

Frequency Estimation Technique using Recursive Discrete Wavelet Transform

박철원[†]
(Chul-Won Park)

Abstract - Power system frequency is the main index of power quality indicating an abnormal state and disturbances of systems. The nominal frequency is deviated by sudden change in generation and load or faults. Power system is used as frequency relay to detection for off-nominal frequency operation and connecting a generator to an electrical system, and V/F relay to detection for an over-excitation condition. Under these circumstances, power system should maintain the nominal frequency. And frequency and frequency deviation should accurately measure and quickly estimate by frequency measurement device. The well-known classical method, frequency estimation technique based on the DFT, could be produce the gain error in accuracy. To meet the requirements for high accuracy, recently Wavelet transforms and analysis are receiving new attention. The Wavelet analysis is possible to calculate the time-frequency analysis which is easy to obtain frequency information of signals. However, it is difficult to apply in real-time implementation because of heavy computation burdens. Nowadays, the computational methods using the Wavelet function and transformation techniques have been searched on these fields.

In this paper, we apply the Recursive Discrete Wavelet Transform (RDWT) for the frequency estimation. In order to evaluate performance of the proposed technique, the user-defined arbitrary waveforms are used.

Key Words : DFT, Frequency Estimation, Nominal Frequency, Recursive Discrete Wavelet Transform, Wavelet Function

1. 서 론

전력시스템 주파수는 계통의 비정상 상태와 외란을 나타내는 전력품질의 주요 성능지수이다[1]. 이는 일반적인 주파수 계전기용도 이외에 전력시스템에 대용량 집중전원 및 소규모 분산전원이 연계될 때 동기 검정 계전기(synchro check relay)와 발전기 및 소내 변압기의 과여자 상태를 감지하는 V/F 계전기에서도 사용된다[2,3]. 전력시스템에서 부하나 발전량이 갑작스럽게 변동하거나 사고가 발생하면 정규 주파수가 편이하게 된다. 이때 주파수 계측장치는 주파수 및 주파수 편이를 실시간으로 정확하고 신속하게 측정함으로써 정규 주파수(nominal frequency)를 유지시키는데 역할을 해야 하고 더 나아가 사고과급방지에 대한 책무를 수행해야 한다[4].

지난 20여년동안 전력시스템 주파수의 실시간 추정을 위한 다양한 기법들이 발전해왔다. IEEE PES는 발전소의 비정상 주파수 보호에 관한 IEEE Std C37.106-2003을 발표하였다[5]. 전압신호의 영점 통과 시간을 이용하는 영점 통과 검출기(zero crossing detector)의 단점을 보완하기 위한 대다수의 주파수 추정 기법들은 디지털 필터 알고리즘이 포함되어 선행처리를 하게 된다. 가장 보편적인 DFT 필터를 적용한 기법은 계산량이 적기 때문에 광범위하게 응용되었다[6~

10]. 그러나 이 기법은 주파수가 정규 값으로부터 벗어났을 때 오차가 발생되는데, 단점을 보완하기 위해 샘플링 간격 조정[11], 가변 데이터 윈도우[12], 채귀 직교필터의 정확한 이득[13]에 의한 피드백 루프에 기반을 둔 몇몇 적응 기법들이 제안되었다. 또 고정된 신호 모델에 근거한 확장된 칼만 필터[14]와 반복 최소 자승 알고리즘[15]을 포함한 비선형 곡선 근사 기법들은 기본 주파수 추정에 활용되었다. 이 기법의 정확성은 비선형 주기의 테일러급수 확장 때문에 정규 주파수 주변 좁은 범위 내에서만 제한되었다. 유전 알고리즘[16]과 신경 회로망[17]과 같은 인공 지능 기법들은 빠른 응답으로 광범위하게 정확한 주파수 추정을 달성하는데 사용될 수 있다. 그러나 이런 최적화 기법은 성능은 탁월하나 계산량이 복잡하여 실시간 구현이 용이하지 못했다.

최근 웨이브릿 변환(Wavelet Transform) 및 분석이 새로운 주목을 받고 있다. 고전적인 웨이브릿 분석은 시간-주파수 분석 계산이 가능하고 신호의 주파수 정보를 습득하는데 쉬우나 많은 계산량 때문에 실시간 적용에 어려움을 있었다[18,19]. 이에 웨이브릿 함수 및 변환에 대한 연구가 지속된 결과, 단일(single-direction) 반복 방정식 형태로 연산 부담이 적어 실시간 신호 처리에 적당한 반복 이산 웨이브릿 변환(RDWT:Recursive Discrete Wavelet Transform)이 제시되었다[20~24].

