

순간주파수를 이용한 전력선 신호의 이상현상검출

論 文

55A-12-6

Detection of Anomalies on the Power Line using the Instantaneous Frequencies

林 炳 寬[†]

(Byeong-Gwan Iem)

Abstract - The instantaneous frequency gives a frequency value at a time instance. Thus, it is natural to use the instantaneous frequency for detecting disturbances of voltage signal in power line. Various instantaneous frequency estimators are introduced. By applying to different types of disturbed signals, we show the estimators' ability to classify flickers. Also, the computational costs are compared between different instantaneous frequency estimators. The Prony's method (PRONY) and the modified covariance method (MCOV) need relatively smaller amount of calculation than the Teager-Kaiser energy operator based estimator (DESA II). For an AM-FM modulated signal, the tracking performance of different instantaneous frequency estimators is also compared. Through simulation, it is shown that MCOV produces less variant frequency estimation values than DESA II and PRONY method.

Key Words : Flicker, Voltage disturbance, Instantaneous frequency, 순간주파수

1. 서 론

전력선상에서의 신호의 이상현상 검출은 최근에 주목받아 온 연구분야이다 [1]-[5]. 전력선상에서의 신호의 이상현상은 형태에 따라 축소된 파형 (sagged signal), 신호의 끝이 평탄화된 파형 (flat topped), 고조파 왜곡성분이 첨가된 파형 (harmonic distorted signal) 등으로 생각할 수 있다 [4]. 이러한 이상현상에 대한 다양한 검출방법이 보고되어 왔다. 예를 들어 FFT를 이용한 방법 [5], 그리고 비교적 최근에 소개된 시간주파수 분석법을 이용한 방법으로 스펙트로그램을 이용한 방법과 웨이블릿 변환을 이용한 방법을 들 수 있다 [3,4]. 이러한 방법들은 검출 성능 면에서 탁월하지만, 2차원 변환을 이용하기 때문에 많은 계산량을 필요로 한다.

시간주파수 분석법에 기초한 기존의 이상현상 검출방법이 막대한 계산량을 필요로 함을 고려할 때, 순간주파수 추정법이 시간주파수 분석법에 대한 매력적인 대안이 될 것이다. 전력선상의 신호가 기본적으로 단일주파수를 갖는 완벽한 정현파임을 고려하면, 정상상태에서 단일한 주파수를 출력으로 하는 기본주파수 검출기가 이상현상을 추출할 수 있는 방안이 될 것이다. 최근 들어 이러한 순간주파수를 이상현상검출기로 이용하는 결과가 보고되었다[1,2]. 즉, 실신호를 힐베르트(Hilbert) 변환한 후에 고전적인 순간주파수를 이용하는 방법이 제안되었다 [1]. 아울러 Teager-Kaiser 에너지 함수에 기반한 순간주파수 추정기를 이용한 예도 보고되

었다 [1,2].

본 논문에서는, 다양한 순간주파수 추정기를 이상현상검출기로서 제안한다. 본 논문에서 사용하는 순간주파수 추정기는 Teager-Kaiser 함수를 이용한 순간주파수 검출기와 형태가 유사하지만, 배경 원리는 좀더 일반적인 차동에너지 오퍼레이터(differential energy operator)에 기반한다 [6,10,11]. 계산량에 있어서도 Teager-Kaiser 함수를 이용한 순간주파수 검출기보다 저렴하다. 이러한 순간주파수 추정기는 전력선상의 신호에서 발생하는 이상현상의 종류 별로 다양한 출력형태를 보인다. 따라서, 순간주파수 추정기의 출력 형태에 따라 이상현상을 분류할 수 있다. 본 논문은 다음과 같이 이뤄져 있다. 2절에서는 에너지 함수에 기반한 다양한 순간주파수 추정기의 정의를 소개한다. 또한 각 순간주파수 추정기의 계산량을 비교한다. 3절에서는 다양한 이상현상의 정의와 파형을 소개한다. 아울러 이들 이상현상에 대한 순간주파수 추정기의 출력을 비교하여 추정기가 이상현상의 분류에 이용될 수 있음을 보인다. 4절과 5절에서는 모의시험을 통하여 각 순간주파수 추정기의 성능을 비교하며 결론을 맺는다.

2. 순간 주파수 추정기

순간주파수는 어떤 한 순간에 특정한 주파수 값을 나타내는 시간의 함수로서 주파수를 말한다. 응용 분야에 따라 다양한 순간주파수 함수가 소개되어 왔다. 대표적인 예를 소개하면 다음과 같다.

2.1 고전적인 순간주파수

고전적인 정의는 신호의 위상을 시간에 대하여 미분을 취하는 것이다 [7]. 이러한 정의의 타당성을 복소 정현파 신호

[†] 교신저자, 正會員 : 江陵大 工大 電子工學科 助教授 · 工博
E-mail : ibg@kangnung.ac.kr

接受日字 : 2006年 9月 14日

最終完了 : 2006年 10月 20日

의 위상과 주파수 사이의 관계에서 볼 수 있다. 만약 신호가 실수 값을 갖는다면, 신호는 먼저 힐베르트 변환되어, 위상 값을 얻은 후에 미분을 취하여 순간주파수를 구한다. 즉 실신호 $x(t)$ 에 대하여 복소신호 $x_a(t)$ 는 아래와 같다

$$x_a(t) = x(t) + jH\{x(t)\} = a(t)e^{j\phi(t)}$$

여기에서 $x_a(t)$ 는 $x(t)$ 의 복소신호, $H\{x(t)\}$ 는 $x(t)$ 의 힐베르트 변환, $a(t)$ 는 $x_a(t)$ 의 진폭신호, $\phi(t)$ 는 $x_a(t)$ 의 위상신호이다. 순간주파수 $f(t)$ 는 위상의 미분이므로 $f(t) = d\phi(t)/dt$ 로 정의한다 [7]. 이산신호에 대하여는 미분을 차동으로 대체하여 다음과 같이 이산 순간주파수가 정의된다 $f[n] = (\phi[n+1] - \phi[n-1])/2\pi$ [7]. 이러한 순간주파수는 실신호에 대하여 힐베르트 변환을 필요로 하기 때문에 다음에 소개하는 순간주파수 정의에 비하여 상대적으로 많은 계산량을 요구한다.

2.2 Teager-Kaiser 에너지 함수를 이용한 순간주파수

Teager의 에너지 함수는 다음과 같이 정의된다. $\Psi\{x(t)\} = (x'(t))^2 - x(t)x''(t)$. 위의 에너지 함수를 이용하면 진동파형을 발생시키는데 필요한 에너지를 구할 수 있다[8]. 이산신호 $x[n]$ 에 대하여 Teager의 에너지 함수는 다음과 같이 정의된다 [8].

$$\Psi\{x[n]\} = x^2[n] - x[n+1]x[n-1]$$

위의 에너지함수는 Teager-Kaiser에너지함수라고 불리며, 음성신호의 포먼트를 분석하는데 유용하며, AM-FM 신호의 진폭과 주파수 성분을 분리하는데 활용된다 [8,9]. Teager-Kaiser 에너지함수를 활용한 순간주파수 $f[n]$ 은 다음과 같이 정의된다 [9].

$$f[n] \approx \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Psi\{y[n]\} + \Psi\{y[n+1]\}}{4\Psi\{x[n]\}} \right) \quad (1)$$

여기에서 $y[n] = x[n] - x[n-1]$. 위의 순간주파수 추정기를 DESA(Discrete Energy Separation Algorithm) I 순간주파수라고 한다 [9]. Teager-Kaiser에너지 함수에 기반한 또 다른 순간주파수는 다음과 같이 정의되며 DESA II 순간주파수라고 한다 [9].

$$f[n] \approx \frac{1}{4\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Psi\{x[n+1] - x[n-1]\}}{2\Psi\{x[n]\}} \right) \quad (2)$$

이러한 순간주파수 검출기는 전압신호에서의 순간적인 이상현상을 검출하는데 사용되었으며, 고전적인 순간주파수 추정기와 비교되었다 [1].

2.3 Prony방법에 기반한 순간주파수

순간주파수는 선형예측문제에 해로부터 구할 수 있으며, 선형예측해법의 한 방법인 Prony방법에 의해서 순간주파수(Prony)를 다음과 같이 정의할 수 있다 [6].

$$f[n] \approx \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma_3\{x[n]\} + \Gamma_3\{x[n+1]\}}{4\Psi\{x[n+1]\}} \right) \quad (3)$$

$\Gamma_k\{x[n]\} = x[n]x[n+k-2] - x[n-1]x[n+k-1]$ 는 k차의 차동에너지 함수이다 [10]. k=2일 때, 이 함수는

Teager-Kaiser 에너지 함수와 같다. 즉, $\Gamma_2\{x[n]\} = \Psi\{x[n]\}$.

Prony방법에 기초한 순간주파수 추정기는 n이라는 순간에 하나의 순간주파수를 얻기 위하여 (n-1)에서 (n+2)까지 4개의 데이터 표본을 필요로 한다. Prony방법에 기초한 순간주파수 추정기는 본 논문에서 소개하는 다른 순간주파수 추정기에 비하여 작은 수의 데이터를 사용한다. 결과로서 계산량을 줄일 수 있지만 순간주파수 추정값의 분산이 클 수 있다. 만일 256개의 의사 무작위 패턴이 가해졌을 때, 66개의 결정 패턴만을 가하면 고장 검출률 100%를 보장할 수 있다.

2.4 Modified covariance 방법에 기초한 순간주파수

선형예측문제의 또 다른 해법인 modified covariance 방법에 기초하여 순간주파수(MCOV)를 구할 수 있으며 다음과 같다 [6].

$$f[n] \approx \frac{\cos^{-1} \left(\frac{N\{x[n]\}}{2(x^2[n-1] + x^2[n] + x^2[n+1])} \right)}{2\pi}$$

여기에서 $N\{x[n]\} = x[n-2]x[n-1] + 2x[n-1] \cdot x[n] + 2x[n]x[n+1] + x[n+1]x[n+2]$ 이다.

위식에서 볼 수 있듯이 순간주파수 추정기는 5개의 연속적인 데이터 표본을 필요로 한다. 아래의 표 1은 각각의 순간주파수 추정기를 계산하는데 필요한 계산량과 데이터 표본의 수를 보인다.

표 1 순간주파수 추정기의 계산량 비교

Table 1 Computation cost comparison of instantaneous frequency estimators

방법	덧셈	곱셈	데이터표본수
DESA I	7	7	5
DESA II	6	9	5
MCOV	5	8	5
PRONY	4	7	4

MCOV와 Prony 순간주파수 추정기가 기존의 DESA I과 II 순간주파수 추정기에 비하여 적은 계산량을 필요로 한다. 특히 Prony방법에 기초한 순간 주파수 추정기는 적은 데이터 표본수를 요구한다.

3. 이상현상의 종류와 순간주파수

이절에서는 전력선상에서 발생할 수 있는 다양한 이상현상의 종류를 소개한다. 이들 다양한 이상현상에 대하여 순간주파수는 다른 형태의 출력을 보이며, 따라서 순간주파수가 이상현상의 분류기로 사용될 수 있음을 보인다. 그림상의 모든 신호는 0.1초에서 0.3초까지를 보인다. 모든 이상현상은 0.15초 순간에 시작되어 0.235초 순간에 종료된다.

3.1 Sag and Swell Signal

Sag 혹은 swell은 주파수의 변화는 없이 일시적인 진폭

의 감소 혹은 증가를 말한다. 따라서, 이러한 이상현상이 시작될 때와 끝날때를 제외하고는 순간주파수는 정상상태에서와 같은 값을 보일 것이다. 그림 1은 정상치에서 일시적으로 5% 감소된 값을 갖는 sag현상을 갖는 신호를 보인다. 그림 1의 (b), (c), (d)는 Prony방법, MCOV방법, 그리고 DESA I방법에 따른 순간주파수 추정기로 신호를 처리한 결과를 보인다. 예상과 같이 세 방법 모두 시작시간(0.15초)과 종료시간(0.235초)을 제외한 전 시간구간에 걸쳐 60Hz의 순간주파수를 보이고 있다.

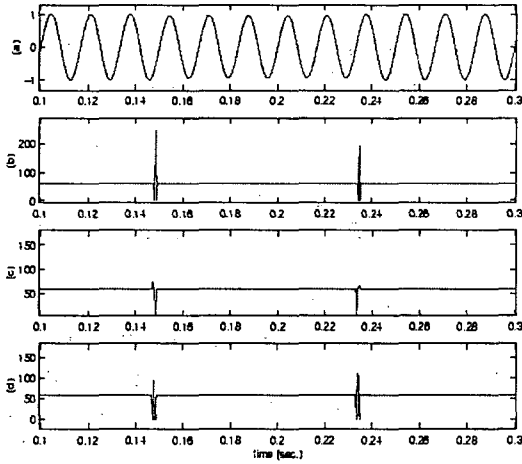


그림 1 Sag 신호의 순간주파수 분석 (a) Sag 신호 (b) Prony (c) MCOV (d) DESA II

Fig. 1 Instantaneous frequency analysis of sag signal (a) sag signal (b) Prony's method (c) MCOV (d) DESA II

3.2 Flat top signal

신호가 일시적으로 평탄한 파형을 보일 수도 있다. 이와 같은 신호를 flat top신호라고 하며 그림 2와 같다. 순간주파수는 평탄한 구간에서 주기적으로 이상패턴을 보일 것이며, 그사이의 정상적인 구간에서는 정상값을 보일 것이다. 그림 2의 (b), (c), (d)는 이러한 결과를 보인다. 그림에서, 평탄화는 최대 진폭의 95%값에서 발생하는 것으로 가정한다.

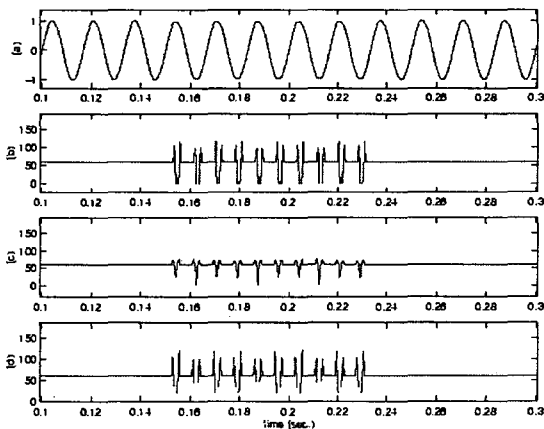


그림 2 Flattop 신호의 순간주파수 분석 (a) Flattop 신호 (b) Prony (c) MCOV (d) DESA II

Fig. 2 Instantaneous frequency analysis of flattop signal (a) flattop signal (b) Prony method (c) MCOV (d) DESA II

3.3 Harmonic distorted Signal

신호에 고조파성분이 추가되면 신호는 여러 가지 주파수 성분을 갖게 된다. 순간주파수는 정의에 따라 한 순간에 하나의 주파수 값을 출력하는데, 신호는 여러 성분의 주파수로 구성되므로, 순간주파수 값은 복잡한 값을 갖게 된다. 그림 3은 이와 같은 결과를 보여준다. 그림 3. (a)는 60Hz의 순수한 정현파가 0.15초에서 0.235초 구간에서 고조파 성분으로 왜곡됨을 보여준다. 고조파성분은 300Hz와 420Hz 성분으로 이루어져 있으며, 진폭은 각각 60Hz 성분의 9%와 5%이다. 고조파성분의 진폭이 60Hz성분에 비교해서 매우 작기 때문에, 그림 3 (a)의 신호파형에서는 미세한 변화를 보기가 쉽지 않다. 하지만 순간주파수 결과 (b), (c), (d)는 복잡한 파형을 출력하여, 0.15초에서 0.235초 구간에서 신호가 단일 성분이 아님을 보여주고 있다.

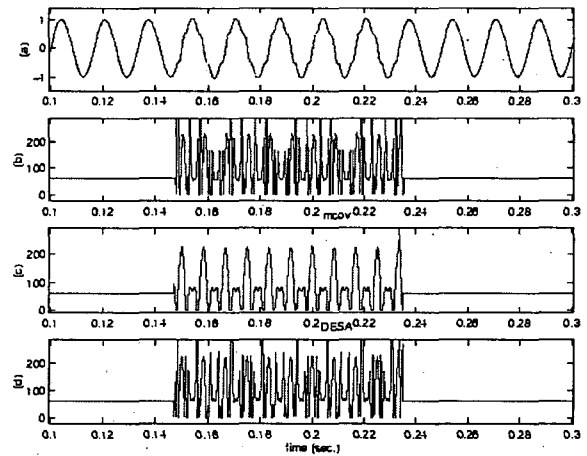


그림 3 고조파왜곡 신호의 순간주파수 분석 (a) 고조파왜곡 신호 (b) Prony (c) MCOV (d) DESA II

Fig. 3 Instantaneous frequency analysis of a signal with harmonics (a) harmonic distorted signal (b) Prony's method (c) MCOV (d) DESA II

앞의 세가지 예에서 전력선상 신호에 발생하는 이상현상의 종류에 따라 순간주파수는 다른 형태의 패턴을 출력함을 알 수 있다. 따라서 순간주파수의 형태에 따라 이상현상을 분류할 수 있을 것이다. 아울러, 동일한 신호에 적용된 세가지 방법을 비교하면, modified covariance방법을 이용한 순간 주파수 추정기가 순간주파수의 분산값이 적음을 알 수 있다. 이것은 표 1.에서 보이듯이, modified covariance방법이 Prony방법보다 많은 데이터 표본수를 이용한다는 사실에서 기인하는 것으로 여겨진다. 다음의 모의 실험에서 각 방법의 variance를 시험한 결과를 보인다.

4. 모의실험

4.1 순간주파수 추정기의 추정 오차 성능 비교

이절에서는 순간주파수 추정기의 성능을 비교한다. 시험 신호는 AM-FM 변조된 신호로 다음과 같이 정의된다.

$$x[n] = \cos\left(\Omega_0 n + \Omega_m \int_0^n q(m) dm + \theta\right) \quad (5)$$

여기에서 $a[n]$ 은 AM변조부분이고 Ω_0 는 반송파 주파수, Ω_m 은 FM 변조주파수이다. 이때 순간주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$\Omega[n] = \Omega_0 + \Omega_m q[n] \quad (6)$$

본 모의시험에서 Ω_m 과 $q[n]$ 은 $q[n]$ 이 1%씩 증가하여 Ω_0 의 20%까지 증가하도록 선택되었다. 그리고, 순간주파수 추정기의 주파수 추정능력에 관심이 있으므로 진폭은 편의상 고정된 값을 사용하였다. 순간주파수 추정기가 주파수를 추정할 때 발생하는 오류의 평균을 취하였으며, 평균의 분산을 구하는 방식으로 다양한 순간주파수 추정기를 비교하였다. 결과는 그림 4와 같다. 2절과 3절에서 예상한 바와 같이 modified covariance 방법에 기초한 순간주파수 추정기가 Prony 방식의 순간주파수 추정기보다 나은 분산특성을 보인다. 아울러 기존의 DESA 방식에 비교해서도 다소 나은 결과를 보인다.

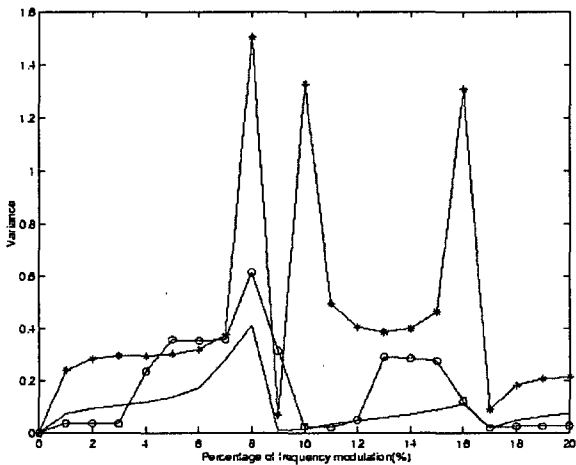


그림 4 주파수변조 신호 추정시 평균 오차의 분산값 분석.
*: Prony, o: DESA II, 실선: MCOV

Fig. 4 Variance of average error rate in frequency tracking as gradually frequency modulated. Solid line with star *: PRONY, o: DESA II and solid line: MC

4.2 EMTDC 발생신호에 대한 모의시험

여기에서는 이상현상이 발생한 신호를 PSCAD를 이용한 EMTDC 시뮬레이션으로 만든다. 신호는 Matlab으로 읽어와 본 논문에서 제시된 방법들로 시험한다. EMTDC로 시뮬레이션된 신호의 상황설정은 다음과 같다. 60Hz의 전력신호가 송전선로상에서 부하의 변동으로 일시적으로 전압이 상승했다가 정상치로 복귀하는 것을 가정한다. 기준시점에서 0.1초의 위치에서 전압의 상승이 발생하고 0.2초에서 정상전압으로 복귀된다. 전력신호는 그림 5. (a)와 같다. 이는 그림 1의 sag와는 반대 경우로 생각할 수 있다. 신호를 Prony방법, MCOV방법, 그리고 DESA I 방법으로 처리한 결과를

각각 그림 5. (b),(c),(d)에서 보인다. 예상과 같이 세 방법 모두 시작순간(0.1초)과 종료순간(0.2초)를 제외한 전 시간구간에 걸쳐 60Hz의 순간주파수를 보이고 있다. 그리고 이상현상이 발생한 순간에 모두 이상현상을 검출해 내고 있다. 다만 MCOV의 경우 순간 주파수의 변동폭이 작아서 이상현상 검출시 민감한 검출기를 사용해야 한다.

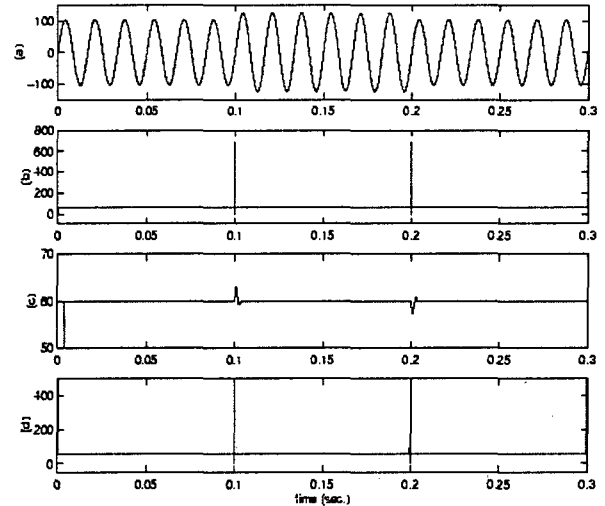


그림 5 EMTDC신호에 대한 순간주파수 분석 (a) EMTDC 발생신호 (b) Prony (c) MCOV (d) DESA I

Fig. 5 Instantaneous frequencies for EMTDC simulated signals (a) EMTDC simulated (b) Prony (c) MCOV (d) DESA I

5. 결 론

본 논문에서는 전력선상의 이상현상을 검출하기 위하여 다양한 순간주파수 추정기를 이용하였다. 순간 주파수는 시간의 함수이고 단일 주파수 성분을 갖는 신호의 주파수를 추정하는데 적절하기 때문에 전압신호에 있을 수 있는 이상현상을 검출하는데 유용하다. 그리고, 다양한 형태의 이상현상을 소개하고 각 현상에 대한 순간주파수의 독특한 출력패턴을 확인하였다. 이와 같은 상이한 출력 특성은 이상현상을 분류하는데 이용될 수 있다. 아울러 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 순간주파수 추정기의 분산 특성을 비교하였다. Modified covariance(MCOV) 방법의 순간주파수 추정기가 분산이 낮은 특성을 보인다. EMTDC 시뮬레이션으로 발생시킨 swell특성의 이상신호에 순간주파수 추정기를 적용하면 모든 순간 주파수 추정기가 적절하게 이상현상을 검출함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-056) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "Online tracking of voltage flicker utilizing energy operator and Hilbert transform," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, pp. 861-867, Apr. 2004.
- [2] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "Energy operator for on-line tracking of voltage flicker levels," in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1153-1157.
- [3] E. J. Powers, Y. Shin, and W. M. Grady, "Time-frequency analysis of electric power disturbances," in *Time Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*, 1st ed., B. Boashash, Ed., Elsevier, 2003, pp. 628-634.
- [4] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis," in *Proc. 1994 IEEE TF/TS Analysis Symposium*, pp. 166-169.
- [5] K. Srinivasan, "Digital measurement of the voltage flicker," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1593-1598, Oct. 1991.
- [6] L. B. Fertig and J. H. McClellan, "Instantaneous frequency estimation using linear prediction with comparisons to the DESAs," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 3, pp. 54-56, Feb. 1996.
- [7] B. Boashash, "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-Part 2: algorithms and applications," *Proc. of the IEEE*, vol. 80, pp. 540-568, Apr. 1992.
- [8] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. F. Quatieri, "On amplitude and frequency demodulation using energy operators," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 1532-1550, Apr. 1993.
- [9] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. F. Quatieri, "Energy separation in signal modulations with application to speech analysis," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 3024-3051, Oct. 1993.
- [10] P. Maragos, and A. Potamianos, "Higher order differential energy operators," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 2, pp. 152-154, Aug. 1995.
- [11] B. Iem, "Instantaneous Frequency Estimators as Voltage Disturbance Detectors," accepted and presented in IEEE Power Systems Conference and Exposition, Oct. 2006.

저 자 소 개



임 병 관 (林 炳 寬)

1965년 4월 3일생.
1988년 연세대 전자공학과 졸업
1998년 Univ. of Rhode Island 전기공학과 졸업(공학박사)
2002~현재 강릉대 전자공학과 조교수
Tel : 033-640-2426
Fax : 033-646-0740
E-mail : ibg@kangnung.ac.kr