

# 계통연계 풍력발전 시스템의 최대출력 제어를 위한 PI 제어기의 성능 분석

論 文
51A-8-4

## Performance of PI Controller for Maximum Power Extraction of a Grid-Connected Wind Energy Conversion System

盧 炘 洙\* · 柳 炳 秀\*\*  
(Kyoung-Soo Ro · Haeng-Soo Ryu)

**Abstract** - This paper presents a modeling and simulation of a PI controller for maximum power extraction of a grid-connected wind energy conversion system with a link of a rectifier and an inverter. It discusses the maximum power control algorithm for a wind turbine and proposes, in a graphical form, the relationships of wind turbine output, rotor speed, power coefficient, tip-speed ratio with wind speed when the wind turbine is operated under the maximum power control. The control objective is to always extract maximum power from wind and transfer the power to the utility by controlling both the pitch angle of the wind turbine blades and the inverter firing angle. Pitch control method is mechanically complicated, but the control performance is better than that of the stall regulation method. The simulation results performed on MATLAB will show the variation of generator's rotor angle and rotor speed, pitch angle, and generator output.

**Key Words** : Wind Energy Conversion System(WECS), Maximum Power, Pitch Control, D/A Inverter.

### 1. 서 론

산성비와 지구온난화와 같은 환경오염에 대한 관심이 커짐에 따라 지난 20여 년 동안 인류의 문명과 기술발전이 지대하게 공헌해 온 화석연료 에너지원은 우리의 일상생활에 위협한 요소로 다가오고 있다. 아울러 전 세계 인구증가는 더 많은 전기에너지를 필요로 할 것이 확실한 데 화석연료 에너지원의 더 많은 이용과 그 매장량의 감소는 미래의 발전에 장애가 될 것으로 여겨진다. 무한한 에너지원으로 생각했던 원자력발전 또한 쉽게 받아들일 수 없는 기술로 판명되고 태양열발전과 같은 대체에너지원은 지금으로서는 경제성이 낮기 때문에 세계적으로 에너지문제는 난항을 겪고 있는 셈이다. 앞으로 에너지 문제를 해결하기 위한 과제는 화석연료 에너지원을 보다 효율적으로 이용함과 동시에 원자력 에너지의 안전한 이용을 포함하여 재생에너지원(태양열, 연료전지, 조력, 풍력)의 이용을 높이는 기술개발이라고 할 수 있다. 더구나 전력산업 구조개편이 세계적인 추세로 자리함으로써 재생에너지원의 입지변화는 불가피하리라 여겨진다.

풍력발전은 재생에너지원 중에서도 연료전지와 함께 가장 활발하게 연구되고 있는 분야로서 현재 우리나라에서도 실용화되어 몇 개 지역에서 설치되어 운전되고 있다. 풍력발전은 자연적으로 발생하는 바람을 이용하여 풍차의 회전으로 인한 기계적 에너지를 발전기를 통한 전기적 에너지로 변환하

는 장치이다. 풍력발전의 가장 큰 장점은 무공해의 바람을 이용하기 때문에 에너지원의 고갈위험이 없고 기존의 발전방식에서 나타나는 환경오염의 문제가 사라진다는 것이다. 자연에서 무한히 생성되는 바람을 이용하는 풍력발전기술은 증가하는 전력수요에 요구되어지는 공급을 충족할 수 있을 것으로 여겨진다. 풍력발전 시스템에서 채용되는 발전방식은 크게 동기발전기와 유도발전기로 구분되며, 동기발전기의 경우 계통으로부터 무효전력을 필요로 하지 않는 장점이 있으며 이러한 이유로 초기 캘리포니아의 발전회사들이 채용했던 방식이다. 유도발전기는 동기기와 비교해서 구조가 간단하고 값이 싸며 내구성이 강하여 이용이 증가하고 있다.

풍력에너지는 바람의 속도와 방향이 자주 바뀌고 지속적이지 못한 경우가 있어 동력원으로서의 전환에 많은 기술이 요구됨에 따라, 생산가격이 상대적으로 높다는 단점이 지적되고 있다. 그러나 최근에는 중형급(250kW 이상) 수평축 발전기의 개발로 효율을 높이고 풍력시스템 단지화에 따른 대량생산과 대규모 단지의 조성 등으로 점차 생산단가가 낮아지고 있는 실정이다. 더구나 구미 선진국에서는 경제성이 타당한 수평축 대형풍차 개발에 총력을 기울이고 있으며, 이미 상용화 단계에까지 기술개발이 이루어져 있음은 물론 국가적인 지원정책도 활발히 진행되고 있다.

