

Frequency Estimation Method using Recursive Discrete Wavelet Transform for Fault Disturbance Recorder

박철원* · 반우현*
(Chul-Won Park · Yu-Hyeon Ban)

Abstract - A wide-area protection intelligent technique has been used to improve a reliability in power systems and to prevent a blackout. Nowadays, voltage and current phasor estimation has been executed by GPS-based synchronized PMU, which has become an important way of wide-area blackout protection for the prevention of expanding faults in power systems. As this technique has the difficulties in collecting and sharing of information, there have been used a FNET method for the wide-area intelligent protection. This technique is very useful for the prediction of the inception fault and for the prevention of fault propagation with accurate monitoring frequency and frequency deviation. It consists of FDRs and IMS. It is well known that FNET can detect the dynamic behavior of system and obtain the real-time frequency information. Therefore, FDRs must adopt a optimal frequency estimation method that is robust to noise and fault. In this paper, we present comparative studies for the frequency estimation method using IRDWT(improved recursive discrete wavelet transform), for the frequency estimation method using FRDWT(fast recursive discrete wavelet transform). we used the Republic of Korea 345kV power system modeling data by EMTP-RV. The user-defined arbitrary waveforms were used in order to evaluate the performance of the proposed two kinds of RDWT. Also, the frequency variation data in various range, both large range and small range, were used for simulation. The simulation results showed that the proposed frequency estimation technique using FRDWT can be the optimal frequency measurement method applied to FDRs.

Key Words : 345kV power system, EMTP-RV, DFT, FDR, Frequency estimation, FNET, FRDWT, GPS, IRDWT, PMU, Wide area protection

1. 서론

전력계통이 대규모화되고 다양화됨에 따라 전력계통의 신뢰도 향상과 정전방지를 위한 광역보호계전 지능화 기술개발에 대한 요구가 점점되고 있다. 근래에 GPS 기반 동기화된 PMU(Phasor Measurement Unit)에 의한 전압과 전류 페이저 및 주파수 추정은 전력시스템의 광역정전 보호 및 예방의 중요한 방식이 되고 있다[1~3].

그러나 실제로는 이에 대한 정보의 수집과 공유가 쉽지 않기 때문에, 손쉽게 주파수 및 주파수 편이만을 정밀하게 모니터링 함으로서 초기 고장(seed fault)을 예측하고 고장파급을 방지하려는 광역보호계전 지능화기술인 FNET(Frequency Monitoring Network) 이 부각되고 있다. 이는 FDR(Fault Disturbance Recorder)과 IMS(Information Management System)로 구성된다[4,5]. FNET은 실시간에 가까운 주파수 정보와 시스템 동특성을 총체적으로 파악하게 되는데, 국내에서도 2000년대 후반부터 관심을 갖고 연구하기 시작하였

다[6,7]. 측정된 광역 주파수 측정값을 이용하여 주파수 시각화(visualization) 도구가 개발되었는데, 이 도구는 실시간 주파수 값을 그래디언트 컬러 코드로 보여주며 사고 분석을 가능하게 하였다[8~10].

이에 따라 FDR에는 고장과 잡음에 강인성이 보장된 최적의 주파수 추정 기법이 선정되어야 한다. 전통적으로 푸리에 변환은 전력계통의 과도신호와 동적신호를 분석하는데 일반적으로 사용되었다[11,12]. FFT(Fourier Transform)는 고속으로 정상상태(stational) 신호에 적용이 잘 되었다. 그러나 짧은시간 주기사건(short time duration event)인 비정상상태(non stational) 신호에 대해선 적당하지 않은 것으로 알려졌다. 또 칼만 필터링, 최소 자승법, 인공신경회로망(Artificial Neural Network) 등이 전력 시스템 신호의 분석에 사용되었고 프로니 기법은 실시간 구현이 용이하지 않다[22~28]. 특히 푸리에 변환은 적은 계산량 때문에 광범위하게 사용되었지만 주파수가 변화하게 되면 정밀도가 떨어지므로 왜곡된 신호해석에 대한 요구에 충족하지 못했다. 이에 가변 데이터 윈도우 방식[13]이나 이득을 보상하는 개선된 기법이 등이 대안으로 제시되었다[14,15].

한편 지난 20년 동안 비정상상태 과도신호의 좋은 진단을 위한 새로운 신호 처리 도구로 웨이브릿(Wavelet)에 대한 관심이 폭발적인 속도로 성장했다. 웨이브릿 변환은 신호의 특이성(singularity) 처리에서 매우 좋은 역할을 하는 것으로

† 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

* 준 회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 석사과정
접수일자 : 2011년 3월 29일
최종완료 : 2011년 7월 13일

인하여 혼합송전선로의 거리계전[16], 전압 Sag 검출[17], 발전기의 내부 고장 검출[18], 전력용 변압기의 여자돌입 검출[19], 배전계통의 지락사고 검출[20], 전력시스템 고장 진단[21] 등에 적용되었다. 최근에는 실시간 신호 처리를 위해 연산량을 대폭 감소시켜서 디지털계전기의 페이저 추정[22], 직류 윗셋의 정확한 추정[23]에서 실시간 구현이 용이하였다 [24~28].

이에 본 논문에서는 두가지 모 웨이브릿 함수에 의한 반복 이산 웨이브릿 변환(RDWT:Recursive Discrete Wavelet Transform)을 적용하여 FNET의 FDR에 적용할 최적의 주파수 추정기법을 선정하고자 한다. EMTP-RV에 의한 국내 345kV 모델링 데이터와 사용자 정의 임의파형 및 주파수 변동 데이터를 활용하여 제시된 기법의 성능을 평가하였다.

2. 반복 이산 웨이브릿 변환에 의한 주파수 추정 기법

2.1 웨이브릿 변환

시간 의존 신호 $s(t)$ 의 웨이브릿 변환은 계수 $W_s(b,a)$ 의 집합을 찾는 것으로 구성된다. 이런 계수들은 신호 $s(t)$ 와 함수 $\Psi_{b,a}(t)$ 사이의 유사성을 측정하게 된다. 선택된 모 웨이브릿(Mother Wavelet) $\Psi(t)$ 로부터 파생된 모든 함수 $\Psi_{b,a}(t)$ 는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, a , b , $1/\sqrt{a}$ 는 각각 시간 팽창(dilating), 시간 이동(shifting), 에너지 정규화를 나타낸다.

$$\Psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

모 웨이브릿 $\Psi(t)$ 는 진동하고 감쇠 함수로서 각각의 웨이브릿 $\Psi_{b,a}(t)$ 는 원 함수 $\Psi(t)$ 의 크기가 조정되고 이동된다.