이에 본 논문에서는 RDWT에 의한 주파수 추정 기법을 제시하고자 한다. 2장에서는 웨이브릿 변환의 개념과 RDWT에 의한 주파수 추정 알고리즘을 소개한다. 3장에서는 제시된 기법의 성능 평가를 위한 사용자 정의 임의 신호에 의한 테스트를 기술하고, 4장에서는 결론을 요약하였다.

[†] 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수·공박

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 4월 5일

최종완료 : 2011년 4월 25일

2. RDWT에 의한 주파수 추정 기법

웨이브릿 변환의 정의는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 모 웨이브릿(Mother Wavelet) $\Psi(t)$ 는 진동하고 감쇠하는 함수이다.

$$W_{s,\Psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)^* dt \quad (1)$$

여기서, $S(t)$ 는 시간 의존 신호, $\Psi(t)$ 는 모 웨이브릿, $W_{s,\Psi}(a,b)$ 는 웨이브릿 변환 계수, a 와 b 는 각각 팽창(dilating) 지수와 시간이동(shifting) 지수이다.

웨이브릿 함수의 성능을 좌우하는 것은 적당한 모 웨이브릿 함수의 선택에 있다. 본 논문에서 선정된 모 웨이브릿 함수는 식(2)와 같다[22,23].

$$\Psi(t) = \left(\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} + \frac{\sigma^5 t^5}{15} \right) e^{(-\sigma + i w_0)t} u(t) \quad (2)$$

모 웨이브릿의 푸리에 변환은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

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

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

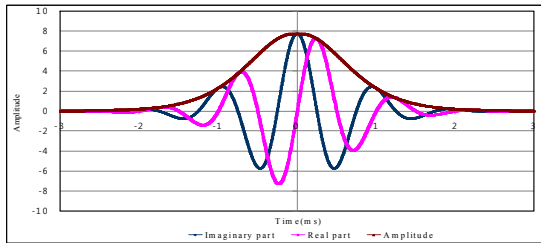


그림 1 모 웨이브릿 변환의 특성
Fig. 1 Characteristics of mother wavelet transform

웨이브릿 변환의 이산 형태는 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서, T 는 샘플링 주기이고, k 와 n 는 정수이며 $f = \frac{1}{a}$ 이다.

$$\begin{aligned} W_{s,\Psi}(f, kT) &= \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT)\Psi^*(f(nT-kT)) \quad (4) \\ &= \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT)\Psi_1(f(nT-kT)) \end{aligned}$$

z -변환을 사용하면, 식(4)는 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{s,\Psi}(Z) = T\sqrt{f} \sum_{n=1}^{\infty} [S(Z) \cdot \Psi_1(Z)] \quad (5)$$

여기서, $W_{s,\Psi}(Z)$ 는 $W_{s,\Psi}(f, kT)$ 의 z -변환 시퀀스이고, $S(Z)$ 는 $S(nT)$ 의 z -변환 시퀀스, $\Psi_1(Z)$ 는 $\Psi_1(fnT)$ 의 z -변환 시퀀스이다. $\Psi_1(fnT)$ 의 z -변환 시퀀스는 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, $\alpha = e^{-f\Delta T(\sigma - jw_0)}$

$$\delta_1 = \alpha[(\sigma f\Delta T)^3/3 - (\sigma f\Delta T)^4/6 + (\sigma f\Delta T)^5/15]$$

$$\delta_2 = \alpha^2[2(\sigma f\Delta T)^3/3 - 5(\sigma f\Delta T)^4/3 + 26(\sigma f\Delta T)^5/15]$$

$$\delta_3 = \alpha^3[-6(\sigma f\Delta T)^3/3 + 22(\sigma f\Delta T)^5/5]$$

$$\delta_4 = \alpha^4[2(\sigma f\Delta T)^3/3 + 5(\sigma f\Delta T)^4/3 + 26(\sigma f\Delta T)^5/15]$$

$$\delta_5 = \alpha^5[(\sigma f\Delta T)^3/3 + (\sigma f\Delta T)^4/6 + (\sigma f\Delta T)^5/15]$$

$$\lambda_1 = -6\alpha, \lambda_2 = 15\alpha^2, \lambda_3 = -20\alpha^3, \lambda_4 = 15\alpha^4, \lambda_5 = -6\alpha^5, \lambda_6 = \alpha^6$$

따라서 식(7)을 식(5)에 대입해서 식(8)을 얻을 수 있다.

