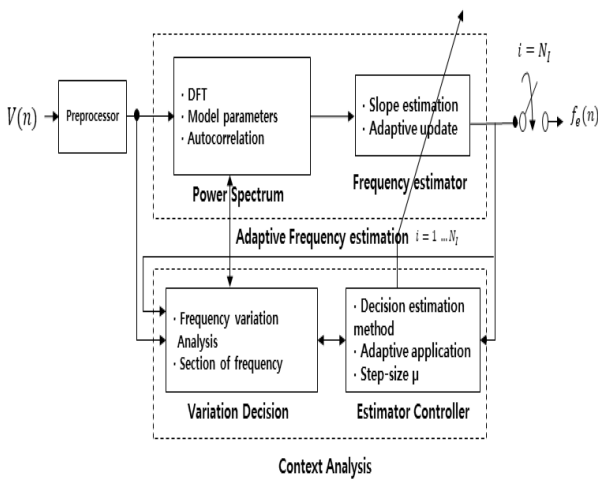


Fig. 1. Frequency estimation based on power spectrum.  
 그림 1. 파워스펙트럼 기반의 주파수 추정기법

Power Spectrum 블록에서는 입력전압  $V(n)$ 이 들어올 때마다 파워 스펙트럼인  $S(w)$ 을 구한다. 파워 스펙트럼을 구하는 방법들로는 푸리에 트랜스폼, AR(autoregressive)모델링, MV(minimum variance) 스펙트럼, EV(eigenvector)해석 등이 있으며 선택적으로 적용할 수 있다.

푸리에 트랜스폼은 가장 기본적인 주파수 스펙트럼분석 방법으로 식(4)로 정의된다. 입력 데이터의 autocorrelation을 구한 후 푸리에 트랜스폼을 하면 주파수 스펙트럼의 파워를 구할 수 있다.  $R_X$ 는 입력 데이터로 구한 autocorrelation이다.[7], [10] 이 방법은 windowing에 따른 sidelobe ripple의 영향으로 spurious peak 현상에 의하여 주파수 추정 오차를 야기하는 것이 단점이다.[1]

$$S_{FT}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-jw\tau} d\tau \quad (4)$$

AR 파워스펙트럼은 spurious peak 현상이 없이 신호를 AR필터로 모델링하여 이로부터 파워스펙트럼을 구하는 방식으로서 고분해능 파워스펙트럼을 얻는 대표적인 방법 중 하나로서 식(5)에 나타났다.  $T$ 는 샘플링 간격이며  $\rho_w$ 는 white noise의 분산 값이다.  $p$ 는 AR모델의 차수를 나타내고  $a[n]$ 은 AR모델의 필터 계수이다.

$$S_{AR}(w) = \frac{T\rho_w}{\left| 1 + \sum_{n=1}^p a[n]e^{-jwnT} \right|^2} \quad (5)$$

EV 해석과 MV 스펙트럼 [4], [7]는 신호의 autocorrelation을 바탕으로 샤프한 peak 형태의 고분해능 파워스펙트럼을 얻기 위한 Non parametric 기법의 대표적인 방법이라 할 수 있으며 이를 식 (6), (7)로 나타내었다. 식 (8)로 주어지는 주파수 검색필터  $s(w)$ 가 입력 신호의 주파수 성분과 같으면 MV 스펙트럼과 EV 스펙트럼은 가장 큰 값을 갖는다.

$$S_{MV}(w) = \frac{1}{s^H(w)R^{-1}s(w)} \quad (6)$$

$$S_{EV}(w) = \frac{1}{s^H(w) \left( \sum_{n=K+1}^p \frac{1}{\lambda_n} v_n v_n^H \right) s(w)} \quad (7)$$

$$s(w) = [1 \ e^{-jw} \dots \ e^{-j(K-1)w}]^T \quad (8)$$

$K$ 는 autocorrelation matrix  $R$ 의 차수이고  $v$ 는 eigenvector,  $p-K$ 는 eigenvector의 총 개수.  $\lambda$ 는 eigenvalue이다.

Context Analysis부는 Variation Decision부와 Estimator Controller부로 구성되어 있다. Variation Decision부는 데이터의 샘플 개수, 채널 개수와 추정주파수로부터 주파수의 상태를 파악하고 주파수의 추정범위를 결정한다. Estimator Controller부는 Variation Decision부로부터 주파수의 상태에 관한 정보를 받아 주파수 추정기법을 결정한다. 정상상태일 경우 step-size 등 주파수 추정변수들을 업데이트 하고 LMS방식의 주파수 추정기법을 선택하고 과도상태로 진입하는 경우 Variation Decision부에서 결정된 주파수 추정범위를 기반으로 Full-search 주파수 추정기법을 결정한다.

Frequency Estimator부에서는 과도상태로 진입하는 경우 Full-search기법을 사용하여 주파수를 추정하고 정상상태일 경우 Context Analysis부에서 정해진 step-size와 주파수 스펙트럼의 위치를 가지고 파워 스펙트럼 기울기를 사용한 LMS방식으로 주파수를 추정한다.

$$w_i = w_{i-1} - \mu(i) \nabla_{w_{i-1}} J(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_I \quad (9)$$

식 (9)  $w_i$ 는 추정된 각 주파수이며  $J(i)$ 는 비용 함수로 Power Spectrum 블록에서 구한 파워스펙트럼의 역수를 취해 얻는다.  $\nabla_{w_{i-1}} J(i)$ 는  $J(i)$ 의

$w_{i-1}$ 일 때의 미분 값이다.  $f_s$ 는 샘플링 주파수이고  $\mu(i)$ 는 Variation Decision부에서 구해진 step-size이고 입력 샘플이 들어올 때마다  $N_I$ -time 반복해서 추정 주파수  $f_e(n)$ 를 추정한다.

$$f_e(n) = \frac{w_{N_I}}{2\pi} f_s \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

### III. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 MV 스펙트럼을 사용하였고 과도영역에서 Full-search기법을 사용하여 스펙트럼의 주파수 위치를 찾는 과정에서 계산량을 줄이기 위하여 주파수 추정범위를 제한하였다. 추정 주파수의 범위를 +1Hz부터 -1Hz까지로 정하였고 Resolution을 정할 때 추정 범위내의 주파수 대역을  $\frac{1}{2 \times 10^{-7}}$ 으로 나누어  $s(w)$ 에 대입하여 주파수를 추정하였다.

#### 3.1. 입력 주파수의 스텝, 램프 변화에 따른 주파수 추정 성능 비교

주파수 추정의 오차와 수렴시간을 확인하기 위하여 입력 주파수의 스텝과 램프 변화에 대하여 제안하는 알고리즘을 ECKF, LMS기반 MV스펙트럼, DFT기법들과 수렴속도와 기준 주파수와의 오차를 비교하였다. SNR 100dB를 맞추기 위해 들어오는 3상 전압 신호에 additive white noise를 적용하였다. 그림 2는 입력 주파수가 0.5초에서 50Hz에서 49Hz로 변화하고 일정 시간 후 50Hz로 돌아오는 신호를 나타내었다. 그림 2의 (a)를 보면 전압의 급격한 변화 전후인 정상구간에서는 제안하는 알고리즘과 ECKF, LMS기반의 MV스펙트럼 모두 주파수를 잘 추정하는 점을 알 수 있다. 그림 2의 (b)는 그림 2의 (a)에서 주파수가 변하는 과도구간의 확대한 부분이다. 그림 2의 (b)를 보면 수렴 속도는 제안하는 알고리즘이 ECKF보다 3배 이상의 성능을 보였으며 3가지 기법 중 가장 빨리 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 입력주파수가 58Hz에서 램프함수로 증가하는 상황에 따른 주파수 추정결과이다. 주파수 추정기법 중 하나인 3-Step DFT[11] 방법을 추가하여 분석하였다. 주파수가 변화할 때

제안하는 알고리즘이 가장 빨리 따라가는 점을 확인하였다.

표 1은 과도상태에서의 오차파워를 나타낸 것이며 스텝 변화에 대해 제안하는 알고리즘이 가장 작고 ECKF를 사용한 추정 기법이 제일 큰 것을 확인하였다. 램프 변화에 대해서도 제안하는 알고리즘이 오차파워가 가장 작은 것을 확인하였고 ECKF, LMS기반 MVS 추정기법, 3-Step DFT순서로 성능이 좋은 것을 확인하였다.

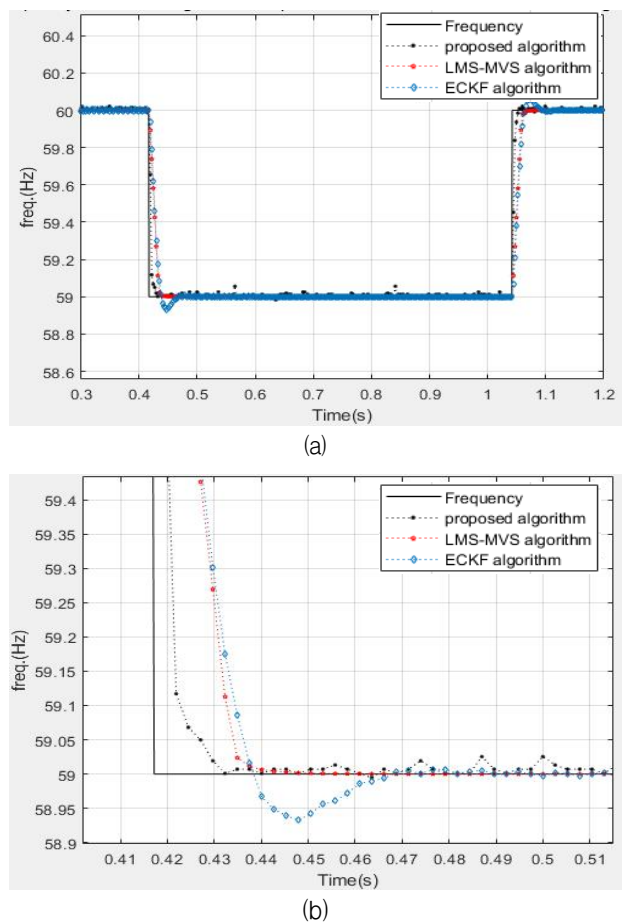


Fig. 2. Frequency estimation of fundamental step signal. 그림 2. 입력 주파수의 스텝 형태의 변화특성에 따른 주파수 추정 결과

Table 1. Frequency estimation error power in transient section. 표 1. 주파수의 과도구간에서의 주파수 추정기법별 오차 파워

Algorithm transient	Full Search	LMS MVS	ECKF	3-Step DFT
<b>step</b>	0.0381	0.0864	0.1059	-
<b>ramp</b>	0.0062	0.0142	0.0096	0.0365

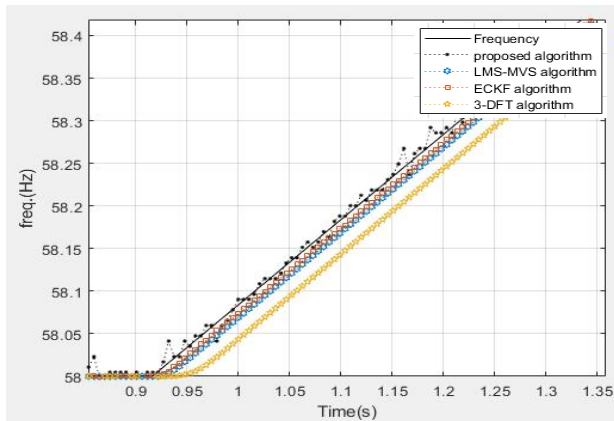


Fig. 3. Frequency estimation of fundamental ramp signal.  
 그림 3. 입력 주파수의 램프 형태의 변화특성에 따른 주파수 추정 결과

### 3.2. 실제 파워시스템 모델에서의 Load 20% 증가 상황에 대한 시뮬레이션

그림 4는 파워 시스템을 모델링한 것이다. 발전소 용량은 200MVA 이고 전압은 13.8kV이다. 발전소에 기본 로드인 100MVA가 transmission line으로 68-km 떨어져 있으며 power factor는 0.9이다. 약 4.93초에서 부하가 20% 증가하는 상황에 대해 3가지 기법을 적용하여 주파수를 추정해 보았다. 그림 5의 (a)는 부하가 증가하였을 경우의 주파수 추정결과이며 (b)는 (a)의 원으로 표시한 부분만을 확대한 그래프이다. 세 가지 추정기법 모두 로드가 증가하는 순간에서 주파수가 튀는 현상을 보였으며 제안하는 알고리즘의 수렴속도가 가장 빠르고 ECKF 기법이 가장 느리게 따라가는 것을 확인하였다. 표 2에서는 5초부터 8초까지의 주파수 추정 오차 파워를 나타내었다. 표 2에서 나타난 값을 보면 제안한 알고리즘의 오차파워가 가장 작은 것을 알 수 있다. 파워 시스템 모델상의 데이터에서도 제안한 알고리즘이 가장 좋은 수렴속도를 보였고 가장 높은 정확성을 가지는 것을 확인하였다.

Table 2. Frequency estimation error power in case of load increase by 20%.

표 2. 로드 20% 증가 시 주파수 추정기법별 오차파워

Algorithm transient	Full Search	LMS MVS	ECKF
Load increase (%20)	0.0070	0.00114	0.0079

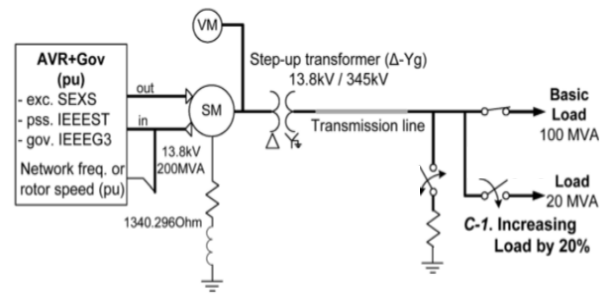
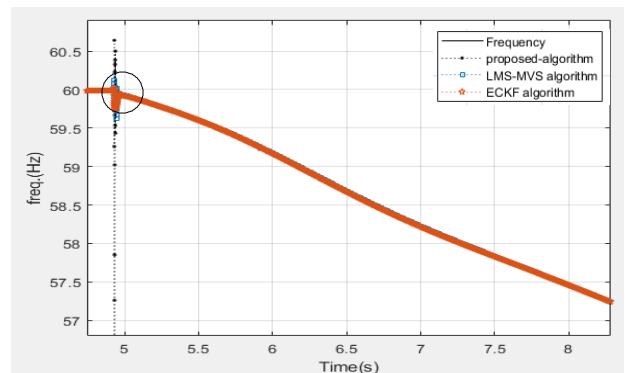
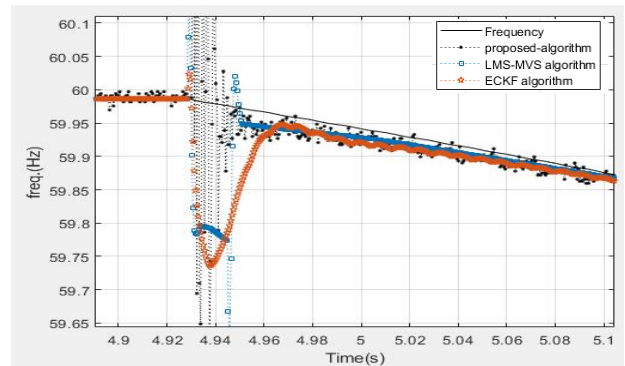


Fig. 4. Single power plant system model.

그림 4. 단일 발전시스템 모델



(a)



(b)

Fig. 5. Power system frequency estimation in case of load increase by 20%.

그림 5. 전력계통에 로드 20%증가 상황 시 주파수 추정 결과

## IV. 결론

본 논문에서는 주파수 변화를 초기에 발견해야 하는 전력계통보호에서 사용해야 하는 주파수 추정기법 중 유력한 방법이 될 수 있는 수렴성이 향상된 탐색 기반의 주파수 추정 기법을 제안하였다. 기본구조로 스펙트럼 기울기에 기반한 주파수 추정방식을 사용하였고 정상상태와 과도구간을 판단하고 과도구간 판단 시 Full-search기법을 적용하

여 스펙트럼의 주파수 추정 구간을 축소하는 알고리즘을 추가하여 수렴성과 정밀도를 개선하였다. 시뮬레이션을 통하여 스펙트럼 기반의 주파수 추정기법들 중 대표적인 ECKF와 LMS기반의 MV스펙트럼, DFT기법과 비교하며 수렴속도와 정확성에 대하여 제안한 알고리즘의 우수성을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 주파수 추정기법은 빠른 수렴성과 높은 정밀도의 주파수 추정을 가능케 하여주며, 앞으로 고속연산구조를 얻기 위한 추가연구를 통해 임베디드 시스템 환경에서 구현함으로써 실질적 전력보호 및 제어 응용에 대한 기여가 크다 하겠다.

## References

- [1] A. K. Pradhan, A. Routray, and A. Basak, "Power system frequency estimation using least mean square technique," *IEEE Trans. Power Del.*, vol.20, no.3, pp.1812-1816, 2005. DOI:10.1109/TPWRD.2004.843453
- [2] P. K. Dash, A. K. Pradhan, and G. Panda, "Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalmanfilter," *IEEE Trans. Power Del.*, vol.14, no.3, pp.761-766, 1999. DOI:10.1109/61.772312
- [3] M. Akke, "Frequency estimation by demodulation of two complex signals," *IEEE Trans. Power Del.*, vol.12, no.1, pp.157-163, 1997. DOI:10.1109/61.568235
- [4] S. Lavrence Marple Jr, *Digital Spectral Analysis*, PRENTICE-HALL. INC. Englewood Cliffs. New Jersey 07632, 1987.
- [5] J. C. Burgess, "On digital spectrum analysis of periodic signals," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.58, no.3, pp.556-567, 1975. DOI:10.1121/1.380705
- [6] P. Stoica and R. L. Moses, "Introduction to Spectral Analysis," *Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall*, 1997.
- [7] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [8] A. A. Girgis and T. L. D. Hwang, "Optimal estimation of voltage phasors and frequency deviation using linear and nonlinear Kalman filtering: Theory and limitations," *IEEE Trans.*

- Power App. Syst.*, vol.PAS-103, no.10, pp.2943-2949, 1984. DOI:10.1109/TPAS.1984.318297
- [9] H.-J. Jeon and T.-G. Chang, "Iterative frequency estimation based on MVDR spectrum," *IEEE Trans. Power Del.*, vol.25, no.2, pp.621-630, 2010. DOI:10.1109/TPWRD.2009.2031116
  - [10] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 3rd ed. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 1996.
  - [11] Soon-Ryul Nam and Sang-Hee Kang, "Real-Time Estimation of Power System Frequency Using a Three-Level Discrete Fourier Transform Method," *energies*, vol.8, pp.79-93, 2014. DOI:10.3390/en8010079

## BIOGRAPHY

### Gi-Sung An (Member)



2018 : BS degree in Electronics and Electrical Engineering, Chung-Ang University.

His research interests are adaptive signal processing and digital communication.

### Young-Duk Seo (Member)



2018 : BS degree in Electronics and Electrical Engineering, Chung-Ang University.

His research interests are in the area of multimedia signal processing, adaptive signal processing and digital communication.

**Tae-Gyu Chang** (Member)

1979 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
1981 : MS degree in Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.  
1987 : PhD degree in Electrical Engineering, University of Florida.

1981~1984 : Systems Design Engineer, Hyundai Engineering/Electronics.

1987~1990 : Research Assistant Professor, Tennessee State University, Nashville.

1990~ : Professor, Chung-Ang University

**Sang-Hee Kang** (Member)

1985 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
1987 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
1993 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2001~ : Professor at Myongji University, Next-Generation Power Technology Center