전력계통에 적용하기 위한 풍력 발전기술의 연구동향을 살펴보면, Steinbuch는 310kW 수평축 풍차가 동기발전기를 거쳐 컨버터를 통하여 계통에 연계된 풍력발전시스템에 최적제어기를 적용하였다.[1] 풍속의 변화에 따라 발전기의 회전속도를 일정하게 유지하는 제어보다는 주파수가 일정하지 않은 출력을 전력변환장치를 통하여 정격 주파수의 전력을 얻는 것이 최근의 추세이다. Waszynuk 등은 MOD-2 풍차가 동

\* 正 會 員 : 東國大學 電氣工學科 助教授 · 工博  
次世代電力技術研究中心

\*\* 正 會 員 : LG産電 電力試驗技術센터(PT&T) 研究員  
接受日字 : 2002年 3月 28日  
最終完了 : 2002年 6月 25日

기발전기를 거쳐 바로 계통에 연계하여 운전하는 것을 제시하며 피치제어를 이용하여 불규칙한 풍속의 변화에 따른 날개축의 비틀림 모드의 동요를 개선하였다.[2] Chedid 등은 동기발전기를 기반으로 한 수평축 풍차가 컨버터를 통하여 계통에 연계된 풍력발전 시스템의 최대출력을 가능케 하고 피치제어의 유무에 따른 출력의 변화를 비교하였다.[3] Murdoch는 6MW 수평축 풍차의 설계를 위한 모델링과 성능을 확인하기 위해 풍력발전 시스템의 선형화기법을 통하여 분석하였다.[4] Leithead 등은 풍력발전에 있어서 제어의 목적과 제어가 풍차의 동특성에 미치는 영향을 폭넓게 분석하였으며 풍차의 가변 피치제어의 필요성을 역설하였다.[5] Muljadi 등은 실제 풍속데이터를 채취하여 전력전자 기술을 이용한 유도발전기의 가변속도 제어전략을 제시하였지만[6], 이것은 피치제어가 없는 경우에만 성립하는 것이다.

현재 풍력발전기의 대부분을 차지하고 있는 수평축 풍차의 출력을 제어하는 방법은 스톨(stall) 제어 방식과 피치(pitch)각 제어방식으로 나눌 수 있다. 스톨 제어는 일정 풍속 이상에서 스톨이 발생하도록 날개를 제작하여 스톨 발생 이상의 풍속에서는 실속이 일어나 회전수가 제어되는 방식으로 원리 및 구조가 단순하지만 정격출력 상태에서 출력에 요동이 발생하는 단점이 있다. 이에 반하여 피치각 제어방식은 정격풍속 이하의 풍속일 때 최대출력을 내도록 제어하고, 정격풍속 이상에서는 일정출력을 내도록 제어하는 방식으로서 기계적인 복잡성은 있으나 제어성능이 양호하기 때문에 풍력발전 시스템의 제어방식으로 널리 이용되고 있다. 이러한 피치각 제어는 회전날개의 피치각을 변화시킴으로써 발생하는 토오르크를 조절하여 변화하는 풍속에 대해 풍력발전 시스템의 출력을 일정하게 유지하는 것이다.

본 논문에서는 계통에 연계된 풍력발전시스템의 최대출력 제어문제를 다룬다. 풍차의 최대출력 제어알고리즘에 따른 풍차의 출력, 회전속도, 출력계수 및 주속비의 변화와 풍속의 상관관계를 그래프로 제안하고자 하며, 또한 풍력발전시스템의 최대출력을 제어하기 위한 피치각제어기와 생산된 최대출력을 계통에 공급되도록 하는 전력제어기를 제안하고자 한다. 피치각제어기는 풍차의 최대출력 추종을 유지할 수 있도록 풍차날개의 피치각제어를 수행한다. 풍속의 변화에 따른 풍차의 회전속도 기준값을 계산하며 이것을 풍차의 실제 회전속도와 비교하여 PI제어기에 의해 피치각 제어가 이루어지도록 한다. 전력제어기는 풍차에서 생성된 최대출력이 계통에 공급되기 위해 전력변환장치인 인버터의 점호각 제어를 수행한다. 시뮬레이션을 통하여 풍속의 변화에 따른 발전기의 출력, 발전기의 회전각과 속도 및 피치각의 변화를 살펴봄으로써 제어기의 효용성을 입증하고자 한다.