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

z -변환의 변위특성(displacement characteristics)에 따라 RDWT는 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

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

식(9)는 단지 과거의 데이터만을 활용하기 때문에 웨이브릿 계수는 실시간으로 구현 가능하게 된다.

결과적으로 계수 $E(k)$, 상차각 $\Theta(k)$ 으로부터 식(12)과 같이 추정 주파수 $f(k)$ 는 계산될 수 있다.

$$E(k) = W_{s,\Psi}(kT) / s(k) \quad (10)$$

$$\Theta(k) = \tan^{-1} \left(\frac{E(k+1) - E(k)}{\Delta T} \right) \quad (11)$$

$$f(k) = \left(\frac{w_0}{a} - \frac{\Theta(k+1) - \Theta(k)}{\Delta T} \right) / 2\pi \quad (12)$$

추정 오차 E_m 는 식(13)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, f_e 는 추정된 주파수이다.

$$E_m = \frac{|f_e - f|}{f} \times 100\% \quad (13)$$

그림 2는 본 논문에서 제안된 RDWT를 이용한 주파수 추정 기법의 흐름도이다. 전압신호를 수집 한 후, 모 웨이브릿이 선택되면 z-변환을 이용하여 식(9)과 같이 차분방정식의 형태로부터 RDWT의 계수를 구한 다음, 최종적으로 주파수를 계산하게 된다.

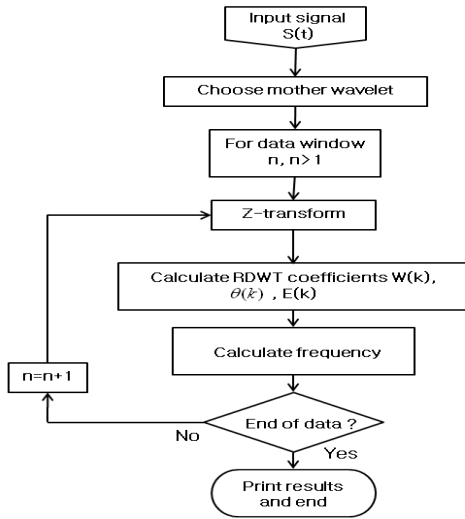
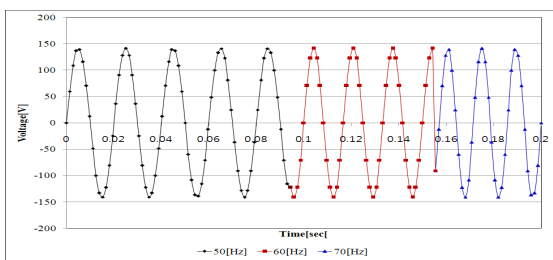


그림 2 주파수 추정 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of the frequency estimation algorithm

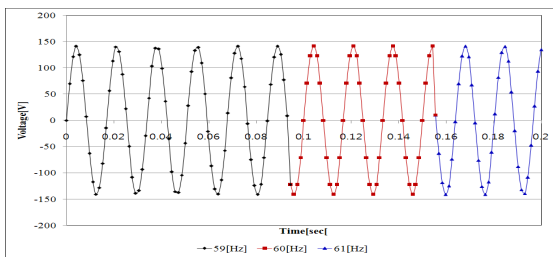
3. 사례연구

3.1 주파수 변동에 대한 테스트

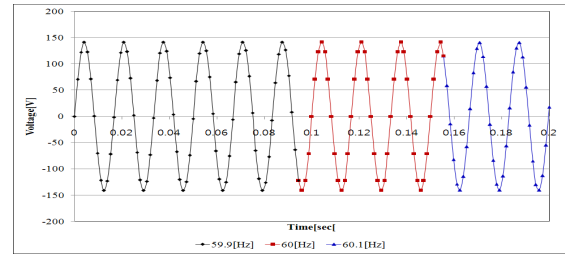
기본 주파수 60[Hz]를 기준으로 각각 10[Hz], 1[Hz], 0.1[Hz]씩 증가하거나 감소하며 변동하는 경우에 대해 제시된 기법의 성능을 평가하였다. 그림 3은 테스트에 사용된 주파수 변동 신호이다. 그림 3(a)는 주파수가 10[Hz]씩 크게 변동하는 신호이고, 그림 3(b)는 주파수가 1[Hz]씩 변동하는