계수 $W_s(b,a)$ 는 내적에 의해 식(2)와 같이 정의할 수 있다. 여기서, $\bar{\cdot}$ 는 공액 복소수이다.

$$W_s(b,a) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \overline{\Psi_{b,a}(t)} dt \quad (2)$$

2.2 개선된 반복 이산 웨이브릿 변환

웨이브릿 함수의 성능은 적당한 모 웨이브릿 함수의 선택에 의존하게 된다. 개선된 반복 이산 웨이브릿 변환(IRDWT:Improved Recursive Discrete Wavelet Transform)의 웨이브릿 모 함수는 식(3)과 같이 표현할 수 있다[19,26~27].

$$\Psi(t) = \left(\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} + \frac{\sigma^5 t^5}{15}\right) e^{(-\sigma + iw_0)t} u(t) \quad (3)$$

모 웨이브릿 $\Psi(t)$ 의 푸리에 변환은 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi(w) = \frac{6\sigma^5 - 2\sigma^3(w-w_0)^2}{(\sigma + i(w-w_0)^2)} \quad (4)$$

모 웨이브릿이 허용 조건(admissive condition)을 충족하기 위해서 $\sigma = 2\pi/\sqrt{3}$ 과 $w_0 = 2\pi$ 로 설정하였다. 그림 1은 시간 영역에서의 모 웨이브릿 변환의 특성을 나타낸다.

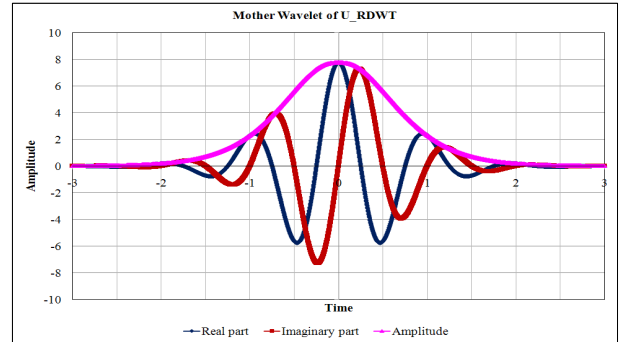


그림 1 IRDWT 모 웨이브릿 변환의 특성

Fig. 1 Characteristics of mother wavelet transform of IRDWT

웨이브릿 변환의 이산 형태는 식(5)와 같이 표현할 수 있다. 여기서, T 는 샘플링 주기이고, k 와 n 는 정수이며 $f = \frac{1}{a}$ 이다.

$$\Psi(fnT) = \left(-\frac{\sigma^3 fnT^3}{3} - \frac{\sigma^4 fnT^4}{6} - \frac{\sigma^5 fnT^5}{15}\right) \times e^{(\sigma + iw_0)fnT} u(-fnT) \quad (5)$$

z -변환하면 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_1(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} \Psi_1(fnT) Z^{-n} \quad (6)$$

이는 식(7)과 같이 계산이 쉽도록 표현할 수 있다.

$$\Psi_1(Z) = \frac{\delta_1 Z^{-1} + \delta_2 Z^{-2} + \delta_3 Z^{-3} + \delta_4 Z^{-4} + \delta_5 Z^{-5}}{\lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \lambda_3 Z^{-3} + \lambda_4 Z^{-4} + \lambda_5 Z^{-5} + \lambda_6 Z^{-6}} \quad (7)$$

여기서, $\alpha = e^{-f\Delta T(\sigma - iw_0)}$

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \alpha[(\sigma f \Delta T)^3/3 - (\sigma f \Delta T)^4/6 + (\sigma f \Delta T)^5/15] \\ \delta_2 &= \alpha^2[2(\sigma f \Delta T)^3/3 - 5(\sigma f \Delta T)^4/3 + 26(\sigma f \Delta T)^5/15] \\ \delta_3 &= \alpha^3[-6(\sigma f \Delta T)^3/3 + 22(\sigma f \Delta T)^5/5] \\ \delta_4 &= \alpha^4[2(\sigma f \Delta T)^3/3 + 5(\sigma f \Delta T)^4/3 + 26(\sigma f \Delta T)^5/15] \\ \delta_5 &= \alpha^5[(\sigma f \Delta T)^3/3 + (\sigma f \Delta T)^4/6 + (\sigma f \Delta T)^5/15] \\ \lambda_1 &= -6\alpha, \lambda_2 = 15\alpha^2, \lambda_3 = -20\alpha^3, \lambda_4 = 15\alpha^4, \lambda_5 = -6\alpha^5, \lambda_6 = \alpha^6 \end{aligned}$$

따라서 식(7)을 식(6)에 대입하면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$W_{s,\Psi}(Z) (\lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \lambda_3 Z^{-3} + \lambda_4 Z^{-4} + \lambda_5 Z^{-5} + \lambda_6 Z^{-6}) = \sqrt{f} TS(Z) \cdot (\delta_1 Z^{-1} + \delta_2 Z^{-2} + \delta_3 Z^{-3} + \delta_4 Z^{-4} + \delta_5 Z^{-5}) \quad (8)$$

z-변환의 변위특성(displacement characteristics)에 따라 IRDWT는 식(9)와 같이 표현할 수 있다. 식(9)로부터 과거 데이터를 활용하기 때문에 웨이브릿 계수는 실시간으로 구현이 가능함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &W_s(kT, f) \\
 &= \sqrt{f} T \delta_1 [s(k-1)T, f] + \delta_2 [s(k-2)T, f] \\
 &+ \delta_3 [s(k-3)T, f] + \delta_4 [s(k-4)T, f] + \delta_5 [s(k-5)T, f] \\
 &- \lambda_1 W_{s,\psi} [(k-1)T, f] - \lambda_2 W_{s,\psi} [(k-2)T, f] \\
 &- \lambda_3 W_{s,\psi} [(k-3)T, f] - \lambda_4 W_{s,\psi} [(k-4)T, f] \\
 &- \lambda_5 W_{s,\psi} [(k-5)T, f] - \lambda_6 W_{s,\psi} [(k-6)T, f]
 \end{aligned} \tag{9}$$

2.3 고속 반복 이산 웨이브릿 변환

고속 반복 이산 웨이브릿 변환(FRDWT:Fast Recursive Discrete Wavelet Transform)의 웨이브릿 모 함수는 식(10)과 같이 표현할 수 있다[21,25~26].

$$\Psi(t) = \left(1 + \sigma|t| + \frac{\sigma^2}{2}t^2\right) e^{(-\sigma + jw_0)t} \tag{10}$$

모 웨이브릿 $\Psi(t)$ 의 푸리에 변환은 식 (11)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\Psi}(w) = \frac{6\sigma^5 - 2\sigma^3(w - w_0)^2}{[\sigma^2 + (w - w_0)^2]^3} \tag{11}$$

그림 2는 시간영역에서의 주파수 60[Hz] ($a=1/60$)일 때 모 웨이브릿 변환의 특성을 나타낸다.