2. 최대출력 제어 알고리즘

바람이 가지는 풍력에너지에서 풍차가 흡수하는 전력( $P_m$ )은 다음과 같이 표시된다.[7, 8]

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{1}$$

여기서,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]는 공기의 밀도이며,  $A$  [m<sup>2</sup>]는 풍차의 날개가 회전하며 만드는 면적이며,  $v$  [m/sec]는 풍속이며,  $C_p$ 는 풍차의 출력계수(power coefficient)이며,  $\beta$ 는 풍차날개의 피치각이며, 그리고  $\lambda$ 는 주속비(tip-speed ratio)로서 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda = \frac{\text{회전하는 풍차날개끝의 속도}}{\text{풍속}} = \frac{w_m R}{v} \tag{2}$$

여기서,  $w_m$  [rad/sec]은 풍차의 회전속도이며,  $R$  [m]은 풍차날개의 반지름이다.

풍차의 특성은 풍차의 출력계수( $C_p$ )와 주속비( $\lambda$ ) 사이의 상관곡선으로 나타나며 그러한 곡선의 한 예가 그림 1에 주어지고 있다.[9]

$$C_p = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{20.24}{\lambda_i}} \tag{3}$$

여기서,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{4}$$

정속(constant speed)으로 운전되는 경우, 풍차의 회전속도가 일정하게 유지되어야 하기 때문에 식(2)에 의하면 풍속의 변화에 따라 주속비도 크게 변하게 된다. 이 주속비의 변화는 곧 출력계수와 풍차의 출력( $P_m$ )의 변화를 유발하게 된다. 따라서 풍속의 변화에 대응하여 항상 가능한 최대출력을 얻는 것이 정속운전의 경우에는 불가능하게 된다.

변속(variable speed)운전의 경우, 풍속의 변화에 대응하여 풍차의 회전속도를 조절할 수 있기 때문에 주속비를 최적의 출력계수를 유지할 수 있으며 따라서 최대출력을 추적하며 운전할 수 있게 된다. 따라서 풍속의 변화에 따라 항상 최대출력을 얻기 위해서는 변속운전이 필요하게 된다.

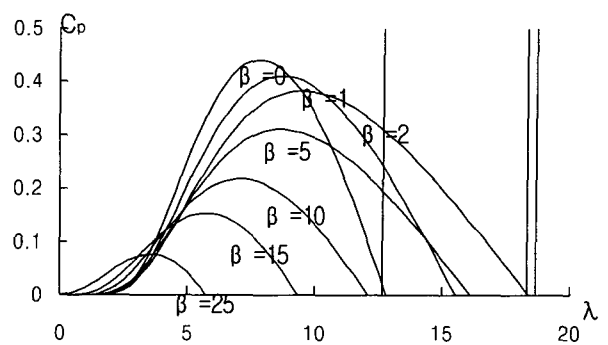


그림 1 풍차의 출력계수(Cp)와 주속비(lambda) 사이의 특성 곡선

Fig. 1 Cp -lambda characteristic curve of a wind turbine.

한편, 실제에 있어서는 풍력발전 시스템의 기계적인 제약, 혹은 전기적인 제약으로 인하여 풍속의 변화에 의한 풍차의

운전에 한계가 있게 된다. 이러한 한계를 고려하여 그림 2는 풍속의 변화에 따른 풍차의 운전 모드를 제시하고 있으며, 풍차의 출력, 회전속도, 출력계수 및 주속비의 변화와 풍속과의 상관관계를 규정하고 있다. 여기서  $v_{ci}$ 는 발전 개시 풍속 [4 m/sec]이며,  $v_r$ 는 정격출력을 생산하는 풍속 [13 m/sec]이며,  $v_{co}$ 는 발전설비 보호를 위해 발전을 멈추어야 하는 풍속 [24 m/sec]이다.

제어 알고리즘은 크게 두 영역으로 나누어지는데 첫째로 일정 출력계수(*Constant  $C_p$* ) 영역과 일정 출력(*Constant Power*) 영역으로 나누어지는데 정격출력미만의 풍속에서는 일정출력계수로 운전되며, 정격출력 이상의 풍속에서는 일정출력을 계통에 공급하는 구조로 운전되어 출력계수가 작아지게 된다. 풍속이 발전 개시 풍속 이상이 되면 풍차는 발전을 수행하여 전력을 계통에 공급하게 된다. 이 경우 시스템은 일정 출력계수 영역으로 들어가며 항상 최대출력 운전점을 추적하게끔 운전된다. 출력은 풍속의 세제곱에 비례하여 증가하며 풍차의 회전속도는 선형적으로 증가한다. 풍속이 계속하여 증가하면 풍차의 회전속도는 최대 허용출력에 도달하게 된다. 최대 허용출력은 풍차 혹은 발전기 등에 의해 결정되는 것이다. 출력한계에 도달하면 출력을 일정하게 유지하기 위해 풍차의 회전속도는 감소하여야 하며 이 때 풍차의 회전속도가 선형적으로 감소하는 것은 아니다. 이에 따라

풍차는 낮은 출력계수 값에서 운전하게 되며 이 경우 풍차가 일정출력을 유지하기 위해 출력계수는 풍속의 세제곱에 반비례하게 변하게 된다.

### 3. 풍력발전 시스템과 모델링

그림 3은 제어를 포함한 풍력발전 시스템의 구조를 표시하고 있다. 풍차는 MOD-2 시스템이며 바람이 운전영역내의 속도일 때 풍차가 회전하며 날개의 토크는 기어를 거쳐 발전기 축으로 전달된다. 편주(yaw) 제어는 언제나 바람이 부는 방향으로 풍차가 향하도록 하는 제어로 본 연구에서는 언제나 풍차가 바람이 불어오는 방향으로 향한다고 가정한다. 발전기는 4극, 정격 2.5MW, 3상, 60 Hz 4.16 kV의 출력을 계통에 공급하는 동기발전기이다. 이 발전기에 의해 기계에너지가 전기에너지로 변환되며 이 전기에너지는 계통에 바로 공급되지 않고 3상 브리지 정류기를 통하여 직류로 변환된다. 이것은 다시 계통에 정주파수 공급 및 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해 3상 브리지 인버터에 의해 교류로 변환되며 변압기를 거쳐 계통전압에 맞게 전압을 높여서 계통에 연결하게 된다.

다음은 풍력발전 시스템의 모델을 나타내하고자 한다. 그림 4에서 보여주는 것처럼 풍차는 기어부분을 거쳐 발전기의 회전축에 연결된다. 따라서 풍차와 발전기의 회전 시스템은 다음과 같이 간단한 회전운동 방정식으로 나타낼 수 있다.[10, 11]

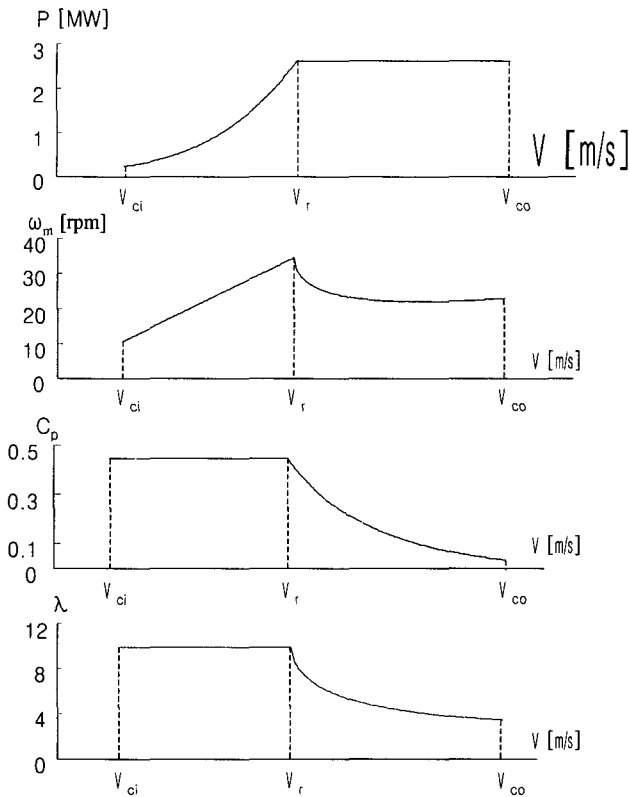


그림 2 한계를 고려한 풍차의 운전 모드.  
Fig. 2 Operational modes of a wind turbine considering limits.

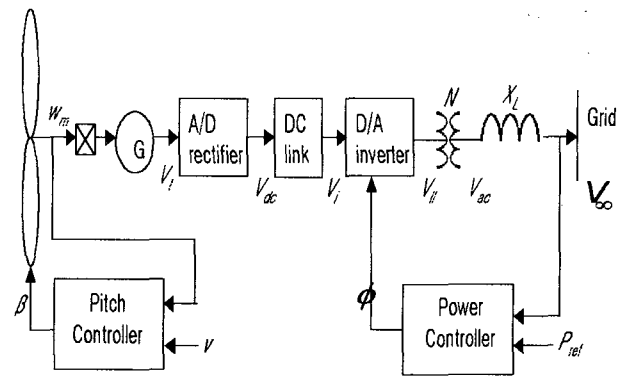


그림 3 계통에 연계된 풍력발전 시스템 구조.  
Fig. 3 Configuration of a grid-connected wind energy conversion system.

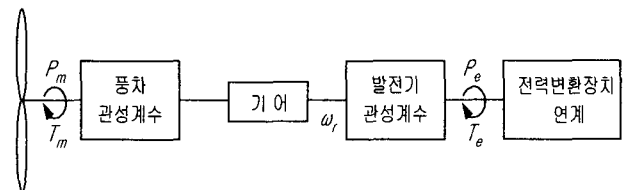


그림 4 풍차와 발전기의 회전 시스템.  
Fig. 4 Rotational system of wind turbine and generator.

$$\left(\frac{J_m}{n^2} + J_e\right) \frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{D_m}{n^2} + D_e\right) \omega_r = \frac{T_m}{n} - T_e \quad (5)$$

또는

$$\omega_r \left(\frac{J_m}{n^2} + J_e\right) \frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{D_m}{n^2} + D_e\right) \omega_r = \frac{P_m}{n} - P_e \quad (6)$$

여기서,  $\omega_r$ [rad/sec]는 발전기 회전자 축의 회전속도이며,  $n$ 은 기어비이며,  $J_m$ [kgm<sup>2</sup>]은 풍차의 관성계수이며,  $J_e$ [kgm<sup>2</sup>]는 발전기 회전자의 관성계수이며,  $D_m$ [Nm/rad]은 풍차의 마찰계수이며,  $D_e$ [Nm/rad]는 발전기의 마찰계수이며,  $T_m$ [Nm]은 풍차의 기계적인 토크이며, 그리고  $T_e$ [Nm]는 발전기 회전자축에 적용되는 토크이다.

그리고 동기발전기의 동특성을 나타내는 방정식으로 다음과 같이 간략화된 모델을 사용하였다.[12]

$$T_{do} \frac{d}{dt} |E'_a| + |E'_a| = E_{fd} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } |E'_a| = \frac{\omega_0 M_F}{\sqrt{2} L_F} \lambda_F, |E_a| = \frac{\omega_0 M_F}{\sqrt{2}} i_F, E_{fd} = \frac{\omega_0 M_F}{\sqrt{2} r_F} v_F,$$

$T_{do}$ [sec]는 무부하 과도상태 시정수이며,  $L_F$ 는 발전기 계자권선의 자기인덕턴스이며,  $M_F$ 는 계자권선과 전기자권선의 상호인덕턴스이며,  $r_F$ 는 계자권선의 저항이며,  $\lambda_F$ 는 계자권선의 쇠교자속이며,  $i_F$ 는 계자권선의 전류이며, 그리고  $v_F$ 는 계자권선에 인가되는 전압이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 컨버터 부분은 정류기, DC 링크, 인버터, 그리고 연계변압기 등으로 구성된다. 정류기는 가변주파수의 전압을 DC로 변환한다. 정류기 출력단의 DC 전압( $V_{dc}$ )은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_1 \cos \alpha \quad (8)$$

여기서,  $V_1$ 는 발전기 출력단의 선간전압이며,  $\alpha$ 는 정류기 스위칭의 지연각이다. 본 논문에서는 지연각( $\alpha$ )을 제어하지 않으며 0의 값을 가정하였다.

한편, 인버터는 DC전압을 정격주파수의 AC전압으로 변환하며 출력단 전압의 크기는 다음과 같이 나타낸다.

$$V_{II} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) V_i \cos \delta \quad (9)$$

인버터 출력단의 변압기는 풍력발전시스템과 계통과의 분리를 가능하게 하며 또한 계통연계에 적당한 전압크기로 조절하는 역할을 한다. 계통전압( $V_\infty$ )과 인버터 출력단 전압의 위상각차( $\phi$ )를 제어변수로 도입하면 인버터 출력단에서 계통에 유입되는 유효전력은 다음과 같이 표시되며 따라서 위상각차를 제어하여 계통에 유입되는 유효전력을 조절할 수 있게 된다.

$$P_{ac} = \frac{|V_{ac}| |V_\infty| \sin \phi}{X_L} \quad (10)$$

#### 4. 제어기 모델

이 장에서는 풍력발전시스템의 최대출력을 제어하기 위해 제안된 피치각제어기와 전력제어기의 모델을 나타내고자 한다. 피치제어기의 목적은 풍속이 정격 미만일 경우 가능한 최대의 전력을 풍차가 흡수하도록 하며, 풍속이 정격 이상일 경우 풍차가 항상 정격출력을 흡수하도록 하는 것이다. 이것을 위하여 풍속이 정격이상이면 풍차날개의 피치각을 조절하여 풍차가 흡수하는 전력을 제어하여야 한다. 이러한 피치각 제어모델이 그림 5에 주어지고 있다. 풍속의 변화에 따라 발전기 회전속도의 목표치를 계산하며 이 값을 측정치와 비교하여 오차신호를 생성한다. 이 오차신호는 PI제어기를 거쳐 피치각 제어를 수행한다. 피치각은 전기-기계적인 작동장치(actuator)에 의해 제어되며 본 연구에서는 1차식으로 모델링되었다. 그림 5에는 두 개의 적분기가 존재하며 적분기 출력단을 상태변수로 삼으면 동특성을 나타내는 상태방정식이 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta u}{dt} = K_{Ia}(\Delta \omega_m - \Delta \omega_{ref}) \quad (11)$$

$$\frac{d\Delta \beta}{dt} = \frac{1}{\tau_\beta} (\Delta u + K_{Pa} \Delta \omega_m - K_{Pa} \Delta \omega_{ref} - \Delta \beta) \quad (12)$$

전력제어기는 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급할 수 있도록 인버터를 제어하는 것을 목적으로 한다. 그림 6은 PI제어기를 이용하여 최대전력을 계통에 공급하는 전력제어기의 모델을 보여주고 있다. 식(1)에서 주어지는 것처럼 풍차가 흡수하는 전력은 풍속과 출력계수의 함수이다. 그림 1의 관계곡선을 이용하면 풍속의 변화에 대한 풍차가 흡수하

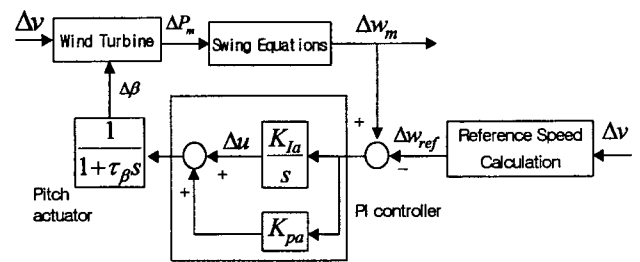


그림 5 피치각 제어를 위한 모델.  
Fig. 5 Model for pitch angle control.

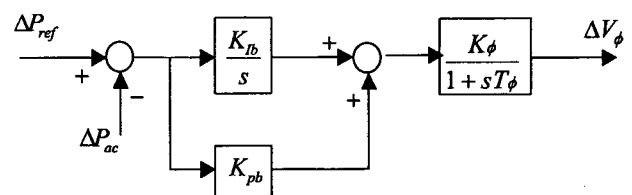


그림 6 인버터 스위칭 제어를 위한 모델.  
Fig. 6 Model for inverter switching control.

는 최대전력을 기준전력으로 하여 인버터의 출력과 비교하게 된다. 이 비교에서 생기는 오차신호는 인버터 스위칭의 지연각( $\psi$ )을 변화시키게 된다. 결국 인버터 스위칭의 지연각을 변화시킴으로써 계통으로 공급되는 전력은 이용가능한 최대 풍력에너지를 이용하게끔 제어된다. 그림 6에 주어지는 전력제어기의 동특성은 다음과 같다.

$$\frac{d\Delta c}{dt} = K_{fb}(\Delta P_{ref} - \Delta P_{ac}) \quad (13)$$

$$\frac{d\Delta V_{\psi}}{dt} = \frac{1}{T_{\psi}} [K_{\psi}(\Delta c + K_{pb}\Delta P_{ref} - K_{pb}\Delta P_{ac}) - \Delta V_{\psi}] \quad (14)$$

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 5.1 사례연구 1

앞의 3장과 4장에 제시된 풍력발전시스템과 제어기의 모델은 미분방정식으로 표현되며 이 모델을 이용하여 풍속의 변화에 따른 폐루프(closed loop) 시스템의 응답을 볼 수 있다.

사례연구 1에서는 정격풍속 12 m/s에서 운전되고 있는 풍차가 풍속이 18 m/s로 증가했을 때 발전기의 회전자각, 각속도, 피치각, 그리고 전기적 출력의 모의 결과를 보여주고 있다. 그림 7과 그림 8에서는 발전기의 회전자각과 각속도 변화에 대해 보여주고 있다. 풍속이 증가하면 풍차의 기계적인 입력이 상승하게 되며 이것이 회전자를 가속하게 한다. 이 구간에서는 정출력을 위해 피치제어가 수행됨에 따라 피치각은 그림 9에서와 같이 변하며, 그림 10에서는 풍속이 정

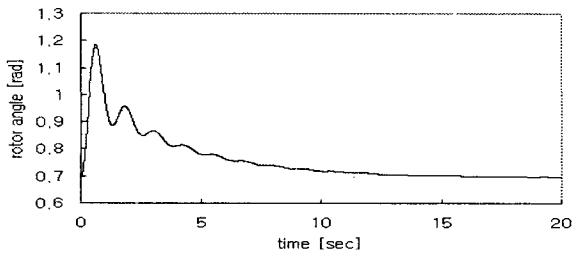


그림 7 발전기 회전자각의 변화.  
Fig. 7 Variation of generator rotor angle.

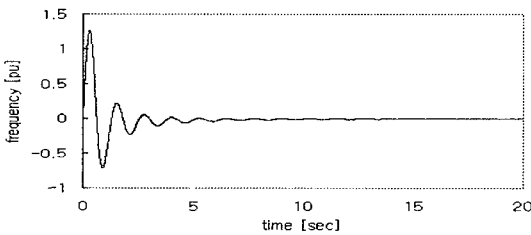


그림 8 발전기 각속도의 변화.  
Fig. 8 Variation of generator angular speed.

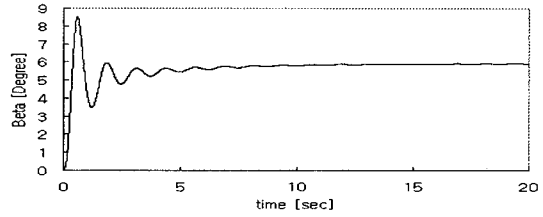


그림 9 피치각의 변화.  
Fig. 9 Pitch angle variation.

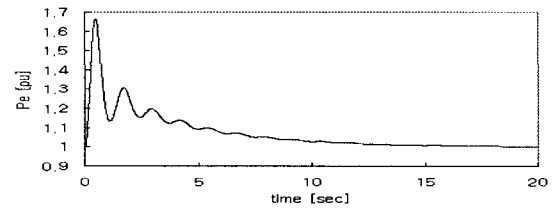


그림 10 발전기 유효전력의 변화.  
Fig. 10 Variation of generator's real power output.

격을 초과하였으므로 발전기의 출력이 피치각 제어기에 의해 1pu로 수렴하고 있음을 보여주고 있다.

#### 5.2 사례연구 2

사례연구 2에서는 제시하는 제어기를 검증하고 풍력발전시스템의 성능을 평가하기 위해 풍속이 그림 11과 같이 변화하는 경우에 대해서 발전기의 회전자각, 각속도, 피치각, 그리고 전기적 출력의 모의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 약 8초까지는 정격이하의 풍속에서 운전되고 그 이후부터는 정격을 초과하는 영역에서 운전될 것임을 알 수 있다. 그림 12과 그림 13에서는 풍속의 변화에 따라 발전기 회전자각과 각속도 변화를 보여주고 있다. 그림 14는 피치각 변화를 보여주고 있으며 8초 이후에는 정격을 초과하는 풍속이므로 피치각 제어가 동작하여 흡수되는 풍력에너지를 감소시켜 정격출력을 생산하게 된다. 그림 15에서는 발전기의 유효전력 변화를 보여주고 있다. 풍속이 낮은 영역에서 출력의 변화는 그리 크지 않은데 반하여 풍속이 정격이상인 경우 출력의 변화가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

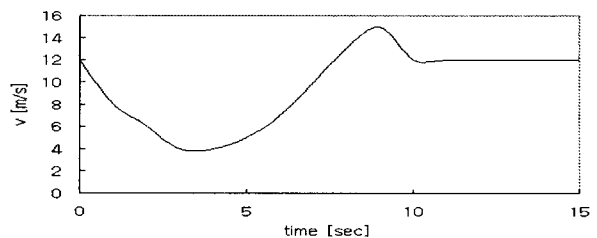


그림 11 풍속의 변화.  
Fig. 11 Wind speed variation.

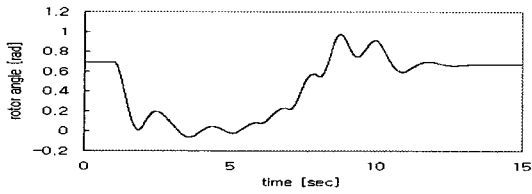


그림 12 발전기 회전각의 변화.  
Fig. 12 Variation of generator rotor angle.

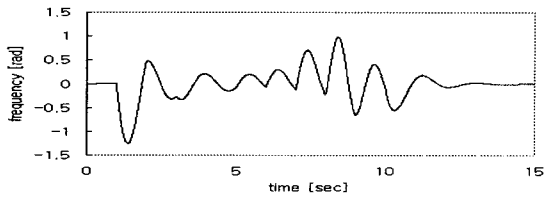


그림 13 발전기 각속도의 변화.  
Fig. 13 Variation of generator angular speed.

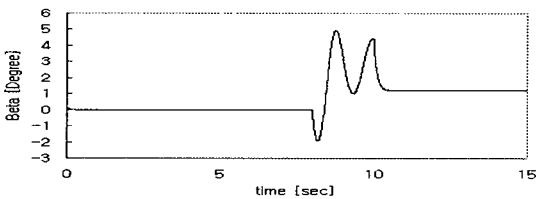


그림 14 피치각의 변화.  
Fig. 14 Pitch angle variation.

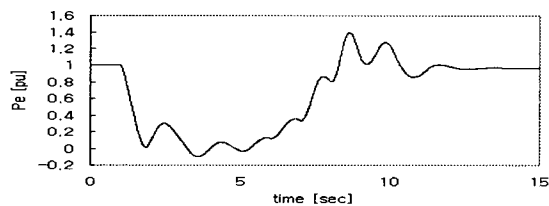


그림 15 발전기 유효전력의 변화.  
Fig. 15 Variation of generator's real power output.

### 6. 결 론

본 논문은 가변 회전속도 계통연계 풍력발전시스템의 최대 출력 제어를 위한 PI 제어기의 모델링과 시뮬레이션 결과를 제시하고 있다. 먼저 그래프 형태로 최대출력 제어 알고리즘에 따라 운전되는 풍차의 제특성과 풍속과의 상관관계를 밝혀 내었다. 제안하는 제어기는 풍차가 최대출력을 추종할 수 있도록 하는 피치각 제어기와 생산된 최대출력을 계통에 공급되도록 하는 전력제어기로 구성되었다. 피치각 제어기는 정격 풍속 이상에서 PI 제어기를 이용한 피치제어에 의해 정출력을 계통에 공급하고 정격 미만의 풍속에서는 일정하게

최대 출력계수로 운전되는 것을 목적으로 동작하였으며 전력 제어기는 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급할 수 있도록 인버터를 제어하였다. 풍속의 변화에 대해 발전기의 회전각, 각속도 및 전기적 출력의 변화에 대한 시뮬레이션 결과로써 제안하는 제어기의 효용성을 입증하고 있다. 한편 PI 제어기를 적용한 결과보다 더 나은 성능을 나타내기 위해 새로운 제어기에 대한 연구가 수행중이다.

본 연구에서 제시한 풍력발전 시스템의 최대출력 제어를 위한 피치제어는 앞으로 상용화될 풍력에너지의 효율적인 이용을 위해 시스템에 적용될 가능성이 유력한 것으로서 대체 에너지로서의 풍력발전기술 활성화에 기여할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Stenbuch, Optimal Multivariable Control of a Wind Turbine with Variable Speed, Wind Engineering Vol. 11, No. 3 1987, pp. 153-163.
- [2] O. Wasynczuk, D.T. Man and J.P. Sullivan, Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators during Random Wind Fluctuations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6 June 1981, pp 2837-2845.
- [3] R. Chedid, F. Mrad and M. Basma, Intelligent Control of a Class of Wind Energy Conversion Systems, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999, pp 1597-1604.
- [4] A. Murdoch et al., Control Design and Performance Analysis of a 6 MW Wind Turbine Generator, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.5, May 1983, pp 1340-1347.
- [5] W. E. Leithead, S. de la Salle and D. Reardon, Role and Objectives of Control for Wind Turbines, IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. 2, March 1991, pp 135-148.
- [6] E. Muljadi, C. P. Butterfield and P. Migliore, Variable Speed Operation of Generators with Rotor-Speed Feedback in Wind Power Applications, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 118, November 1996, pp 270-277.
- [7] E.N. Hinrichsen and P.J. Nolan, Dynamics and Stability of Wind Turbine Generators, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.

PAS-101, No. 8, June 1981, pp. 2640-2648.

[8] E. Muljadi et al., Variable Speed Operation of Generators with Rotor-Speed Feedback in Wind Power Applications, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 118, November 1996, pp. 270-277.

[9] Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons, 1998.

[10] Z. Chen, S. Arnalte Gomez and M. McCormick, A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems, Power Electronics and Variable Speed Drives, Sept. 2000, pp. 114-119.

[11] Y.D. Song, B. Dhinakaran and X. Bao, Control of Wind Turbines using Nonlinear Adaptive Field Excitation Algorithms, Proceedings of American Control Conference, Chicago, June 2000, pp. 1551-1555.

[12] A.R. Bergen and V. Vittal, Power System Analysis, Prentice Hall, 2000.

## 저 자 소 개



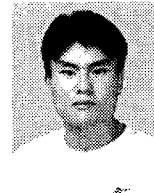
### 노 경 수 (盧 炘 洙)

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(공학). 현재 동국대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 02) 2260-3346,

Fax : 02) 2260-3346

E-mail : ksro@dgu.ac.kr



### 류 형 수 (柳 衍 秀)

1974년 9월 18일생. 1999년 동국대 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 LG산전 전력시험기술센터 (PT&T) 신뢰성시험연구팀 연구원

Tel : 043) 261-6591

Fax : 043) 261-6631

E-mail : hsryu@lgis.com