(a) 50[Hz] ~ 60[Hz] ~ 70[Hz] 변동



(b) 59[Hz] ~ 60[Hz] ~ 61[Hz] 변동

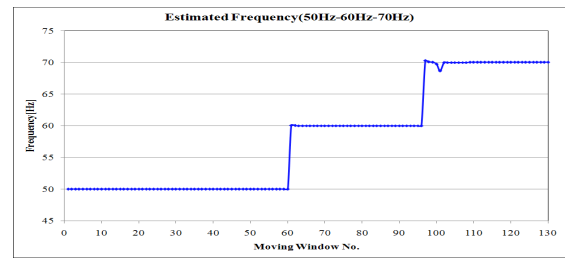


(c) 59.9[Hz] ~ 60[Hz] ~ 60.1[Hz] 변동

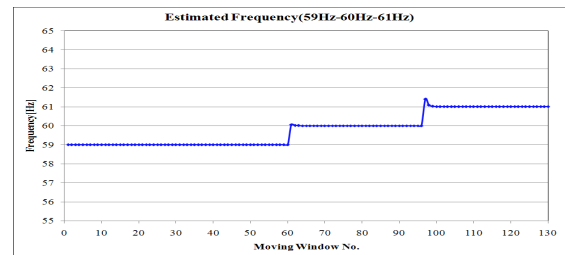
그림 3 주파수 변동 신호
Fig. 3 Test signal with magnitude change

신호이고, 그림 3(c)는 주파수가 0.1[Hz]씩 작게 변동하는 신호이다. 이때 정규 주파수를 중심으로 -10[Hz], -1[Hz], -0.1[Hz]씩 변동 시킨 신호의 기간은 5주기로 설정하였고, +10[Hz], +1[Hz], +0.1[Hz] 변동 시킨 신호는 3주기로 설정하여 신호를 합성하였다.

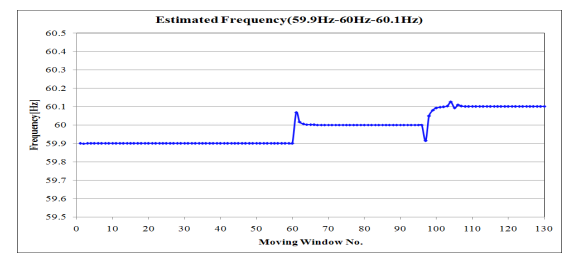
그림 4는 주파수 변동 신호에 대한 제시된 알고리즘의 주파수 추정 결과이다. 그림 4(a)로부터 50[Hz]에서 60[Hz]로 변동하는 시점에서 추정된 주파수는 아주 미소하게 흔들리는 것을 알 수 있다. 반면에 기본 주파수에서 70[Hz]로 변동하는



(a) 50[Hz] ~ 60[Hz] ~ 70[Hz] 변동



(b) 59[Hz] ~ 60[Hz] ~ 61[Hz] 변동



(c) 59.9[Hz] ~ 60[Hz] ~ 60.1[Hz] 변동

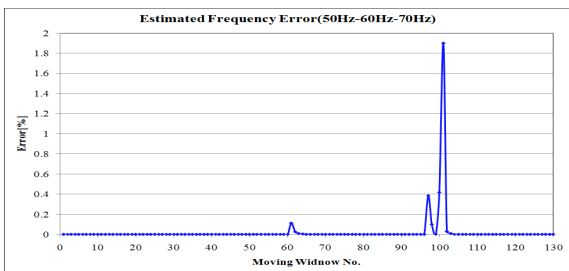
그림 4 주파수 변동의 주파수 추정 결과
Fig. 4 Estimated frequency of frequency change

시점에서는 약 2[Hz] 정도 오차가 발생되었다가 변동된 주파수 70[Hz]를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

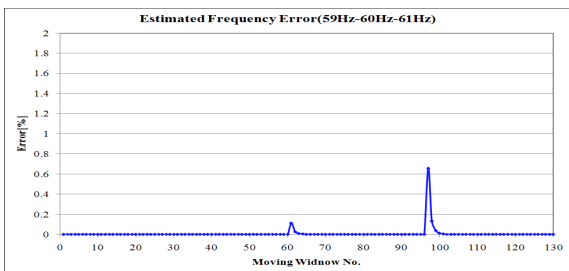
그림 4(b)로부터 59[Hz]에서 60[Hz]로 변동하는 시점에서의 추정된 주파수는 약 0.2[Hz] 정도 흔들리는 것을 알 수 있다. 그에 반해 기본 주파수에서 61[Hz]로 변동하는 시점에서는 약 0.6[Hz] 정도 오차가 증가하였다가 변동된 주파수 61[Hz]를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 4(c)로부터 59.9[Hz]에서 60[Hz]로 변동하는 시점에서의 추정된 주파수는 약 0.05[Hz] 정도 증가하였다가 안정화되는 것을 알 수 있다. 반면에 기본 주파수에서 60.1[Hz]로 변동하는 시점에서는 0.1[Hz] 정도 감소하였다가 변동된 주파수 60.1[Hz]를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

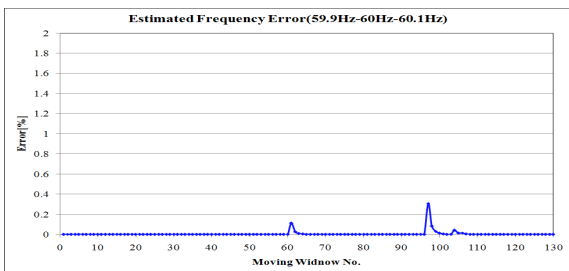
그림 5는 주파수 추정 결과에 대한 추정 오차이다. 그림 5(a)~(c)로부터 기본파를 기준으로 그 이하로 변동하는 경우에는 약 0.1[Hz] 정도의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면에 기본파를 기준으로 그 이상으로 변동하는 경우에는 변동 폭이 클수록 주파수 추정 오차도 증가함을 알 수 있다. 주파수 변동 신호에 의한 테스트 결과 추정 오차는 주파수 변동 직후에 크게 발생되며, 주파수 변동 폭이 커질수록 그에 따른 오차도 증가하는 것을 알 수 있었다.



(a) 50[Hz]~60[Hz]~70[Hz] 변동



(b) 59[Hz]~60[Hz]~61[Hz] 변동



(c) 59.9[Hz]~60[Hz]~60.1[Hz] 변동

그림 5 주파수 변동의 주파수 추정 결과 오차
Fig. 5 Estimated frequency error of frequency change

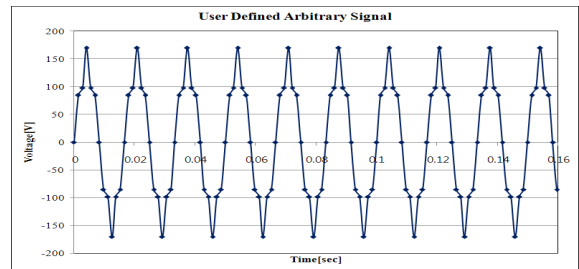
3.2 사용자 정의 임의 신호에 의한 테스트

3.2.1 고조파 함유

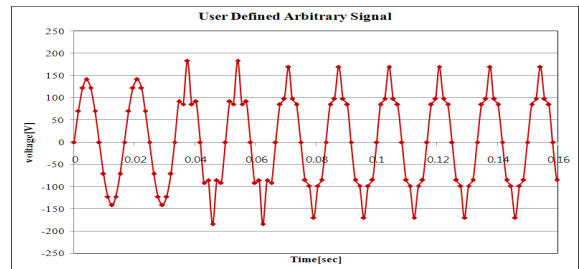
제시된 추정 기법의 성능을 평가하기 위해서 식(14)와 같이 정규 주파수 60[Hz]를 기반으로 5고조파가 30%, 7고조파가 10%로 함유된 사용자 정의 임의 신호를 생성하여 테스트를 수행하였다.

$$x(t) = \sin\omega t + 0.3\sin 5\omega t + 0.1\sin 7\omega t \quad (14)$$

그림 6(a)는 식(14)를 그대로 적용한 완전합성 시험 신호이고, 그림 6(b)는 기본파 신호에서 1주기(0.138889[sec])이후에 5고조파를 합성하고 3주기(0.416667[sec])이후에 7고조파를 함유시킨 순차합성 시험 신호이다.



