

765kV 모델링 데이터에 의한 개선된 주파수 추정기법의 성능 평가

논문

59P-3-2

Performance Evaluation of Advanced Frequency Estimation Technique using 765kV Modeling Data

박철원[†]
(Chul-Won Park)

Abstract - The frequency is an important operation parameter for the control, protection, and stability of a power system. The frequency as a key index of power quality can be indicative of system abnormal conditions and disturbances. Due to the sudden change in generation and loads or faults in power system, the frequency is supposed to deviate from its nominal value. It is essential that the frequency must be maintained very close to its nominal frequency. An accurate monitoring of the power frequency is essential to optimal operation and prevention for wide area blackout. As most conventional frequency estimation schemes are based on DFT filter, it has been pointed out that the gain error could cause defects when the frequency is deviated from nominal value. This paper presents an advanced frequency estimation technique using gain compensation to improve the performance of DFT filter based techniques. To evaluate performance of the proposed algorithm, the 765kV T/L system in Korea is simulated by EMTP-RV software. The proposed technique can reduce the gain error caused when the power system frequency deviates from nominal value.

Key Words : 765kV T/L, DFT Filter, EMTP-RV, Gain Compensation, Frequency Estimation, Nominal Frequency, Wide Area Blackout

1. 서론

전력계통 주파수(이하 주파수)는 전력시스템의 보호 제어 및 안정도를 위한 중요한 운용 파라미터 중의 하나이다[1]. 특히 주파수는 전력품질을 나타내는 중요한 인덱스로서 전력시스템의 비정상적인 조건과 외란을 암시해 준다[2]. 전력계통에서 사고가 발생하거나 부하나 발전력이 갑자기 큰 변화를 일으키면, 주파수는 정규 주파수로부터 편이하게 된다. 이런 경우 주파수 측정 장치나 추정기법은 매우 빠르고 정확하게 주파수를 측정하거나 추정해야 되고, 또 전력계통은 주파수를 정규 주파수에 매우 근접하게 유지시켜야 된다[3].

최근 GPS(global positioning system) 수신을 이용한 시각동기 페이지를 기반으로 FDRs(fault disturbance recorders), PMU(phasor measurement unit) 및 iPIU(intelligent power system information unit)에 대한 관심이 증가하고 있다. 미국에서는 전력계통의 광역 측정 시스템을 위한 중요한 테마로 GPS의 공통 기준신호에 의해 주파수 및 주파수 편이를 정확하고 세밀하게 모니터링을 수행하는 FNET(frequency monitoring network)가 제안되었다[4-7]. 지난해 국내에서도 송전계통의 실시간 운전상황을 감시하여 안정도를 예측하는 이른바 한국형 광역 전력계통 감시시스템(K-WAMS) 시제

품이 개발되어 한국전력공사 변전소에 일부 설치, 실증시험 중에 있다고 보고되었다[8-11].

마이크로프로세서가 출현한 이후 지난 30여년동안, 주파수 측정 및 주파수 편이 추정을 위한 많은 기법들이 개발되었다[12,13]. 대다수의 기법들은 전압신호를 샘플 값으로 이산화를 시키는 과정 중에 디지털필터가 포함된다. 이때 전형적인 다수의 DFT 필터 기반 주파수 추정기법들은 전력계통의 주파수가 정규 주파수로부터 변화할 때 발생하는 이득의 오차 때문에 주파수의 정밀도 저조하였다[14-17].

본 논문에서는 종래의 DFT 필터 기반 주파수 추정기법의 이득 오차를 감소시키기 위하여 이득 보상을 사용한 주파수 추정 기법을 제안하였다. 제시된 기법의 성능을 평가하기 위하여 EMTP-RV을 이용하여 765kV 실계통의 모델링을 구성하여 부하 탈락에 의한 외란 데이터를 활용하였다[1,18]. 제시된 기법은 전력 주파수가 정규 주파수로부터 변화하더라도 이득 오차를 감소할 수 있음을 나타내었다. 본 논문은 제2장에서는 종래의 DFT 필터 기반 페이지 상차각에 의한 주파수 추정 기법을, 제3장에서는 이득 보정에 의한 개선된 주파수 추정 기법에 대한 이론을, 제4장에서는 EMTP-RV 모델계통과 제시된 기법의 성능 평가를, 제5장에서는 결론을 각각 서술하였다.