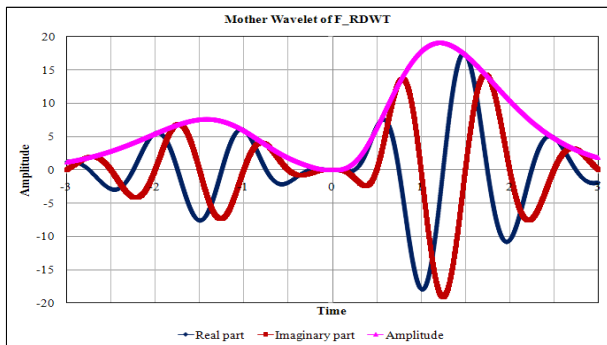


그림 2 FRDWT 모 웨이브릿 변환의 특성
Fig. 2 Characteristics of mother wavelet transform of FRDWT

웨이브릿 변환의 정의를 이산형태로 변경하고 컨벌루션으로 표시한 후 z-변환을 사용하여 표시하면 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\check{s}(z) = \sum_{-\infty}^{+\infty} s(nT)z^{-n} \tag{12}$$

주파수 f 가 고정일 때 $\{\Psi_+(fkT)\}_k$ 의 z-변환은 계산이 쉽고 표현은 식(13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\check{\Psi}_+(z) = \frac{1 + \delta_1 z^{-1} + \delta_2 z^{-2}}{1 + \lambda_1 z^{-1} + \lambda_2 z^{-2} + \lambda_3 z^{-3}} \tag{13}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \alpha &= e^{-fT(\sigma - jw_0)} \\
 \delta_1 &= \alpha \left(\frac{1}{2}(\sigma f T)^2 + \sigma f T - 2 \right) \\
 \delta_2 &= \alpha^2 \left(\frac{1}{2}(\sigma f T)^2 - \sigma f T + 1 \right) \\
 \lambda_1 &= -3\alpha, \quad \lambda_2 = 3\alpha^2, \quad \lambda_3 = -\alpha^3
 \end{aligned} \tag{14}$$

$\Psi_-(t) = \Psi_+(t)$ 때문에 $\{\Psi_-(fkT)\}_k, \check{\Psi}_-(z)$ 의 z-변환은 $\check{\Psi}_-(z) = \overline{\check{\Psi}_+(1/z)} - \Psi_+(0)$ 관계에 따라서 $\{\Psi_+(fkT)\}_k, \check{\Psi}_+(z)$ 로부터 유추할 수 있다. 식(13)과 (14)에 의해 식(15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\check{\Psi}_-(t) = \frac{(\overline{\delta_1 - \lambda_1})z + (\overline{\delta_2 - \lambda_2})z^2 - \overline{\lambda_3}z^3}{1 + \overline{\lambda_1}z + \overline{\lambda_2}z^2 + \overline{\lambda_3}z^3} \tag{15}$$

고정 주파수 f 에 대해 $\{W_s^+(kT, f)\}_k$ 은 인과 시스템 출력 시퀀스이고 $\{W_s^-(kT, f)\}_k$ 는 비인과 시스템 출력 시퀀스이다. $W_s^+(kT, f)$ 와 $W_s^-(kT, f)$ 는 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 W_s^+(kT, f) &= s(kT) + \delta_1 s[(k-1)T] \\
 &\delta_2 s[(k-2)T] - \lambda_1 W_s^+[(k-1)T, f] \\
 &- \lambda_2 W_s^+[(k-2)T, f] - \lambda_3 W_s^+[(k-3)T, f]
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 W_s^-(kT, f) &= (\overline{\delta_1 - \lambda_1})s[(k+1)T] + (\overline{\delta_2 - \lambda_2})s[(k+2)T] \\
 &+ (\overline{\delta_3 - \lambda_3})s[(k+3)T] - \overline{\lambda_1}W_s^-[(k+1)T, f] \\
 &- \overline{\lambda_2}W_s^-[(k+2)T, f] - \overline{\lambda_3}W_s^-[(k+3)T, f]
 \end{aligned}$$

주파수 f 와 범위 kT 에 연계된 FRDWT 웨이브릿 계수는 식(17)과 같이 표현할 수 있다.

$$W_s(kT, f) = T\sqrt{f} [W_s^+(kT, f) + W_s^-(kT, f)] \tag{17}$$

2.4 웨이브릿 변환에 의한 주파수 추정

상술한 웨이브릿 계수 표현인 식(9)와 식(17)를 활용하여 계수 $E(k)$, 상차각 $\theta(k)$, 추정 주파수 $f(k)$ 는 각각 식(18), 식(19), 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$E(k) = W_s(kT)/v(k) \tag{18}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1} \left(\frac{E(k+1) - E(k)}{\Delta T} \right) \tag{19}$$

$$f(k) = \left(\frac{w_0}{a} - \frac{\theta(k+1) - \theta(k)}{\Delta T} \right) / 2\pi \tag{20}$$

추정 오차 E_{rr} 는 식(21)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, f_e 는 추정된 주파수이다.

$$E_{rr} = \frac{|f_c - f|}{f} \times 100\% \quad (21)$$

3. 사례 연구

3.1 EMTP-RV에 의한 345kV 모델링

제시한 두가지 주파수 추정 기법의 성능을 검증하기 위하여, PSS/E 프로그램의 데이터를 기반으로 EMTP-RV에 의하여 국내 345kV 전력계통을 모델링하였다[10]. 345kV 모델계통은 총 154개의 발전기로 구성되어있으며, 총 발전량은 57654.76 MVA이다. 발전기 탈락(외란시점 : 2.5[sec]), 부하 탈락(외란시점 : 2.5[sec]) 등의 다양한 외란을 모의하고 그에 따른 계통 신호를 수집하기 위하여 그림 3과 같이 표시된 총 5지역(서울, 대전, 광주, 대구, 부산)에 FDR이 설치되어있다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 5지역은 국내 주요도시로서 각종 외란에 대한 영향분석이 가장 필요한 지역임을 고려하여 선정되었다. 본 시뮬레이션에서의 정상상태 주파수는 59.994[Hz]이고 샘플링 주파수는 720[Hz]이다.