(a) 완전합성

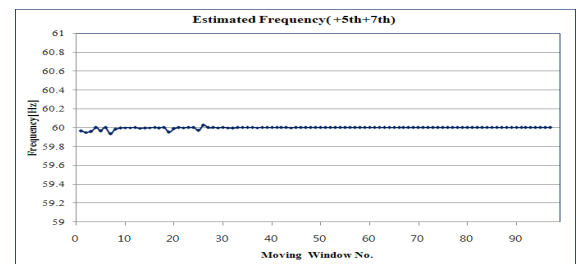


(b) 순차합성

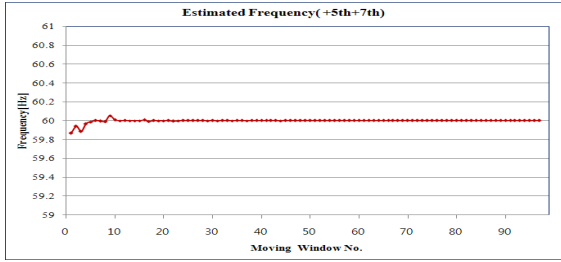
그림 6 사용자 정의 임의 신호

Fig. 6 Test signal with user defined arbitrary signal

그림 7은 사용자 정의 임의 신호에 대한 제시된 알고리즘의 주파수 추정 결과이다. 처음부터 고조파를 합성한 신호와 고조파를 순차적으로 합성한 신호에 대해 테스트를 실시하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 RDWT에 의한 주파수 추정 기법은 고조파가 함유된 경우에 추정 초기에만 약 ±0.15[Hz] 정도의 오차를 나타낼 뿐 우수한 주파수 추정 성능을 나타내었다.



(a) 완전합성



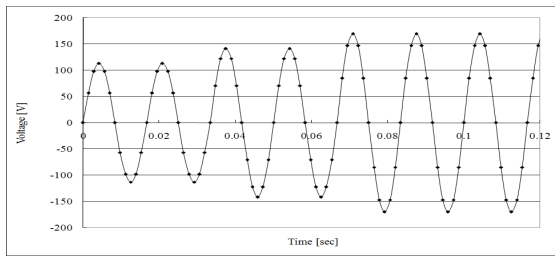
(b) 순차합성

그림 7 사용자 정의 임의의 신호에 대한 주파수 추정 결과
Fig. 7 Estimated frequency of user defined arbitrary signal

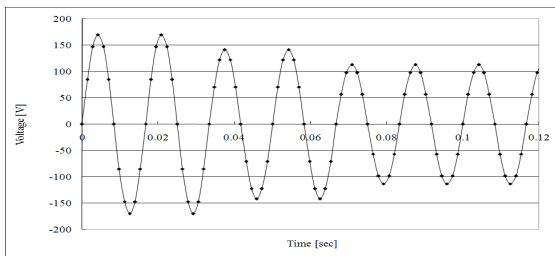
3.2.2 크기 변동

그림 8은 크기를 변화 시킨 시험 신호이다. 그림 8과 같이 정현파를 중심으로 크기를 0.8[pu]~1.0[pu]~1.2[pu]로 약 2주기마다 증가하도록 선정한 시험 신호와 크기를 1.2[pu]~1.0[pu]~0.8[pu]로 약 2주기마다 감소하도록 변동시킨 사용자 정의 임의의 시험 신호이다. 그림 9는 제안된 기법의 주파수 추정 결과이다.

그림 9(a), 9(b)로부터 제시된 기법은 최대 ±0.1[Hz]의 추정 오차를 나타내며 정확하게 주파수를 추정하고 있는 것을 알 수

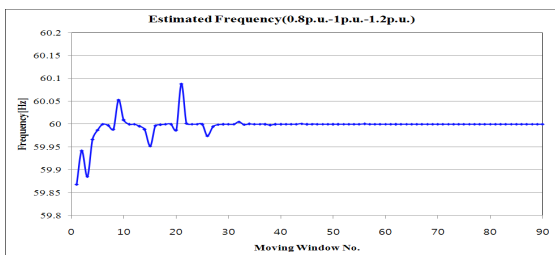


(a) 크기가 증가하는 경우

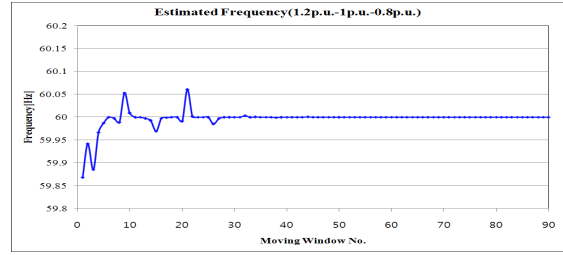


(b) 크기가 감소하는 경우

그림 8 크기를 변화시킨 시험 신호
Fig. 8 Test signal of magnitude change



(a) 크기가 증가하는 경우



(b) 크기가 감소하는 경우

그림 9 크기를 변화시킨 경우 추정된 주파수
Fig. 9 Estimated frequency of magnitude change

있다. 그림 9로부터 크기가 감소하는 경우가 크기가 증가하는 경우보다 추정된 주파수의 진동이 다소 심한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 웨이브렛 분석의 실시간 적용시 단점을 보완하기 위해 단일 반복 방정식 형태로 연산 부담을 감소시켜 실시간 신호 처리에 적당한 RDWT을 이용한 주파수 추정 기법을 제안하였다. 주파수 변동 신호와 사용자 정의 임의의 신호를 활용하여 제시된 기법의 성능을 평가하였다. 주파수 변동 신호에 의한 테스트 결과, 기본파를 기준으로 변동 폭이 감소할수록 그에 따른 주파수 추정 오차도 감소하는 것을 알 수 있었다. 또 제시된 기법은 고조파가 함유된 경우와 크기가 변동하는 경우에도 큰 무리 없이 우수한 주파수 추정 성능을 나타내었다. 전반적으로 제시된 기법은 빠른 응답 특성과 광범위한 주파수 편차 이상에서도 정확한 주파수 추정 성능을 나타내었다. 따라서 고속의 정확성을 필요로 하는 주파수 계측 장치에 그 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2010T100100415)

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, 2 year report, pp. 1~74, 2010.11.
[2] Richard A. Evans, "A Manual/Automatic Synchronization Circuit for a 37.5-MVA Steam-Turbine-Driven Generator", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 6, pp. 1081~1085, Nov./Dec. 1990.
[3] Tevfik Sezgi, "A New Method for Measuring Power System Frequency", 0-7803-5515-6/99 pp. 400~405, 1999 IEEE.

- [4] Chul Won Park, "Development of Prototype Multifunction IED for Internal Fault Protection of Large Generator", 2010 Energy R&D projects, proposal, pp. 1~44, 2010.6.
- [5] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants (C37.106-2003)", pp. 1~41, 2003.
- [6] Young-Hwan Mun, Tae-Hyun Kim "Korean-area power system monitoring system (K-WAMS)", The final report and presentation, pp. 44~46, 2009.8.
- [7] C.W. Park, Y.S. Kim, "A Comparative Study of Frequency Estimation Techniques", IEEE T&D Asia Conference, PO13-4, Oct., 2009.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T.S. Sidhu, M. S. Sachdev, "An Iterative Technique for Fast and Accurate Measurement of Power System Frequency", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 109~11, 1998.
- [12] 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.
- [13] 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, Sep. 1994.
- [14] A.A. Girgis, W. L. Peterson, "Adaptive Estimation of Power System Frequency Deviation and Its Rate of Change for Calculating Sudden Power System Overloads", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 585~594, 1990.
- [15] I. Kamwa, R. Grondin, "Fast Adaptive Schemes for Tracking Voltage Phasor and Local frequency in Power Transmission and Distribution Systems", IEEE PES T&D Conference, pp. 930~936, Dallas, TX, 1991.
- [16] K. M. El-Naggar, H. K. M. Youssef, "A Generic Based Algorithm for Frequency Relaying Applications", Electric Power Systems Research, Vol. 55, No. 3, pp. 173~178, 2000.
- [17] L. L. Lai, W. L. Chen, "Real Time Frequency and Harmonic Evaluation Using Artificial Networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 52~57, 1999.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Oinís 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.
- [21] Zhang Chuanli, et al., "A New Approach to Detect Transformer Inrush Current by Applying Wavelet Transform", IEEE POWERCON, pp. 1040~1044, 1998.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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(공학박사). 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 정교수.

Tel : 033-760-8786

Lab : 033-760-8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr