

부너맨 주파수 추정 알고리즘을 이용한 풍력발전기 가변 전력신호 처리에 관한 연구

(The Time Variant Power Signal Processing of Wind Generator using Buneman Frequency Estimator Algorithm)

최상열* · 이종주**

(Sang-Yule Choi · Jong-Joo Lee)

Abstract

On wind turbine generators, the speed and volume of the wind affect the turbine angle speed which finally determines the output level of the electric power. However it is very difficult to forecast correctly the future power output and quality based on previous fixed sampling methods.

This paper proposes a variable sampling method based on Buneman frequency estimation algorithm to reflect the variations of the frequency and amplitude on wind power outputs. The proposed method is also verified through the performance test by comparing with the results from previous fixed sampling methods and the real measurement data.

Key Words : Time Variant Signal, Signal Processing, Buneman Frequency Estimator Algorithm

1. 서 론

자연계 신호들은 시간에 따라서 변하거나 주변 환경의 영향으로 가변하는 특성을 갖는다. 자연의 에너지를 이용하는 태양광 및 풍력발전기와 같은 신재생 에너지와 발전설비들의 출력량도 이러한 자연계 시변 특성에 따라서 변화하게 된다.

태양광 발전의 경우 일조시간(日照時間)을 기준으

로 온도와 일사량 그리고 광원의 입사각에 따라서 발전량이 달라진다. 풍력발전기는 풍속(wind speed, 風速)과 풍향(wind direction, 風向)으로 좌우되는 풍량(風量)에 따라서 발전량이 가변하는 특성을 갖는다. 풍량의 변화는 단위 시간당 변화폭이 불규칙하며, 이는 단위 발전기의 불규칙적인 발전량으로 나타난다.

풍력발전기의 안정적인 발전량 확보를 위하여, 컨트롤러를 이용한 블레이드의 피치(Pitching) 제어, 요(Yawing) 제어 그리고 기어(Gear), 토크제어와 인버터 장치를 이용한 가변속·출력제어 방법들을 사용한다[1-4].

이처럼 풍력발전기의 안정적인 운전을 위하여 다양한 제어기법들이 사용되고 있으나, 정확한 제어와 출력 확보를 위해서는 발전기 입력 에너지원인 풍량과

* 주저자 : 인덕대학 정보메카트로닉스학과 조교수

** 교신저자 : 한국전기연구원 위축선임연구원

Tel : 031-420-6188, Fax : 031-420-6189

E-mail : jongjoo@keri.re.kr

접수일자 : 2010년 7월 26일

1차심사 : 2010년 7월 30일

심사완료 : 2010년 10월 18일

이에 응동하는 출력신호에 대한 정확한 계측이 필요하다. 입력부의 변화를 계측하고 이를 제어기의 참고값으로 활용함으로써 신속하고 정교한 제어가 가능하다. 하지만 해당 신호가 시변하고 그 변화 폭이 클 경우 신호를 정확히 계측하기 어려울 뿐만 아니라 잘못된 제어 결과를 얻을 수 있다.

풍력발전기의 출력신호는 풍량의 변화와 시스템의 복잡성 그리고 부하의 변화에 따라서 주파수와 진폭이 변동되며, 전류 신호의 경우는 제어방식에 따라서 고조파 또는 고주파수 잡음으로 인하여 신호가 왜곡되는 특성을 갖는다. 따라서 풍력발전기 전력신호의 효과적인 계측을 위하여 신호 변화와 특성에 따른 처리방법이 필요하다.

일반적인 신호의 계측은 표본화 주파수(sampling frequency)와 처리 대상 개수(비퍼 또는 분석 구간 윈도우의 크기)가 설정되는 정적인 표본화 과정으로 계측된 신호를 상세히 분석하기 위하여 윈도우의 크기를 조정하는 방법을 사용한다. 하지만 표본화 개수의 증가는 해당 신호의 처리하는 시간 증가 및 속도 지연으로 효율성을 저하시킨다.

신호의 주파수와 진폭 변화의 가변 특성을 고려하지 않는 정적 계측 방법은 신호의 변화에 따라서 표본화 주파수를 제어하는 가변 방식과 비교하여 동일한 표본화 개수로 분석할 경우 정밀도와 해상도가 낮다. 이처럼 대상 신호가 가변적이고 특성을 예측하기 어려운 경우 정적인 표본화 방법으로 정확한 신호의 계측과 분석을 기대하기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 효과적인 신호처리를 위한 주파수 추정 기법의 표본화 주파수 제어방법을 제시하고 계측된 신호의 분석 결과를 비교 평가한다.

2. 풍력발전기 출력신호의 특성

2.1 계측된 풍력발전기 출력신호

풍력발전기의 출력신호 특성은 풍향과 풍속으로 인한 물리적 풍량에 따라서 정격운전 조건 이하에서는 가변하는 특성을 갖는다.

다음의 그림 1과 그림 2는 소형 영구자석형 동기발

전기(PMGS)의 무부하시 출력 전압과 부하시 전류를 실측한 것으로 가변적인 신호 특성을 보여준다.

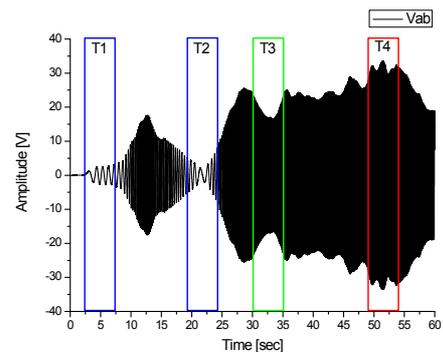


그림 1. 풍력발전기 출력단 가변 전압
Fig. 1. Time Variant Voltage Signal

그림 1은 단위 시간 1분 동안 풍력발전기 무부하 출력단 전압, 그림 2는 부하시 출력단 전류를 2.5[kHz]의 표본화 주파수로 계측한 것이며, 계측 구간에서 주파수와 진폭의 변화가 큰 시 구간을 선정하였다.

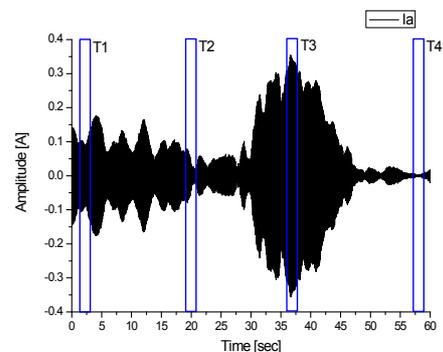


그림 2. 풍력발전기 출력단 가변 전류
Fig. 2. Time Variant Current Signal

다음의 그림 3은 실측 대상 풍력발전기의 구성도와 표 1에는 사양과 특징을 나타낸 것이다[5].

그림 4와 그림 5는 표본화 속도 2.5[kHz]로 계측된 출력 전압과 전류 신호의 주파수 스펙트럼을 20[Hz]와 150[Hz]까지 분석한 결과이다. 그림 1과 그림 4에서 나타난 바와 같이 계측 대상 풍력발전기의 실측 전

부너맨 주파수 추정 알고리즘을 이용한 풍력발전기 가변 전력신호 처리에 관한 연구

압은 1~13[Hz] 대역에서 진폭은 $\pm 2.5 \sim \pm 33.5[V]$ 범위로 변화한다.

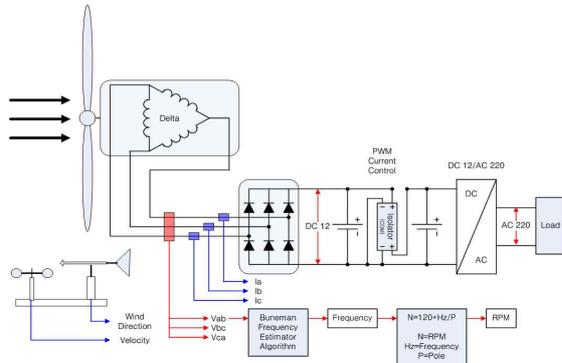


그림 3. 대상 풍력발전기 구성도
Fig. 3. Block Diagram of Wind Generator

표 1. 풍력발전기 사양
Table 1. Specification of Wind Generator

정격 출력	300[W]	날개 직경	2.6[m]
정격 풍속	8[m/s]	배터리	12[V]100[Ah]
정격 회전수	400[rpm]	최저 풍속	3[m/s]
정격 전압	12/24[V]	작동 풍속	3~25[m/s]
최대출력	450[W]	최대 풍속	40[m/s]
결 선	△	극 수	8극

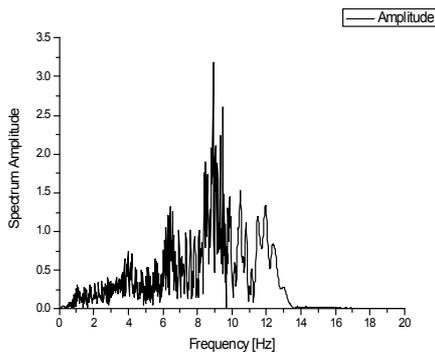


그림 4. 가변 출력 전압의 스펙트럼
Fig. 4. Spectrum of Voltage Signal

전류 출력은 그림 2와 그림 5에서 나타난 바와 같이 6~18[Hz] 에서 최대 $\pm 0.25 \sim \pm 0.35$ 의 진폭을 갖는 시변 특성을 확인할 수 있다.

이처럼 풍력발전기의 출력변화는 시구간에 따른 주파수와 진폭의 변화로 나타난다. 즉 출력 전압의 시구간 변화 특성과 전력변환 장치에 의한 전류의 변화로 특성으로 구분할 수 있다.

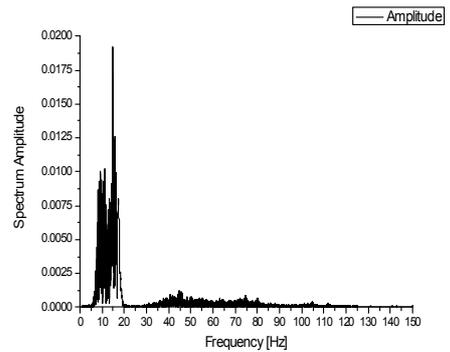


그림 5. 가변 출력 전류의 스펙트럼
Fig. 5. Spectrum of Current Signal

2.2 출력신호의 시변 특성

풍력발전기 출력단 전압 신호의 주파수 변화는 처프 신호(Chirp signal)와 유사한 특성을 갖는다. 처프 신호는 시구간 동안 초기 설정 주파수에서 최종 목적 주파수까지 변화하는 정현파 특성을 갖는 신호로 다음의 수식들로 나타나며, 현재의 출력 값은 해당 시구간에 따라서 표현된다[6]. 처프 신호의 출력은 다음의 수식 (1)로 표현된다.

$$y = A \sin(2\pi(f(t)t)) \quad (1)$$

위의 수식 (1)에서 시구간 함수는 다음의 수식 (2)로 정의된다.

$$f(t) = f_0 + \frac{(f_1 - f_0)}{T_n} t \quad (2)$$

위의 수식에서 f_0 는 진폭, t 는 현재 시간, f_1 는 초기 주파수, T_n 은 최종 주파수 그리고 f_0 는 초기 주파수와 최종 주파수 사이 시구간의 해상도 또는 표본화 개수를 나타낸다. 또한 처프 신호의 이산식은 다음의 수식 3과 같다.

$$y_i = A \times \sin\left(\left(\frac{1}{2} a \times i + b\right) \times i\right) \quad (3)$$

위의 수식 (3)에서, $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ 으로 표본화 개수 n 의 순서를 나타내며, A 는 진폭, $a = \frac{2\pi(f_1 - f_0)}{n}$ 그리고 $b = 2\pi f_0$ 을 나타낸다. f_0 과 f_1 은 각각 초기(시작) 주파수와 최종(끝) 주파수로 주기/표본화 개수의 정규화된 단위로 표현된다. 즉 표본화 주파수가 f_s 이면 f_0/f_s 에서 f_1/f_s 까지 변하는 주파수를 갖는 신호이다.

이처럼 풍력발전기 출력 신호의 주파수 변화를 처프 신호의 가변 주파수(variable frequency)로 표현할 수 있으며, 가변 진폭(variable amplitude)에 대한 추가적인 표현이 필요하다.

다음의 수식 (4)는 전체 주기 T 동안 주파수와 진폭이 변하는 신호 모델 $S(t)_{linked}$ 을 나타낸 것이다. 신호의 주기가 T 인 시변 신호의 주파수와 진폭 변화는 세 부 구간으로 구분하여 표현할 수 있다.

$$S(t)_{linked} = S(t)_{1st} + S(t)_{2nd} + \dots + S(t)_{nth} \quad (4)$$

신호를 구성하는 각 시 구간이 n 개로 구분된 경우, 전체 주기 T 는 각 n 개의 구간으로 구성된다. 각 $0T \sim \frac{1}{n}T$, $\frac{1}{n}T \sim \frac{2}{n}T$ 그리고 $\frac{n-1}{n}T \sim \frac{n}{n}T$ 으로 구간에 따라서 주파수와 진폭이 가변된다.

$$\begin{aligned} S(t)_{1st} &= D.C_{1st} + A_{1st}(2\pi f_{1st}t + \theta_{1st}) \\ S(t)_{2nd} &= D.C_{2nd} + A_{2nd}(2\pi f_{2nd}t + \theta_{2nd}) \\ \dots \\ S(t)_{nth} &= D.C_{nth} + A_{nth}(2\pi f_{nth}t + \theta_{nth}) \end{aligned} \quad (5)$$

시변 신호를 구성하는 각 구간은 수식 (5)로 표현할 수 있다. 구간을 표현하는 수식 $S(t)_{1st}$, $S(t)_{2nd}$ 와 $S(t)_{nth}$ 의 시 구간은 $t_0 \leq t < t_1$, $t_1 \leq t < t_2$ 와 $t_{n-1th} \leq t < t_{nth}$ 으로 할당된다.

2.3 출력신호의 합성 특성

발전기의 전류신호는 연계된 전력변환기와 출력

전압의 변화로 인하여 신호가 왜곡 고조파와 잡음으로 신호가 왜곡되거나 잡음이 발생된다. 이처럼 신호를 구성하는 성분들이 변화되는 특성은 합성신호(mixed signal) 모델로 다음의 수식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} s(t) &= D.C + A \sin(wt + \theta) \\ &= D.C + A \sin(2\pi ft + \theta) \\ &= D.C + A e^{j(2\pi ft + \theta)} \end{aligned} \quad (6)$$

수식 (6)에서 $s(t)$ 는 정현파 함수의 출력 값을 나타내며, A 는 진폭(amplitude), w 는 각 주파수(angular frequency ; rad/sec), θ 는 위상 그리고 $D.C$ 는 직류 오프셋(dc-offset)을 나타낸다.

기본 정현파 신호와 여러 주파수 성분을 포함하는 신호의 재현을 위하여 상기 나열한 합성신호는 다음과 같은 이산(discrete) 파형 수식 (7)로 표현된다.

$$\begin{aligned} s(t)_{mixed} &= \sum_{i=1}^n [D.C_i + A_i \sin(\omega_i t + \theta_i)] \\ &= \sum_{i=1}^n [D.C_i + A_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i)] \end{aligned} \quad (7)$$

이상의 시변신호와 합성신호에 부가적 잡음원으로 전력전자 소자의 스위칭 잡음, 백색잡음(white noise)과 가우시안 잡음(gaussian white noise) 등으로 구분하여 모의할 수 있다.

3. 신호처리 알고리즘

3.1 이산 푸리에 변환

표본화된 신호의 분석과 주파수 추정을 위하여 사용되는 부너맨 알고리즘은 신호처리 이산화 과정인 DFT(Discrete Fourier Transform)를 다음의 FFT(Fast Fourier Transform) 수식으로 연산한다 [7-9].

부너맨 주파수 추정 알고리즘을 이용한 풍력발전기 가변 전력신호 처리에 관한 연구

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} \quad (8)$$

수식 (8)에서 n 은 $n=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ 으로 표본화된 데이터의 순서이고, N 은 표본화된 입력신호 x 의 원소 개수이다. 그리고 Y 는 푸리에 변환결과를 나타낸다. 복소수(complex phasor)상 형식으로 나타낸 수식 (9)는 다음과 같다[7-9].

$$Y_k^{real} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_{k-n} \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (9)$$

$$Y_k^{imag} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_{k-n} \sin \frac{2\pi n}{N}$$

위의 수식 (9)에서 Y_k^{real} 와 Y_k^{imag} 는 각각 실수(real)부와 허수(imaginary)부 성분을 이산 연산식 형태로 나타낸 것이며, 연속적인 표본화 신호의 효과적인 재귀 연산식(recursive form)은 다음의 수식 (10)과 같다.

$$Y_k^{real} = Y_{k-1}^{real} \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_k - x_{k-N}) \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (10)$$

$$Y_k^{imag} = Y_{k-1}^{imag} \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_k - x_{k-N}) \sin \frac{2\pi n}{N}$$

이산 푸리에 변환은 입력신호의 스펙트럼 오차와 복합신호 특성 분석의 정확도 유지를 위하여 신호의 주파수와 크기 변화에 따른 가변 윈도우 함수를 채용함으로써 정확성을 향상시킬 수 있다[10-11].

3.2 부너맨 주파수 추정 알고리즘

시 구간에서 주기와 길이를 정확히 알지 못하는 형태의 주파수 측정을 위한 부너맨 주파수 추정 알고리즘(Buneman Frequency Estimator Algorithm)은 설정된 표본화 주파수와 구동 클럭값의 제어로 입력된 신호의 주파수를 계산한다.

$$0 \leq f_0 \leq f_1 \leq f_2 \leq f_3 \leq \frac{1}{2}f_s \quad (11)$$

부너맨 주파수 추정은 수식 (11)과 같이 표현되며, n 은 표본화된 신호의 크기(Size of The Data Array), f_s 는 표본화 주파수(Sampling Frequency)를 나타낸다 [12].

$$\beta = b + \frac{n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\left(\sin \frac{\pi}{n} \right)}{\cos \frac{\pi}{n} + \frac{|F_b(X)|}{|F_{b+1}(X)|}} \right) \quad (12)$$

F_b 는 주파수 b 에 대한 입력신호 X 의 푸리에 변환 값을 나타내며, 계산된 $|F_b(X)|$ 값들 중에서 가장 큰 값으로 주파수 b 값을 결정한다. β 는 사인파를 포함한 대부분의 입력신호에 대하여 계산된 주파수 계수값으로 정확한 주파수는 다음의 수식 (13)으로 계산된다.

$$E.F = \beta \times df = \beta \times \frac{f_s}{N} \quad (13)$$

$E.F$ 는 계산(추정)된 주파수(Estimate Frequency)
 N 은 표본화된 데이터의 개수(Number of samples)
 df 는 주파수 스펙트럼 간격(Frequency interval of power spectrum)

부너맨 주파수 추정은 푸리에 알고리즘을 기반으로 구성되며, 표본화 동기 오차 및 시간 지연특성을 고려하여 영점 교차(zero-crossing) 함수를 이용한 주파수 계측 값을 활용하여 보안할 수 있다.

4. 가변 신호 특성에 따른 신호처리

4.1 가변 신호처리 모델

본 논문에서 제안한 가변 신호 특성에 따른 신호처리 방안은 입력 신호의 주파수 변화에 따른 가변 표본화 처리를 위하여 부너맨 주파수 추정 알고리즘을 이용했다. 초기 설정된 표본화 주파수에 따라서 입력 신호를 표본화 하고 DFT 기반의 부너맨 주파수 추정 알고리즘과 부가적인 영점 교차 측정을 이용한 주파수 변화 검출로 설정된 임계값 이상의 주파수 변동시 표본화 주파수를 가변한다.

상기 표현한 수식 (11)에서 수식 (13)을 활용하여 계산된 주파수 값의 변화율을 가변 신호처리를 위한 임계값(threshold value) 값으로 참고한다. 입력신호의 주파수 변화와 이에 따른 가변 표본화 주파수 클럭의 제어를 위하여 주파수의 가변 범위(trigger value)를 설정하고 이 값을 초과할 경우 표본화 주파수 클럭을 변경한다[13].

$$f_{\%} = \frac{|f_{pre} - f_{now}|}{f_{pre}} \times 100\% \quad (14)$$

$|f_{\%}| < trigger_{\%} : keep(clock)$

$|f_{\%}| \geq trigger_{\%} : change(clock)$

위의 수식 (14)에서 f_{pre} 는 이전에 입력된 신호의 주파수(현재 설정된 주파수 값), f_{now} 는 현재 입력되는 신호의 주파수, $f_{\%}$ 는 변경된 주파수의 오차 백분율 그리고 $trigger_{\%}$ 는 설정된 주파수 변화 동작 범위를 나타낸다.

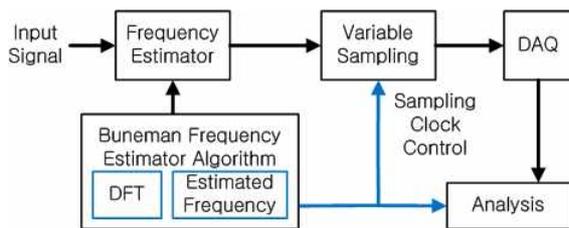


그림 6. 가변 신호 특성에 따른 신호처리 모델
Fig. 6. Signal Processing Model of Variant-Signal

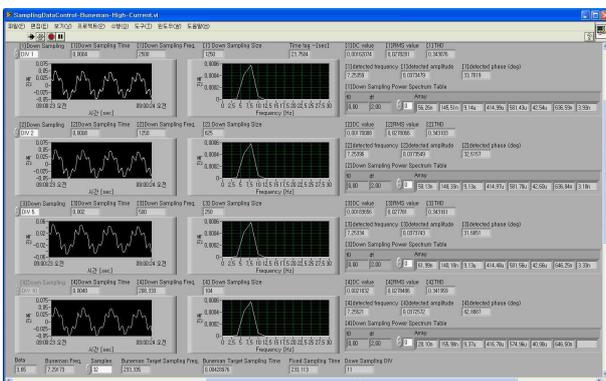


그림 7. 가변 표본화 신호처리·분석 프로그램
Fig. 7. Signal Processing and Analysis Program

부너맨 알고리즘에서 구성된 DFT 신호 분석 결과를 활용하여 입력신호의 특성을 분석하며, 사용자에게 선택에 따라서 윈도우 함수를 선정하여 신호의 변화와 특성을 도출할 수 있다. 그림 6은 제안된 가변 신호처리 모델의 구성도를 나타낸 것이다.

그림 7은 신호처리 모델로 구현된 프로그램의 전류 신호 분석 실행화면이다.

4.2 성능 시험 및 평가

제안된 신호처리 모델의 성능 시험은 풍력발전기의 출력 전압과 전류를 실측하여 평가했다. 실측된 신호는 풍속에 따라서 발전기의 회전수 및 출력이 변함으로 시변하는 신호 특성으로 활용할 수 있다. 평가 방안은 2.5[kHz]의 표본화 속도로 계측된 신호를 기준으로 부너맨 주파수 추정에 따른 가변 표본화 신호의 오차를 계산하는 방법으로 수행한다.

표본화 속도에 따른 신호의 분석결과 평가는 전압, 전류 신호를 구분하여 각각 상대 표본화 속도를 설정하고 그 결과를 비교한다. 각 분석대상 신호와 설정된 표본화 속도로 계측된 값은 분석 데이터의 개수, 실효값(rms), 주파수, 진폭, 위상, DC-offset 그리고 THD의 특성값을 계산한다.

다음의 그림 8은 그림 1의 풍력발전기 출력단 가변 전압에서 주파수와 진폭의 변화가 상대적으로 큰 구간으로 5초(5sec) 동안 실측된 값을 나타낸 것이다.

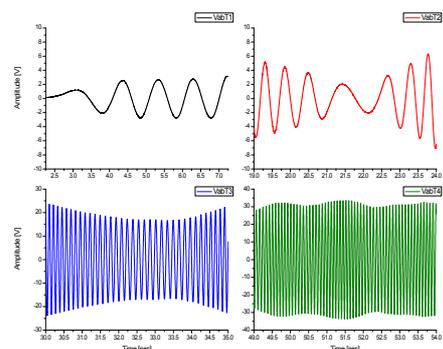


그림 8. 풍력발전기 출력단 구간별 가변 전압
Fig. 8. Time Variant Voltage Signal

풍량에 따른 발전기 회전 속도와 출력 변화는 전압의 주파수와 진폭의 변동으로 확인된다. 그림 9는 그림 8에 구분된 해당 구간의 신호에 대한 스펙트럼을 나타낸 것이다.

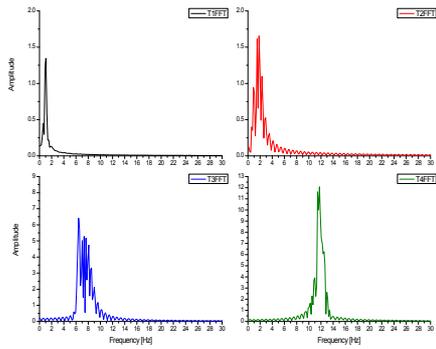


그림 9. 가변 출력 전압의 구간별 스펙트럼
Fig. 9. Spectrum of Voltage Signal

표 2. 제안된 모델의 처리 성능 비교 - CASE 1
Table 2. A performance comparison - CASE 1

표본화 주파수	2.5[kHz]	250[Hz]	125[Hz]	부너맨 추정
개수	1250 100[%]	125 10[%]	62 4.96[%]	19 1.52[%]
실효값	2.66118 100[%]	2.6641 100.10[%]	2.67126 100.37[%]	2.68213 100.78[%]
주파수	2.43102 100[%]	2.43025 99.96[%]	2.45811 101.11[%]	2.47073 101.63[%]
진폭	2.03676 100[%]	2.03704 100.01[%]	1.99591 97.99[%]	1.98458 97.43[%]
위상	27.2241 100[%]	27.0943 99.52[%]	25.1937 92.54[%]	26.6718 97.97[%]
DC -offset	-1.0702 100[%]	-1.0679 99.79[%]	-1.0914 101.98[%]	-1.0813 101.04[%]
THD	0.19679 100[%]	0.19742 100.32[%]	0.20238 102.84[%]	0.20185 102.57[%]
분석대상, 구간	전압, 시구간 : 22.71 ~ [sec]			

부너맨 주파수 추정 알고리즘을 이용한 가변 표본화 처리 성능을 평가하기 위하여, 각각 2.5[kHz], 250[Hz], 125[Hz] 그리고 부너맨 주파수 추정의 32배수 [Hz]로

표본화 계측된 신호의 특성을 비교하고 분석오차를 계산했다.

표 3. 제안된 모델의 처리 성능 비교 - CASE 2
Table 3. A performance comparison - CASE 2

표본화 주파수	2.5[kHz]	250[Hz]	125[Hz]	부너맨 추정
개수	1250 100[%]	125 10[%]	62 4.96[%]	96 7.68[%]
실효값	13.0417 100[%]	13.0389 99.97[%]	13.0825 100.31[%]	13.0516 100.07[%]
주파수	6.79096 100[%]	6.78741 99.94[%]	6.78912 99.97[%]	6.78809 99.95[%]
진폭	18.1724 100[%]	18.1625 99.94[%]	18.1666 99.96[%]	18.1646 99.95[%]
위상	-152.9 100[%]	-142.80 93.39[%]	-142.94 93.48[%]	-143.83 94.07[%]
DC -offset	-1.6158 100[%]	-1.6120 99.76[%]	-1.5807 97.82[%]	-1.6109 99.69[%]
THD	0.00476 100[%]	0.00475 99.87[%]	0.00459 96.58[%]	0.00478 100.54[%]
분석대상, 구간	전압, 시구간 : 31.53 ~ [sec]			

표 2와 표 3은 부너맨 주파수 추정 알고리즘을 적용한 시변 전압신호의 계측 및 분석 결과를 비교한 것이다.

부너맨 주파수 추정기법을 이용한 전압 신호처리 결과 작은 개수의 표본화 분석으로 최대 오차 범위 3% 이내의 효과적인 평가를 확인할 수 있다.

다음의 그림 10은 풍력발전기의 출력 전류 변화를 2초(sec) 동안의 구간으로 구분하여 나타낸 것이다.

그림 11은 그림 10에서 각각 구분된 해당 구간 신호의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 계측된 전류 신호도 시구간에 따라서 주파수와 진폭이 달라지며, 특히 주파수 분석시 해당 신호의 성분이 가변함을 확인할 수 있다.

전류 신호의 평가는 2.5[kHz], 1.25[kHz] 그리고 500[Hz]의 표본화 속도와 부너맨 주파수 추정에 따른 표본화 계측으로 비교한다. 다음의 표 4와 표 5는 해당 시 구간 전류 신호 계측을 비교한 것이다.

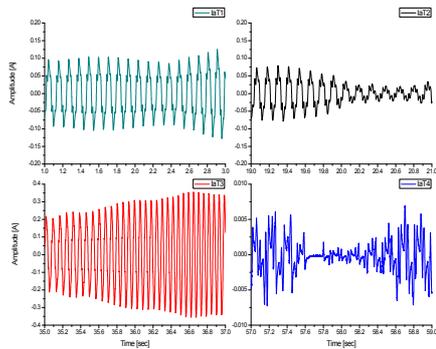


그림 10. 풍력발전기 출력단 구간별 가변 전류
Fig. 10. Time Variant Current Signal

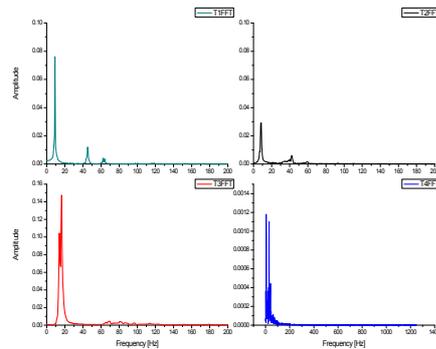


그림 11. 가변 출력 전류의 구간별 스펙트럼
Fig. 11. Spectrum of Current Signal

표 4. 제안된 모델의 처리 성능 비교 - CASE 3
Table 4. A performance comparison - CASE 3

표본화 주파수	2.5[kHz]	1.25[kHz]	500[Hz]	부너맨 추정
개수	1250 100[%]	625 50[%]	250 20[%]	125 10[%]
실효값	0.05624 100[%]	0.056236 99.99[%]	0.05618 99.90[%]	0.05612 99.80[%]
주파수	8.83904 100[%]	8.83913 100.00[%]	8.83943 100.00[%]	8.83624 99.96[%]
진폭	0.07737 100[%]	0.07737 100.00[%]	0.07737 99.99[%]	0.07740 100.04[%]
위상	113.406 100[%]	112.121 98.86[%]	110.789 97.69[%]	111.257 98.10[%]
DC -offset	-0.001 100[%]	-0.00081 80.51[%]	-0.0004 47.77[%]	-0.0001 10.00[%]
THD	0.2317 100[%]	0.231728 100.01[%]	0.23108 99.73[%]	0.23398 100.98[%]
분석대상, 구간	전류, 시구간 : 1.9296 ~ [sec]			

분석대상인 전압과 전류신호의 특성에 따라서 부너맨 주파수 추정 결과를 적용한 표본화 주파수가 달라짐으로 주파수 추정에 따른 최대 표본화 개수 또는 주파수를 설정하면 효과적인 분석이 가능하다. 미세 신호로 검출되는 DC-offset과 기본 주파수의 위상을 제외한 신호처리 결과는 수 [%]의 오차 범위이며, 최소

한의 표본화 개수로 효과적인 분석이 가능함을 확인할 수 있다.

표 5. 제안된 모델의 처리 성능 비교 - CASE 4
Table 5. A performance comparison - CASE 4

표본화 주파수	2.5[kHz]	1.25[kHz]	500[Hz]	부너맨 추정
개수	1250 100[%]	625 50[%]	250 20[%]	125 10[%]
실효값	0.00049 100[%]	0.00049 99.84[%]	0.00049 100.81[%]	0.00048 99.64[%]
주파수	25.4904 100[%]	25.4859 99.98[%]	25.4995 100.03[%]	25.4934 100.01[%]
진폭	0.00047 100[%]	0.00046 99.72[%]	0.00047 101.97[%]	0.00046 99.33[%]
위상	91.9366 100[%]	88.7286 96.51[%]	82.5835 89.82[%]	102.402 111.38[%]
DC -offset	-0.0002 100[%]	-0.00015 100.45[%]	-0.00015 100.45[%]	-0.00015 100.45[%]
THD	0.12822 100[%]	0.131889 102.86[%]	0.14618 114.01[%]	0.14206 110.79[%]
분석대상, 구간	전류, 시구간 : 57.6848 ~ [sec]			

4. 결 론

단위 시간당 변하는 풍량에 따라서 불규칙하게 출력이 변동되는 풍력발전기는 고정된 표본화 주파수로

계측되는 정적 방법으로 정확한 분석이 어렵다. 이는 신호의 변화에 따라서 표본화 주파수를 제어하는 가변 방식과 비교하여 동일한 표본화 개수로 분석할 경우 상대적으로 낮은 정밀도와 해상도를 갖는다.

따라서 본 논문에서는 시 구간에서 주기와 길이를 정확히 알지 못하는 파형의 주파수 측정에 사용되는 부너맨 주파수 추정 알고리즘을 적용한 표본화 주파수 제어방법으로 가변 신호처리 방안을 제시했다.

뿐만 아니라 신호의 시변 특성을 가변 주파수와 가변 진폭으로 구분하여 각각 처프 신호 모델과 시 구간 주기를 구분하여 진폭 값이 다른 모델로 평가하고 전류 신호의 왜곡 현상을 구성 신호 성분들의 합성신호 모델로 표현했다.

풍력발전기의 실측된 출력 전압, 전류를 분석 대상으로 하여 제안된 부너맨 주파수 추정알고리즘을 이용한 가변 신호처리 모델을 제안하고 구현된 프로그램으로 각 표본화 주파수에 따른 성능을 평가함으로써 효용성을 입증했다. 향후 퍼지(fuzzy)이론과 같은 인공지능 기법을 이용한 최적 윈도우 함수 선정과 웨이블릿(wavelet) 함수를 이용한 분석기법으로 정확성과 효율성을 향상시킬 수 있으며, 발전기 출력단 전압을 기준으로 수행하는 발전기 동특성 시험과 분석에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 인덕대학의 학술연구지원에 의해서 이루어진 것이며 이에 감사드립니다.

References

[1] Muyeen. S.M, Takahashi. R, Murata. T, Tamura. J, "A Variable Speed Wind Turbine Control Strategy to Meet Wind Farm Grid Code Requirements", Power Systems. IEEE Transactions on. Vol. 25, Issue. 1, pp. 331-340, 2010.
 [2] Zhe Chen, Guerrero. J.M, Blaabjerg. F, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", Power Electronics. IEEE Transactions on. Vol. 24, Issue. 8, pp. 1859-1875, 2009.

[3] Muljadi. E, Butterfield. C.P, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation", Industry Applications. IEEE Transactions on. Vol. 37, Issue. 1, pp. 240-246, 2001.
 [4] Senju. T, Sakamoto. R, Urasaki. N, Funabashi. T, Fujita. H, Sekine. H, "Output power leveling of wind turbine Generator for all operating regions by pitch angle control", Energy Conversion. IEEE Transactions on. Vol. 21, Issue. 2, pp. 467-475, 2006.
 [5] 이종주, 김동준, 문영환, "계통연계 풍력발전기의 전력품질 평가를 위한 IEC 61400-21 표준 실시간 계측 장치 구현", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제59권 제9호, pp. 1560~1565, 2010. 9.
 [6] Steven W. Smith, "The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing", California Technical Publishing, 1997.
 [7] Paul Embree, "C Algorithms for Real-Time DSP", 1st Edition. Prentice Hall. Inc, May, 1995.
 [8] Emmanuel Ifeachor, "Digital Signal Processing", 2 edition, Prentice Hall, Sep, 2001.
 [9] Vijay K. Madiseti, Douglas Williams, "The Digital Signal Processing Handbook", CRC, Dec, 1997.
 [10] Howard A. Gaberson, "A Comprehensive Windows Tutorial", SOUND AND VIBRATION, March, 2006.
 [11] Hidalgo. R.M, Fernandez. J.G, Rivera. R.R, "A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements", Instrumentation and Measurement. IEEE Transactions on. Vol. 51, Issue. 1, pp. 31-36, Feb. 2002.
 [12] National Instrument, "LabVIEW Signal Processing, Analysis and Mathematics", Mar, 2004.
 [13] 이종주, "능동형 텔레메틱스 구현을 위한 SoC 기반 이동형 임베디드 플랫폼 설계", 성균관대학교 대학원 박사 학위논문, 2008.

◇ 저자소개 ◇



최상열(崔相烈)

1970년 8월 24일생. 1996년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(박사). 2002~2004년 안양대학교 디지털미디어 학부 전임강사. 2004년~현재 인덕대학교 컴퓨터정보메카트로닉스학과 조교수.



이종주(李種柱)

1975년 11월 27일생. 1999년 수원대학교 전기공학과 졸업. 2001년 성균관대학교 정보통신공학부 대학원 졸업(석사). 2008년 동 대학원 정보통신공학부(박사). 2001년~2004년 새턴정보통신(주) 개발팀장. 2005~2007년 성균관대학교 정보통신용신

기능성소재 및 공정연구소 연구원. 2008년~현재 한국 전기연구원 전력시스템 연구본부 Smart Grid 연구센터 위촉선임연구원.