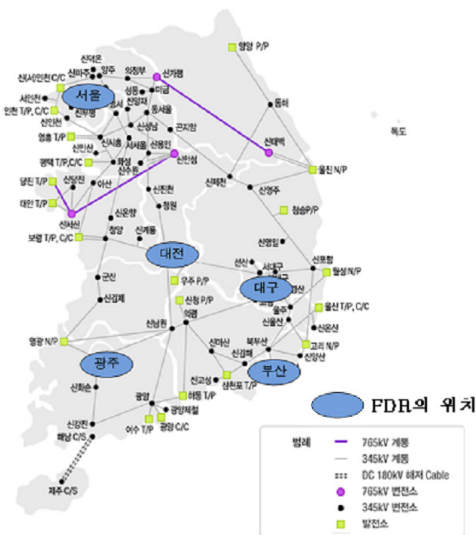
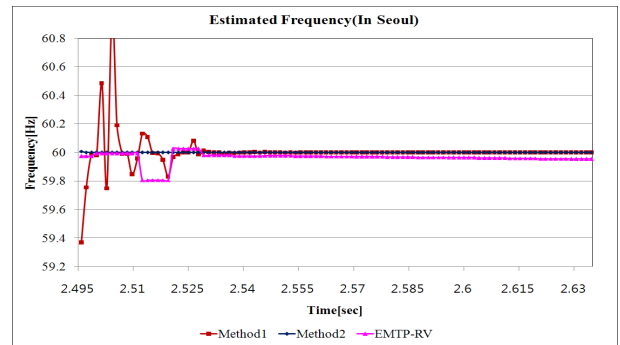


그림 3 EMTP-RV에 의한 전력계통 모델
Fig. 3 Power system model of EMTP-RV

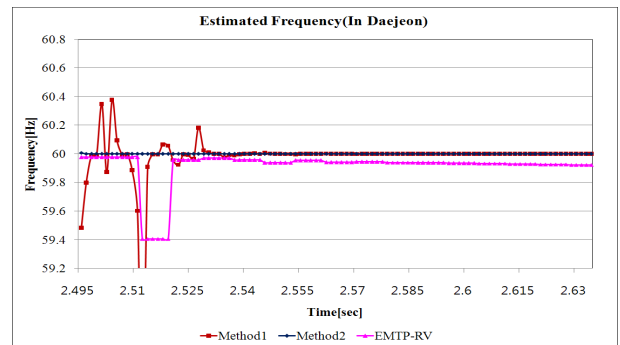
3.2 345kV 모델링에 의한 성능 평가 가. 발전기 탈락

그림 4는 영광 N/P 발전기 1,2기가 탈락한 경우 제시된 두가지 기법에 의한 A상 전압의 추정된 주파수이다. 그림 4(a)는 서울에서 측정된 경우, 그림 4(b)는 대전에서 측정된 경우, 그림 4(c)는 대구에서 측정된 경우, 그림 4(d)는 광주에서 측정된 경우, 그리고 그림 4(e)는 부산에서 측정된 경우이다. 본고에서는 IRDWT에 의한 주파수 추정 기법을 Method 1, FRDWT에 의한 주파수 추정 기법을 Method 2라고 하였다. 그림 4(a)로부터 Method 1은 과거의 데이터를 사용해서 연산하기 때문에 정상상태에서는 최대 1[Hz]까지 흔들리고, 외란시점인 2.5[sec] 이후에는 0.01[sec] 동안 흔들리다가 정규 주파수를 추정해 나가는 것을 알 수 있다. 두 기법과 EMTP-RV의 A상 주파수와의 Δf 연산 결과

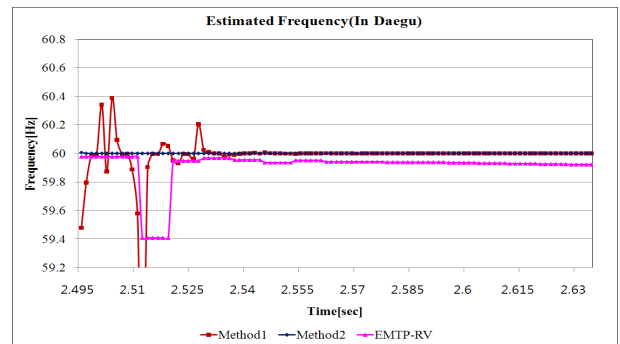
Method 1은 편차가 많이 흔들리는 반면에 Method 2는 EMTP-RV의 주파수와 유사한 편차로 흔들리는 것을 알 수 있었다. 그림 4(b)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.4[Hz]까지 흔들리고, 외란발생이후에는 1.5[Hz]까지 흔들리다 정규 주파수를 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.4[Hz], 외란발생이후 1.7[Hz]까지 흔들리다가 60[Hz]를 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 4(d)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.3[Hz], 외란발생이후 2[Hz]까지 흔들리다가 60[Hz]를 추정하였다. 그림 4(e)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.8[Hz], 외란발생이후 0.8[Hz]까지 흔들리다가 60[Hz]를 추정하였다. 그림 4(b)~4(e)의 Δf 연산 결과는 앞선 결과와 유사하였다. Method 2는 전 지역에서 정상상태뿐만 아니라 과도상태에서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.



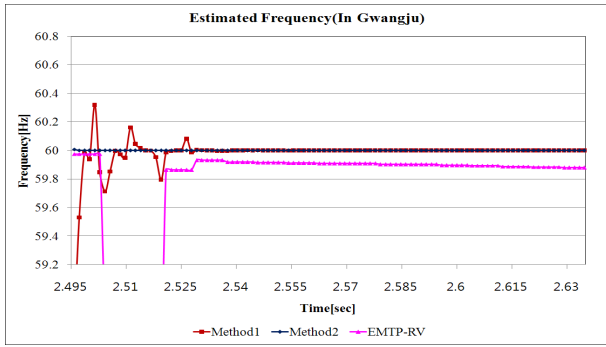
(a) 서울에서 측정된 경우



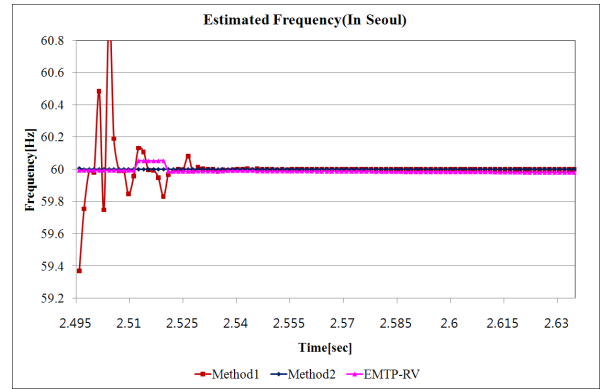
(b) 대전에서 측정된 경우



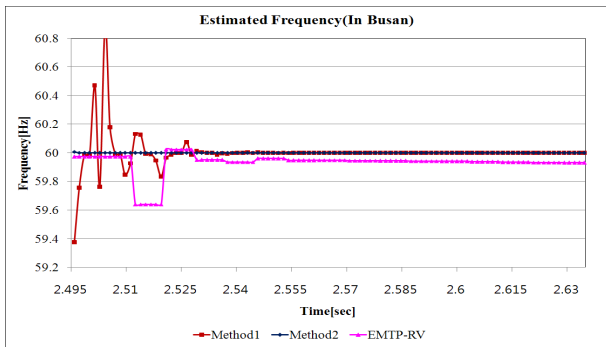
(c) 대구에서 측정된 경우



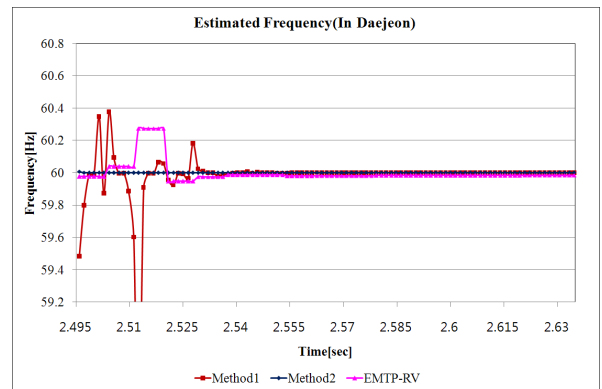
(d) 광주에서 측정된 경우



(a) 서울에서 측정된 경우

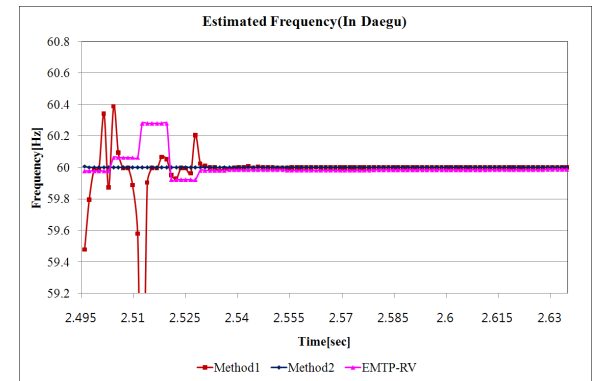


(e) 부산에서 측정된 경우

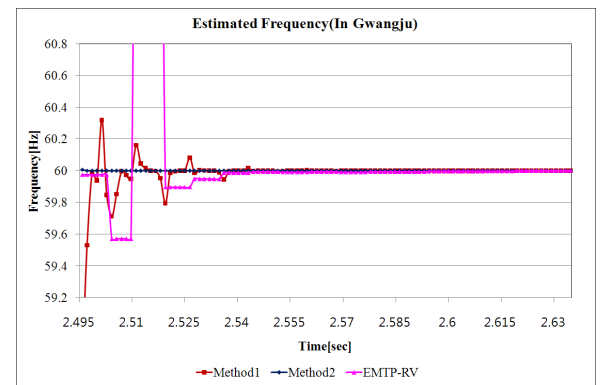


(b) 대전에서 측정된 경우

그림 4 발전기 탈락의 경우 추정된 주파수(영광/N/P 1,2기)
Fig. 4 Estimated frequency of generator rejection



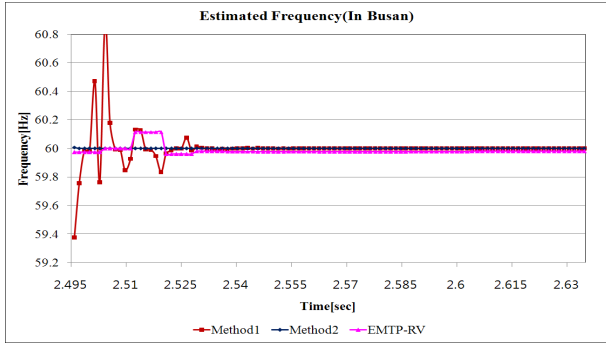
(c) 대구에서 측정된 경우



(d) 광주에서 측정된 경우

나. 부하 탈락

그림 5는 신광주의 부하 전체가 탈락한 경우, 제시된 두가지 기법에 의한 A상 전압의 추정된 주파수이다. 그림 5(a)는 서울에서 측정된 경우, 그림 5(b)는 대전에서 측정된 경우, 그림 5(c)는 대구에서 측정된 경우, 그림 5(d)는 광주에서 측정된 경우, 그리고 그림 5(e)는 부산에서 측정된 경우이다. 그림 5(a)로부터 Method 1은 과거의 데이터를 사용해서 연산하기 때문에 정상상태에서는 최대 1[Hz]까지 흔들리고, 외란발생시점인 2.5[sec] 이후에는 0.01[sec] 동안 흔들리다가 60[Hz]를 추정해 나가는 것을 알 수 있다. 두기법과 EMTP-RV의 A상 주파수와의 Δf 연산 결과, Method 1은 편차가 많이 동요하는 반면에 Method 2는 EMTP-RV의 주파수와 유사한 편차를 나타내는 것을 알 수 있었다. 그림 5(b)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.4[Hz]까지 흔들리고, 외란발생이후에는 1.3[Hz]까지 흔들리다 60[Hz]를 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.4[Hz], 외란발생이후 1.3[Hz]까지 흔들리다가 60[Hz]를 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 5(d)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.3[Hz], 외란발생이후 1.8[Hz]까지 흔들리다가 정규 주파수를 추정하였다. 그림 5(e)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.8[Hz], 외란발생이후 1[Hz]까지 흔들리다가 정규 주파수를 추정하였다. 그림 5(b)~5(e)의 Δf 연산 결과는 앞선 결과와 유사하였다. Method 2는 전 지역에서 정상상태뿐만 아니라 외란이 발생하여도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.



(e) 부산에서 측정된 경우

그림 5 부하 탈락의 경우 추정된 주파수(ALL MVA)

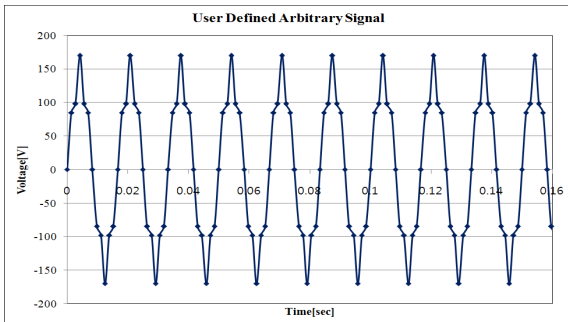
Fig. 5 Estimated frequency of load rejection

3.3 사용자 정의 임의 파형에 의한 성능 평가

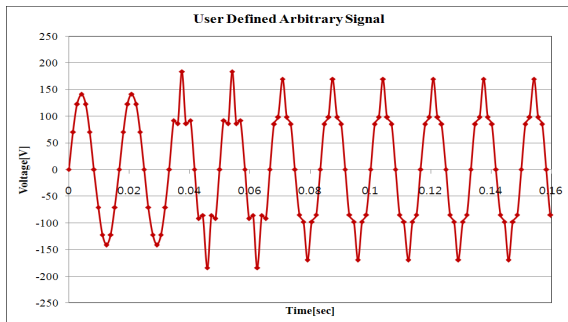
제시된 추정 기법의 성능을 비교 평가하기 위해서 식(22)와 같이 정규 주파수 60[Hz]를 기반으로 5고조파가 30%, 7고조파가 10%로 구성된 사용자 정의 임의 신호를 생성하였다. 이때 처음부터 완전히 합성된 경우와 순차적으로 합성된 경우로 분리하여 각각 제시된 두가지 주파수 추정 알고리즘의 결과를 확인하였다.

$$x(t) = \sin\omega t + 0.3\sin 5\omega t + 0.1\sin 7\omega t \quad (22)$$

그림 6(a)은 식(22)을 그대로 적용한 완전 합성한 시험 신호이고, 그림 6(b)은 기본파 신호에서 1주기(0.1388889[sec])이후에 5고조파를 합성하고 3주기(0.4166667[sec])이후에 7고조파를 함유시킨 순차합성 시험신호이다.