2. 페이지 상차각에 의한 주파수 추정 기법

샘플링 주파수가 720Hz인 경우, 이산 전압신호의 상호상관에 의한 기본 주파수 성분의 실수부와 허수부를 차분 방

[†] 교신저자, 중신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2010년 5월 27일

최종완료 : 2010년 7월 7일

정식으로 표현하면 식(1)과 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$V_{n1}^c(k) = \frac{2}{12} [V_k - V_{k-6} + 0.5(V_{k-10} - V_{k-8} - V_{k-4} + V_{k-2}) + 0.866025404(V_{k-11} - V_{k-7} - V_{k-5} + V_{k-1})] \quad (1)$$

$$V_{n1}^s(k) = \frac{2}{12} [V_{k-9} - V_{k-3} + 0.5(V_{k-11} + V_{k-7} - V_{k-5} - V_{k-1}) + 0.866025404(V_{k-10} + V_{k-8} - V_{k-4} + V_{k-2})] \quad (2)$$

여기서, V_{k-n} 는 $k-n+N$ 번째 샘플링 순간의 샘플링값이다. DFT 필터를 통한 기본 주파수의 연속하는 두 페이지의 상차각 $\theta_{n+1} - \theta_n$ 를 이용하면, 추정 주파수 f 는 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$f = \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{\frac{2\pi}{f_s}} \quad (3)$$

여기서, f_s 는 샘플링 주파수 이다.

3. 이득 보정에 의한 개선된 주파수 추정 기법

이산 전압신호 $V(n)$ 의 크기가 A 이고 위상이 θ 일때, 정현 파 전압신호는 식(4)와 같이 표시할 수 있다[14~16].

$$V(n) = A \cos(2\pi n \frac{f}{f_s} + \theta) \quad (4)$$

$V(n)$ 에 오차 보정식을 적용하여 실수부와 허수부를 구하면,

$$V_c(n) = A_c \cos(2\pi n \frac{f}{f_s} + \hat{\theta}) \quad (5)$$

$$V_s(n) = A_s \sin(2\pi n \frac{f}{f_s} + \hat{\theta}) \quad (6)$$

여기서, $A_c = |H_c(f)|$, $A_s = |H_s(f)|$, $\hat{\theta} = \theta - \pi \frac{f(N-1)}{f_s}$ 따라서 크기의 비는 식(7)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{A_c}{A_s} = \frac{|H_c(f)|}{|H_s(f)|} = \frac{\tan(\frac{\pi f}{f_s})}{\tan(\frac{\pi f_0}{f_s})} \quad (7)$$

식(7)로부터 주파수 f 는 식(8)과 같이 된다.

$$f = \frac{f_s}{\pi} \tan^{-1}(\tan(\frac{\pi f_0}{f_s}) \frac{A_c}{A_s}) \quad (8)$$

식(8)을 구하기 위해서는 크기의 비를 구해야 하는데, 이는 식(5)와 식(6)을 조합하여 타원의 방정식을 구하여 식(9)와 같이 표시할 수 있다.

$$\left(\frac{V_c(n)}{A_c}\right)^2 + \left(\frac{V_s(n)}{A_s}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

그러므로 $V(n)$ 과 $V(n-1)$ 에 대한 코사인 필터와 사인 필터의 출력을 이용하면 식(10)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_c^2(n) & V_c^2(n-1) \\ -V_s^2(n) & V_s^2(n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{A_c^2} \\ \frac{1}{A_s^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)을 정리하면 식(11)이 되고

$$\frac{A_c}{A_s} = \sqrt{\frac{V_c^2(n) - V_c^2(n-1)}{-V_s^2(n) + V_s^2(n-1)}} \quad (11)$$

최종적으로 식(11)을 식(8)에 대입함으로써 추정 주파수는 식(12)와 같이 구할 수 있게 된다.

$$f = \frac{f_s}{\pi} \tan^{-1}(\tan(\frac{\pi f_0}{f_s}) \sqrt{\frac{V_c^2(n) - V_c^2(n-1)}{-V_s^2(n) + V_s^2(n-1)}}) \quad (12)$$