(a) 완전합성

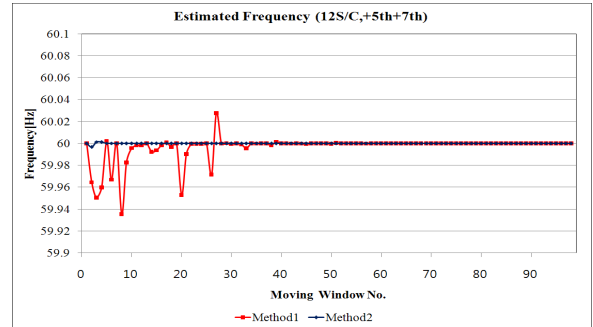


(b) 순차합성

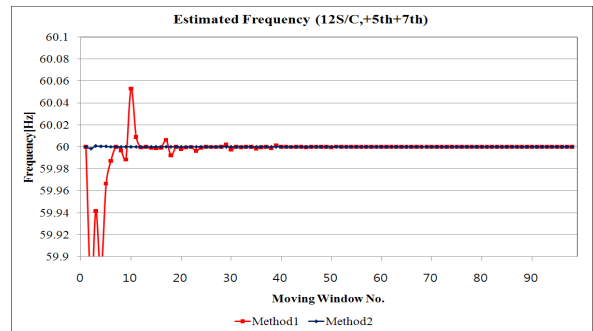
그림 6 사용자 정의 임의 신호

Fig. 6 Test signal with user defined arbitrary signal

그림 7(a)와 7(b)는 사용자 정의 임의 신호에 대한 주파수 추정 결과이다. 처음부터 고조파를 합성한 신호와 고조파를 순차적으로 합성한 신호에 두가지 추정 기법을 적용하였을 때 전반적으로 두 기법 모두 우수한 성능을 보였다. 그러나 Method 2가 Method 1보다 더 정확하게 정규 주파수 추정 성능을 나타내었다.



(a) 완전합성



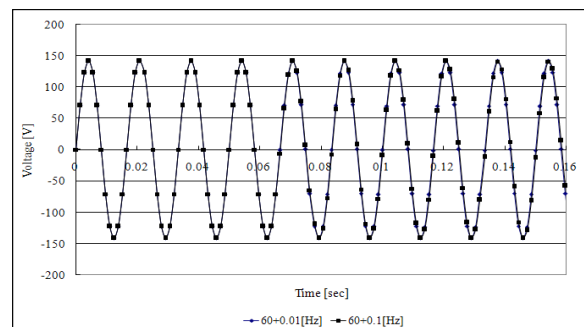
(b) 순차합성

그림 7 사용자 정의 임의 신호에 대한 주파수 추정 결과

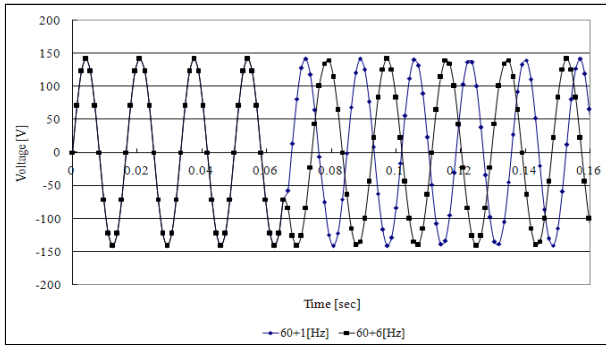
Fig. 7 Estimated frequency of user defined arbitrary signal

3.4 주파수 변동에 의한 성능 평가

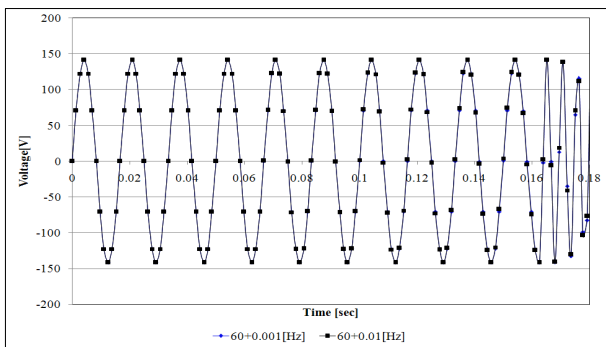
주파수가 증가하며 변동하는 경우 제시된 기법의 성능을 평가하였다. 그림 8(a)~(b)는 주파수가 정규 주파수에서 약 4주기(67[ms]) 이후에 0.01[Hz], 0.1[Hz], 1[Hz], 6[Hz]로 각각 증가 변동 시킨 시험신호이다. 그림 8(c)~(d)는 주파수가 정규 주파수에서 2주기씩 마다 0.001[Hz], 0.01[Hz], 0.1[Hz], 1[Hz]씩 증가하여 60.005[Hz], 60.05[Hz], 60.5[Hz], 65[Hz]로 각각 변동 시킨 시험신호이다. 그림 9(a)~(h)는 이때의 주파수 추정 결과이다.



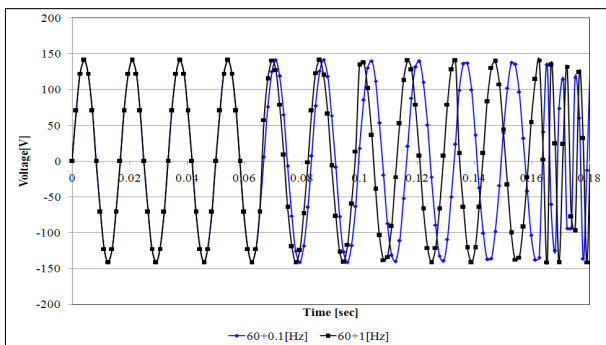
(a) 미소 주파수 변동 신호



(b) 큰 주파수 변동 신호



(c) 미소 주파수 단계 변동 신호



(d) 큰 주파수 단계 변동 신호

그림 8 주파수 변동 신호

Fig. 8 Test signal with magnitude change

그림 9(a)로부터 Method 1은 정상상태에서 2주기 동안 흔들리는 모습을 보인다. 0.01[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후 최대 0.004[Hz]로 흔들리다가 40샘플 이후에는 정규 주파수 60[Hz]를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 9(b)로부터 Method 1은 정상상태에서 2주기 동안 흔들리는 모습을 보인다. 0.1[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후 최대 0.004[Hz]로 2회 흔들리다가 50샘플 이후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 미소 주파수가 변동한 직후에도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 9(c)로부터 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 1은 정상상태에서 2주기 동안 흔들리는 모

습을 보인다. 1[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후 Method 1은 최대 0.004[Hz]로 흔들리다가 62샘플 이후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

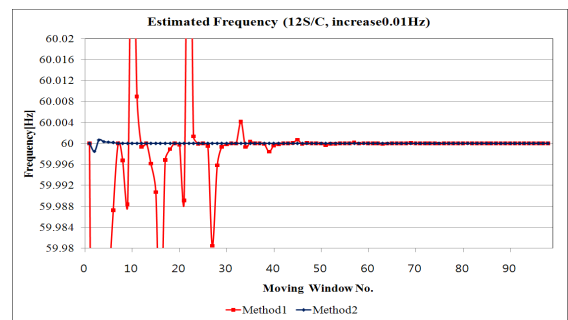
그림 9(d)로부터 Method 1은 정상상태에서는 2주기 동안 최대 0.05[Hz] 정도 흔들리는 것을 볼 수 있다. 6[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후에는 55샘플 이후에 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 9(e)로부터 Method 1은 측정 이후 한 주기 동안 최대 1[Hz] 흔들리는 모습을 보인다. 0.001[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후 최대 0.004[Hz]로 흔들리다가 40샘플 이후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

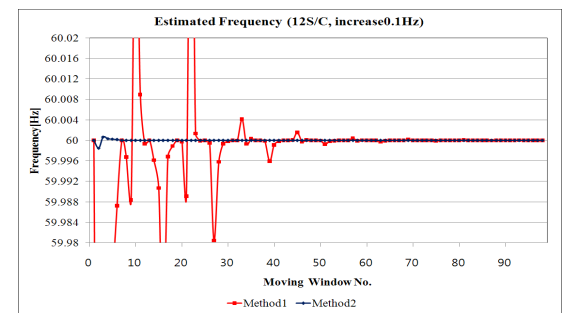
그림 9(f)로부터 Method 1은 정상상태에서 최대 0.1[Hz] 정도 흔들리다가 0.01[Hz]의 미소 주파수가 변동한 이후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 미소 주파수가 변동한 직후에도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 9(g)로부터 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 1은 정상상태에서 한 주기 동안 흔들리는 모습을 보인다. 0.1[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후 0.06[Hz], 0.04[Hz], 0.02[Hz]로 3번 흔들리다가 변동 이후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

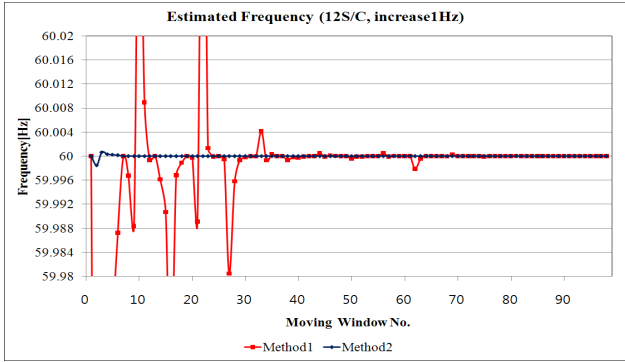
그림 9(h)로부터 Method 1은 정상상태에서는 0.06[Hz], 0.04[Hz] 정도로 2번 흔들리는 것을 볼 수 있다. 1[Hz]의 미소 주파수가 변동한 직후에는 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 반면 Method 2는 정상상태뿐만 아니라 변동된 신호에 대해서도 정규 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.



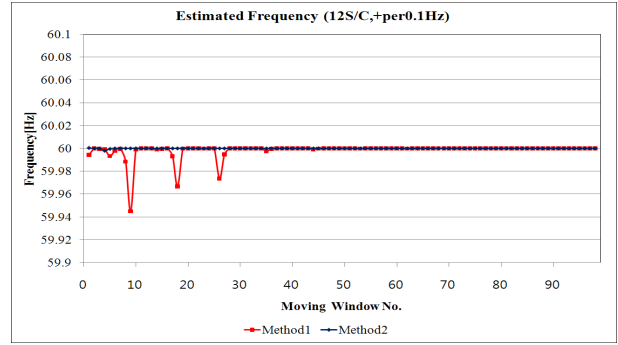
(a) 0.01[Hz] 증가



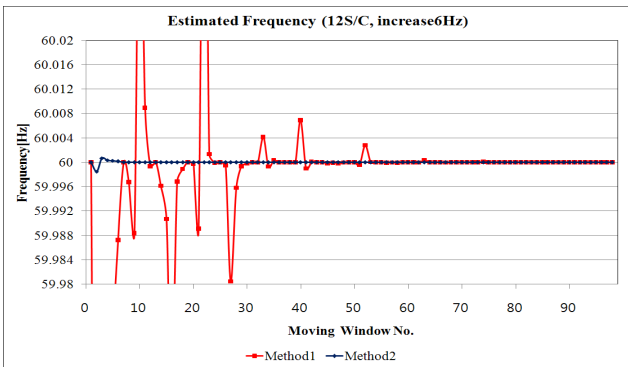
(b) 0.1[Hz] 증가



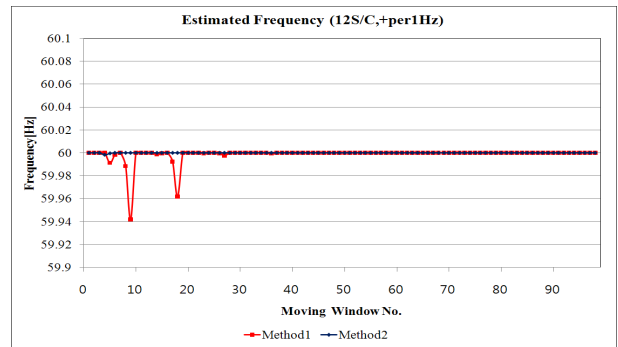
(c) 1[Hz] 증가



(g) 0.1[Hz] 증가

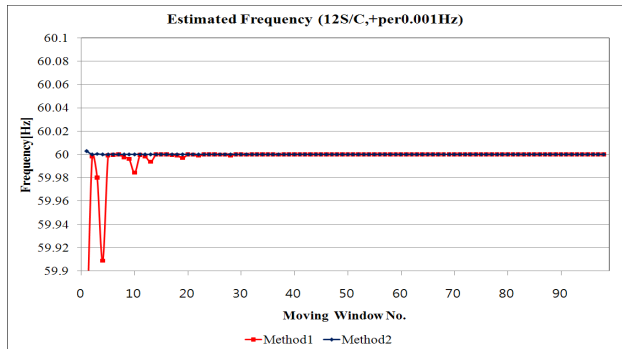


(d) 6[Hz] 증가

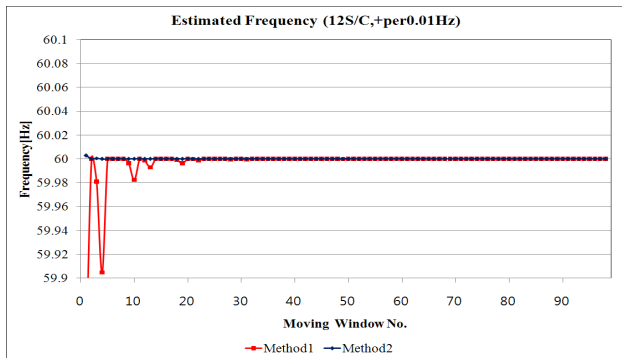


(h) 1[Hz] 증가

그림 9 주파수 변동의 주파수 추정 결과
Fig. 9 Estimated frequency of frequency change



(e) 0.001[Hz] 증가



(f) 0.01[Hz] 증가

4. 결 론

본 논문에서는 FDR에 적용할 RDWT에 의한 최적의 주파수 추정기법을 선정하고자 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 제시된 기법의 성능을 평가하기 위하여, EMTP-RV에 의한 국내 345kV 모델링 데이터와 사용자 정의 임의파형 및 주파수 변동 데이터가 활용되었다.

국내 실계통에 대한 발전기 탈락과 부하 차단 외란을 시뮬레이션한 결과, 측정지점이 고장지점으로부터 멀수록 주파수 진동경향이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 주파수 변동에 대한 시뮬레이션 결과, 주파수 변화량이 증가할수록 진동의 경향이 증가하고 지속기간이 길어짐을 알 수 있었다. 다양한 외란에 대한 주파수 추정 성능은 FRDWT에 의한 기법이 IRDWT에 의한 기법 보다 우수하였다. 또한 정상상태, 고조파가 포함된 경우와 주파수 변동 신호에 대해서는 FRDWT에 의한 기법이 IRDWT에 의한 기법 보다 우수한 주파수 추정 성능을 나타내는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] A.G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements ~ A Historical Overview", IEEE PES summer meeting pp. 476~479, 2002.
- [2] 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.
- [3] Young-Hwan Mun, Tae-Hyun Kim "Korean-area power system monitoring system (K-WAMS)", The final report and presentation, pp. 44~46, 2009.8.
- [4] 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.
- [5] Lei Wang, Richard W. Conners, Yilu Liu et al., "Frequency Disturbance Recorder Design and Developments", IEEE PES Summer Meeting, 2007.
- [6] Chul-Won Park, Junho Ko, Dong-Kwang Shin, Chul-Hwan Kim, Yoon Sang Kim, "A Development of Frequency Monitoring System based on Network", ICEE 2010 Conference, PS-PSIT-01, July 11~14, 2010.
- [7] Chul Won Park, Yoon Sang Kim, "A Monitoring System Development for a New-type of Korean FNET", International Symposium MEPS'10 P44.pdf, 2010.9.20~22.
- [8] Jason N. Bank, R. Matthew Gardner, Shu-Jen Steven Tsai, Kyung Soo Kook, and Yilu Liu, "Visualization of Wide-Area Frequency Measurement Information", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [9] G. Zhang, P. Hirsch, S. Lee, "Wide Area Frequency Visualization using Smart Client Technology", IEEE PES, 2007.
- [10] Chul Won Park, et al, "Development of Network Based Frequency Monitoring and Fault Prediction System for Wide Area Intelligent Relaying", 2008 Energy R&D projects, 2 year report, pp. 1~74, 2010.11.
- [11] 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.
- [12] C.W. Park, Y.S. Kim, "A Comparative Study of Frequency Estimation Techniques", IEEE T&D Asia Conference, PO13-4, Oct., 2009.
- [13] D. Hart, D. Novosel, Y. Hu, B. Smith, M. Egolf, "A New Frequency Tracking and Phasor Estimation Algorithm for Generator Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1064~1073, 1997.
- [14] Chul Won Park, Yoon Sang Kim, "Advanced Frequency Estimation Technique using Gain Compensation", International Symposium MEPS'10 Session 15, 15.1.pdf, 2010.9.20-22.
- [15] 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.
- [16] C. K. Jung, K. H. Kim, C. W. Ha, J. B. Lee, Y. W. Yoon, "Improvement of Digital Distance Relaying Algorithm Using Wavelet Transform in Combined Transmission Line", KIEE Trans, Vol. 52A, No. 10, pp. 593~602, 2003.10.
- [17] C. H. Kim, Y. H. Ko, "The Detection of Voltage Sag using Wavelet Transform", KIEE Trans, Vol. 49A, No. 9, pp. 425~432, 2000.9.
- [18] O. Ozgonenel, E. Arisoy, M.A.S.K Khan, M.A. Rahman, "A Wavelet Power Based Algorithm For Synchronous Generator Protection", IEEE PES Summer Meeting pp. 128~134. 2006.6.
- [19] Zhang Chuanli, et al., "A New Approach to Detect Transformer Inrush Current by Applying Wavelet Transform", IEEE POWERCON, pp. 1040~1044, 1998.
- [20] Diao-Yan Hua, Li-Chun Ming, Shang Yan, "Wavelet-Based Fault Diagnosis Scheme For Power System Relay Protection", Proceeding of the 7th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 2183~219, 112-15 July 2008.
- [21] Oinis Charri, et al., "WAVELETS : A New Tools for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1301~1308, July 1996.
- [22] Sukumar M. Brahma, Rajesh G. Kavasseri, "Investigating the Performance of Discrete Wavelet Transform for Phasor Estimation in Digital Relays", IEEE PES General Meeting 000348.pdf 2008.
- [23] J. Ren, M. Kezunovic, "Elimination of DC Offset in Accurate Phasor Estimation Using Recursive Wavelet Transform", IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th~July 2nd, 2009.
- [24] T. Lin, M. Tsuji, E. Yamada, "A Wavelet Approach to Real Time Estimation of Power System Frequency", PR0001/01/0000-1074, pp. 58~65, SICE 2001 July 25-27, 2001 Nagoya.
- [25] Xiang-ning Lin, Hai-feng Liu, "A Fast Recursive Wavelet Based Boundary Protection Scheme", in Proc. 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, pp. 722~727, June 2005.
- [26] M. Tsuji, S. Hamasaki, M. Korogi, "Characteristic of Power Series Type Wavelet Transform for Online Frequency Estimation", 1-4244-0844-X/07/\$20.00 2007

IEEE, pp. 177~182.

- [27] 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.
- [28] A. M. Gaouda, M. M. A. Salama, "DSP Wavelet-Based Tool for Monitoring Transformer Inrush Currents and Internal Faults", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1258~1267, July 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 강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 정교수.

Tel : 033-760-8786

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr



반우현 (潘禹顯)

1988년 9월 22일생. 2010년 국립강릉원주대학교 전기공학과 졸업. 2011년~현재 국립강릉원주대학교 대학원 전기공학과 전력IT연구실 석사과정.

Tel : 033-760-8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : b1w2h3@naver.com