4. 사례연구

4.1 EMTP-RV에 의한 765kV 송전선로 모델링

제시한 개선된 주파수 추정 기법의 성능을 검증하기 위하여 그림 1과 같은 765kV 송전선로 모델계통을 선정하였다[1]. 당진 T/P와 울진 N/P의 여자기와 조속기를 위한 모델과 신안성 S/S, 신가평 S/S 등의 T/L은 실제계통 데이터를 기반으로 구성하였다. EMTP-RV 소프트웨어를 이용하여 당진 T/P에서 100MW, 400MW의 부하량을 변화시킴으로서 계통 외란시의 모의 데이터를 수집하였다. EMTP-RV 시뮬레이션의 경우 전압신호의 주기당 샘플링 수는 12S/C로 가정하였다. 시뮬레이션은 총 40sec 동안을 수행하였고, 부하량 변화 발생시각은 20sec로 하였다. 전압은 당진, 신서산, 신안성, 신가평, 신태백, 울진 등 모두 6개 지역에서 측정하였다.

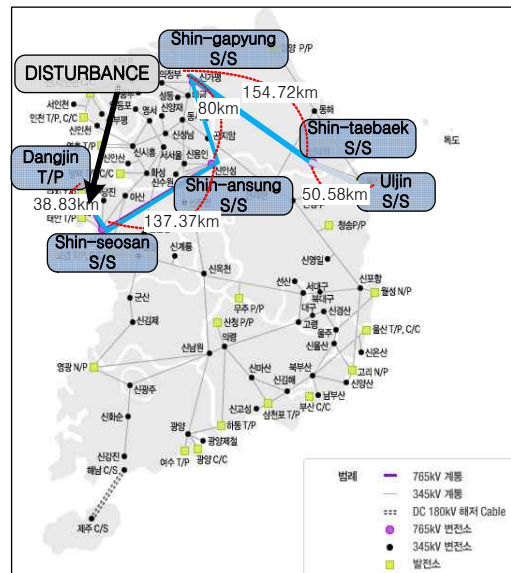
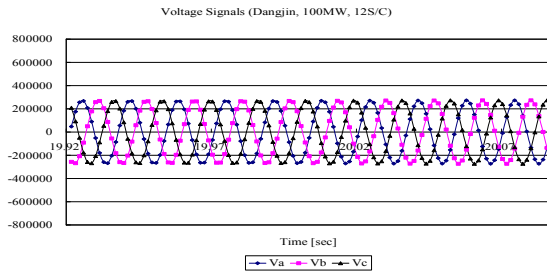


그림 1 EMTP-RV에 의한 전력계통 모델
Fig. 1 Power system model of EMTP-RV

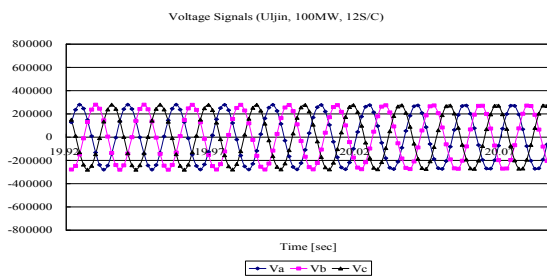
4.2 제시된 기법의 성능 평가

그림 2는 당진 T/P에서 20sec에 100MW의 부하를 탈락한 경우 당진 T/P와 울진 N/P에서의 3상 전압신호이다. 그림 2로부터 당진 T/P에서 울진 N/P로 부하 변동에 대한 영향이

계통으로 전파되는데, 당진 T/P로부터 거리가 멀수록 부하 변동에 대한 영향이 감소하는 것을 알 수 있다.



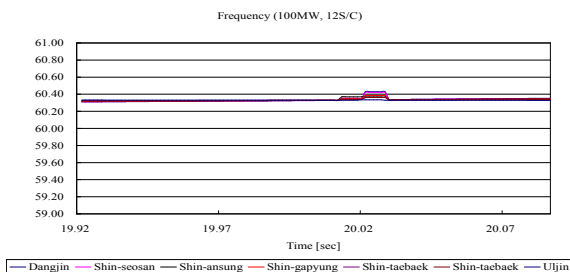
(a) 당진 T/P의 3상 전압신호
(a) Three phase voltage signals of 당진 T/P



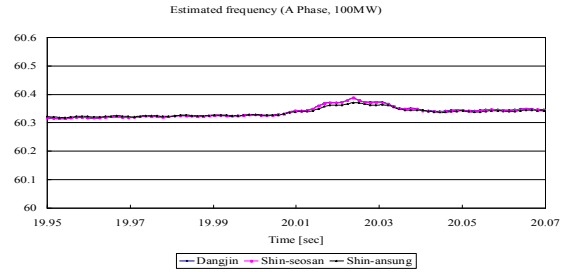
(b) 울진 N/P의 3상 전압신호
(b) Three phase voltage signals of 울진 N/P

그림 2 100MW 부하 탈락시 전압 신호
Fig. 2 Voltage signals under 100MW load shedding

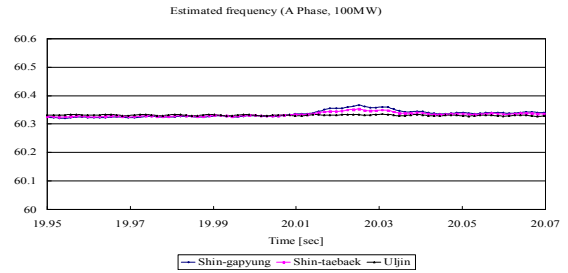
그림 3은 당진 T/P에서 20sec에 100MW의 부하를 탈락한 경우 EMTP-RV 시뮬레이션에 의한 주파수와 제시된 기법에 의해 추정된 주파수 결과이다. 그림 3(a)로부터 당진 T/P를 비롯한 측정 지역의 정규주파수들은 60.3[Hz]를 약간 상회하고 있다가 20sec에서 100MW의 부하가 탈락하자, 당진 T/P는 최대 60.4279[Hz]까지 상승하다가 안정화 되는 경향을 보였다. 그림 3(b),(c)로부터 제시된 기법에 의해 추정된 당진 T/P의 A상 최대 주파수는 60.3875[Hz], 신서산 S/S의 주파수는 60.3872[Hz], 신안성 S/S의 주파수는 60.3708[Hz]이었고, 신가평 S/S의 A상 주파수는 60.3660[Hz], 신태백 S/S의 주파수는 60.3520[Hz], 울진 N/P의 주파수는 60.3344[Hz] 이었다. 그림 3(a)는 EMTP-RV에서 전통적인 영점통과기법에 의해 3상의 평균 주파수가 산정된 것이며, 그림 3(b),(c)는 A상에 대해 제시된 기법에 의해 이동 창 방법으로 추정된 것이다.



(a) EMTP-RV 시뮬레이션에 의해 연산된 주파수
(a) Computed frequency by EMTP-RV simulation



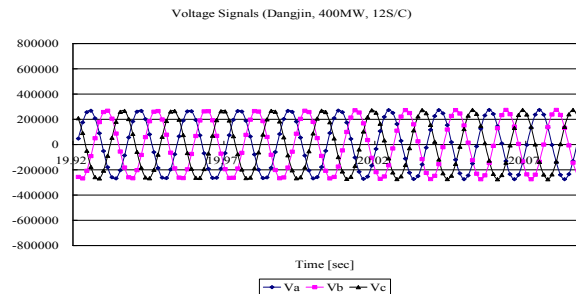
(b) 제시된 기법의 추정된 주파수(당진,신서산,신안성)
(b) Estimated frequency by the proposed technique



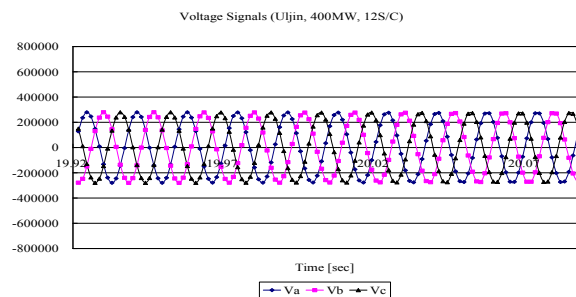
(c) 제시된 기법의 추정된 주파수(신가평,신태백,울진)
(c) Estimated frequency by the proposed technique

그림 3 100MW 부하 탈락시 전압 신호
Fig. 3 Voltage signals under 100MW load shedding

그림 4는 당진 T/P에서 20sec에 400MW의 부하를 탈락한 경우 당진 T/P와 울진 N/P에서의 3상 전압신호이다.



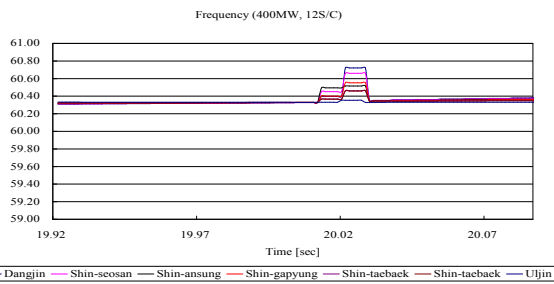
(a) 당진 T/P의 3상 전압신호
(a) Three phase voltage signals of 당진 T/P



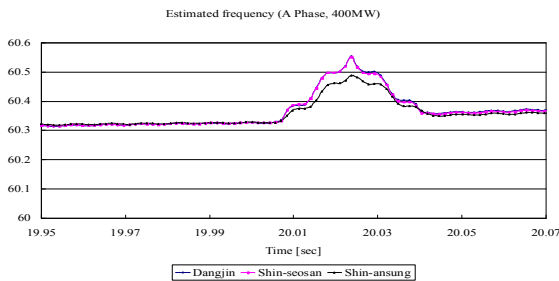
(b) 울진 N/P의 3상 전압신호
(b) Three phase voltage signals of 울진 N/P

그림 4 400MW 부하 탈락시 전압 신호
Fig. 4 Voltage signals under 400MW load shedding

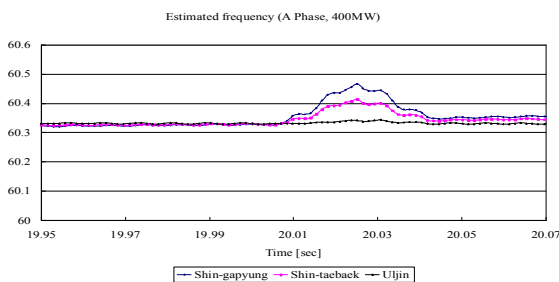
그림 5는 당진 T/P에서 20sec에 400MW의 부하를 탈락한 경우 EMTP-RV 시뮬레이션에 의한 주파수와 제시한 기법에 의해 추정된 주파수 결과이다. 그림 5(a)로부터 당진 T/P를 비롯한 측정 지역의 정규주파수들은 60.3[Hz]를 약간 상회하고 있다가 20sec에서 400MW의 부하가 탈락하자, 당진 T/P는 최대 60.7211[Hz]까지 상승하다가 안정화 되는 경향을 보였다. 그림 5(b),(c)로부터 제시된 기법에 의해 추정된 당진 T/P의 A상 최대 주파수는 60.5527[Hz], 신서산 S/S의 주파수는 60.5520[Hz], 신안성 S/S의 주파수는 60.4879[Hz]이었고, 신가평 S/S의 A상 주파수는 60.4664[Hz], 신태백 S/S의 주파수는 60.4143[Hz], 울진 N/P의 주파수는 60.3432[Hz] 이었다. 그림 5(a)는 EMTP-RV에서 전통적인 영점통과기법에 의해 3상의 평균 주파수가 산정된 것이며, 그림 5(b),(c)는 A상에 대해 제시된 기법에 의해 이동 창 방법으로 추정된 것이다.



(a) EMTP-RV 시뮬레이션에 의한 연산된 주파수
(a) Computed frequency by EMTP-RV simulation



(b) 제시된 기법의 추정된 주파수(당진,신서산,신안성)
(b) Estimated frequency by the proposed technique



(c) 제시된 기법의 추정된 주파수(신가평,신태백,울진)
(c) Estimated frequency by the proposed technique

그림 5 100MW 부하 탈락시 전압 신호

Fig. 5 Voltage signals under 100MW load shedding

표 1은 6개 지역의 부하탈락량에 대한 제시된 기법에 의해 연산된 주파수이다.

표 1 부하 탈락시 계산된 주파수

Table 1 Computed frequency under load shedding

지역 부하탈락	당진 T/P	신서산 S/S	신안성 S/S	신가평 S/S	신태백 S/S	울진 N/P
100MW	60.3875	60.3872	60.3708	60.3660	60.3520	60.3344
400MW	60.5527	60.5520	60.4879	60.4664	60.4143	60.3432

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 DFT 필터 기반 주파수 추정기법의 이득 오차를 감소시키기 위하여 이득 보상에 의한 개선된 주파수 추정 기법을 정식화 하였다. 제시된 기법의 성능을 평가하기 위하여 국내 765kV 실계통 모델링을 EMTP-RV에 의하여 구성하였고 부하 탈락에 의한 외란 데이터를 수집, 활용하였다. 시뮬레이션 결과 부하가 탈락한 경우 부하변동은 당진 T/P에서 울진 N/P 방향으로 그 변동에 대한 영향이 계통으로 전파되는데, 당진 T/P로부터 거리가 멀수록 부하 변동에 대한 영향이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또 과도상태의 경우, EMTP-RV에서 산정된 주파수보다 제시된 기법에 의해 이득 오차가 감소됨으로서 정확도가 향상될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

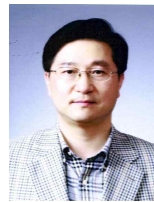
본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(2008T100100131)

참 고 문 헌

- [1] Chul Won Park, "Development of Network Based Frequency Monitoring and Fault Prediction System for Wide Area Intelligent Relaying", 2008 Energy R&D projects, 1 year report, pp. 1~74, 2009.11.
- [2] J. Ren, M. Kezunovic, "Use of Recursive Wavelet Transform for Estimating Power System Frequency and Phasors", IEEE PES T&D Conference, TD2010-000221, 2010.4
- [3] C.W. Park, "A Comparative Study of Frequency Estimation Technique using Phasor Angle between Two Phasors and High Speed FIR Filter", KIEE Trans, Vol. 58P, No. 2, pp. 122~129, 2009.6.
- [4] A.G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements ~ A Historical Overview", IEEE PES summer meeting pp. 476~479, 2002.
- [5] Zhou Jie, Zhang Changyin, Hw Wei, Jiang Ping, Cheng Chunling, "Precise Measurement of Power System Frequency and Absolute Phase Based on GPS", pp. 1947~1951, IEEE 2002.
- [6] Z. Zhong, A.G. Phadke, Y. Liu et al., "Power System Frequency Monitoring Network (FNET) Implementation",

- IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 4, pp. 1914~1921, Nov., 2005.
- [7] Lei Wang, Richard W. Conners, Yilu Liu et al, "Frequency Disturbance Recorder Design and Developments", IEEE PES Summer Meeting, 2007.
- [8] Sang-Tae Gim, Ji-Yeong Kim, Dong-Cul Yi, Wan-Seok Song, Su-Hyeong Jang, Young-Don Kim, "Time synchronization using data-area surveillance system implemented in K-WAMS", KIEE Fall Conference, pp. 44~46, 2008.11.
- [9] Young-Hwan Mun, Tae-Hyun Kim "Korean-area power system monitoring system (K-WAMS)", The final report and presentation, pp. 44~46, 2009.8.
- [10] Tae-YunGwon, Li-Kwon Chung, Hyeon-Mo Yi, "Based on satellite communications and GPS data, a synchronous phase-measuring device developed" Proceedings of the PSPES Annual Conference 2008, pp. 101~106, 2008.3.
- [11] K.S. Kookl et al, "Global behaviour of power system frequency in Korean power system for the application of frequency monitoring network", IET Generation Transmission Distribution, Vol. 2, No. 5, pp. 764~774, 2008.
- [12] T.S. Sidhu, "Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique", IEEE Trans. on I&M, Vol.48, No.1, pp. 75-81, February, 1999.
- [13] C.W. Park, Y.S. Kim, "A Comparative Study of Frequency Estimation Techniques", IEEE T&D Asia Conference, PO13-4, Oct., 2009.
- [14] P.J. Moore, R.D. Carranza, A.T. Johns, "A new numeric technique for high speed evaluation of power system frequency", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No.5, pp. 529~536, September, 1994.
- [15] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "A new measurement technique for tracking voltage phasor, local system frequency, and rate of change of frequency", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025~1034, May, 1983.
- [16] S.R. Nam, S.H. Kang, J.K. Park, "An Algorithm for Power Frequency Estimation using the Difference between the Gain of Cosine and Sine Filters", KIEE Trans, Vol. 55A, No.6, pp. 249~254, Jun., 2006.
- [17] C.W. Park, Y.H. Ban, "Advanced Frequency Estimation Algorithm for Frequency Disturbance Recorder", KIEE Spring Conference, PE-O08, pp. 37~39, May, 2010.
- [18] C.W. Park, et al, "A Development of Frequency Monitoring System based on Network", ICEE 2010 Conference, PS-PSIT-01, July 11~14, 2010.

저 자 소 개



박철원 (朴哲圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수.

Tel : 033-760-8786

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr