

가변 풍력발전 시스템의 최대출력 제어를 위한 Fuzzy 제어기 설계

論 文

53D-11-3

A Fuzzy Logic Controller Design for Maximum Power Extraction of Variable Speed Wind Energy Conversion System

金載坤* · 許旭烈† · 金丙倫**

(Jae-gon Kim · Uk-youll Huh · Byung-yoon Kim)

Abstract - This paper presents a modeling and simulation of a fuzzy 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 :Fuzzy Logic, Wind Energy Conversion System(WECS), Pitch Control.

1. 서 론

지난 20세기 동안 인류의 문명과 기술발전에 크게 공헌해 온 화석연료에너지원의 감소는 우리의 일상생활에 위협요소로 다가오고 있으며, 아울러 무한한 에너지원으로 생각했던 원자력 발전 또한 쉽게 받아들일 수 없는 에너지원이다. 이러한 측면에서 풍력발전은 무한한 풍력자원을 이용한 무공해 에너지원으로 최근 전 세계적으로 관심이 고조 되고 있으며, 다가오는 에너지 문제를 해결하기 위해서는 화석연료 에너지원을 보다 효율적으로 이용함과 동시에 대체에너지원의 이용을 높이는 기술개발이라고 할 수 있겠다. 따라서 전 세계에서는 1970년대 에너지 위기 이후 학문적 이론을 바탕으로 신기술의 도입과 집중투자에 의해 소형에서 수 MW급 발전시스템에 이르기 까지 많은 연구결과를 남겼다, 이러한 연구결과들은 상업화로 이어져 그 수요가 날로 증가하고 있으며 여러 나라에서 자체 개발 연구에 노력하고 있다.

풍력발전은 블레이드에 의해서 풍력에너지를 기계적 에너지로 변환하는 과정이 필요하다. 따라서 풍력터빈에 의해서 기계적 에너지로 변환되는 과정에 대한 고찰이 필요하며, 에너지의 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력전달부 등의 기계적인 부분과 발전기 전력변환회로 등의 전기적인 부분의 각각에 대한 이해도 필요하다, 또한 바람이 갖는 속도의 크기나

방향은 상당히 동적인 특성을 지니고 있기 때문에 단시간의 풍황 자료만으로는 그 지역의 풍황 특성을 예측하기 곤란하며, 동시에 그 지역에 가장 적절한 시스템의 설계에도 많은 제한을 갖기 때문에 이에 대한 고찰 또한 필요하다.

또한 풍력에너지는 바람의 속도와 방향이 지속적으로 바뀌고 있어 동력원으로서의 전환에 많은 기술이 요구됨에 따라, 생산가격이 상대적으로 높다는 단점이 지적되고 있다. 그러나 최근에는 전력전자 기술의 발달과 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.

풍력 발전기술의 연구동향을 살펴보면, Steinbuch는 310 kW 수평축 풍차가 동기발전기를 거쳐 컨버터를 통하여 계통에 연계된 풍력발전시스템에 최적제어기를 적용하였다.[1] Waszynuk 등은 MOD-2 풍차가 동기발전기를 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 제어기가

풍차의 동특성에 미치는 영향을 폭넓게 분석하였으며 풍차의 가변 피치제어의 필요성을 역설하였다.[5] Muljadi 등은

† 교신저자, 正會員 : 仁河大學 電氣學科 教授 · 工博
E-mail : uyhuh@inha.ac.kr

* 正會員 : 仁河大學 電氣學科 碩士課程

** 正會員 : 仁河大學 電氣學科 博士課程

接受日字 : 2004年 7月 13日

最終完了 : 2004年 9月 4日

실제 풍속데이터를 채취하여 전력전자 기술을 이용한 유도발전기의 가변속도 제어전략을 제시하였다[6], 이와 같이 풍력 발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수 MW급 풍력 발전 시스템을 상용화하였다. 특히, 중대형 상용 시스템에서는 에너지 변환 효율을 높이기 위하여 가변속도 운전이 가능한 권선형 유도 발전기나 동기기를 주로 사용하고 있다. 국내에서도 몇몇 연구 기관을 중심으로 풍력 발전 시스템의 국산화 연구개발이 진행되고 있다. 한편 정부의 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도등 여러 지역에 중대형 외국 시스템들이 도입되어 설치·운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 보여주었으나 시스템 수입에 따른 고비용과 풍향에 따른 운전 효율 및 계통연계 방식에 대한 기술적 검토가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 풍력발전 시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서 블레이드와 동력전달부등 풍력발전시스템 각각부분의 특성을 모의 하였다, 특히 가변 하는 풍속에 대하여 풍차의 회전속도와 실제 풍속을 입력으로 하는 Fuzzy 제어를 설계하여 피드백제어가 이루어지도록 하였으며, 동기발전기의 여자제어를 통하여 출력전압을 일정하게 유지하도록 설계하였다. 또한 생산된 출력을 계통에 안정하게 공급하기 위하여 인버터의 점호각제어를 수행 하였다. MATLAB를 이용한 시뮬레이션을 통해 풍속의 변화에 따른 발전기의 출력, 각속도 및 피치각의 변화와 출력계수의 변화를 관측함으로써 설계한 제어기의 효용성을 검증 하였다

2. 풍력발전 시스템의 특성

2.1.1 풍력터빈의 공기역학적 특성

풍력은 일시적이고 변화기 쉬운 에너지원이다, 풍속은 어떤 지역인지 그리고 방향과 규모에 따라 불규칙하며 또한 폭풍, 경사면 바람, 여러 가지 요소에 의해 변화하는 특성을 가진다. 이에 풍력에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 장치가 필요하다. 풍력터빈은 크게 수평형과 수직형으로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 수평형 터빈을 대상으로 한다, 풍력터빈은 Rankine[1865]에 의해서 최초로 개발되어 Froude[1889]에 의해 개선되었다, [그림1]은 유체유동의 검사체적에 대해서 유동에 의해 날개의 회전면에 작용하는 힘을 계산하는 것으로 풍력터빈의 특성을 이론적으로 계산할 때 많이 사용하는 이론이다.

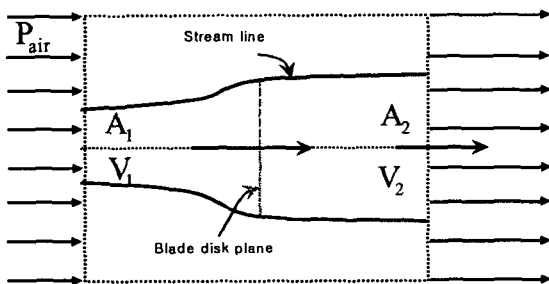


그림 1 검사체적을 사용한 유체 해석
Fig. 1 A fluid analysis using overhaul volume

여기서 질량 m[kg]인 공기의 풍속이 v[m/s] 일 때 유체가 갖는 운동에너지 E는 식(2-1)과 같고,

$$E = \frac{1}{2} mV^2 [J] \tag{2-1}$$

이때 공기가 갖는 풍력은 식(2-2)와 같이 정의 된다

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3 [W] \tag{2-2}$$

여기서 $\rho[kg/m^3]$ 는 공기의 밀도, $A[m^2]$ 는 풍력 터빈의 회전 단면적이다, 식(2-2)은 풍속에 의해서 발생할 수 있는 이상적인 풍력이고 실제로 터빈에 일정속도의 바람이 도달 후 풍력에너지가 100% 기계적 에너지로 변환한다면 터빈 뒷단의 풍속이 0으로 감소하나 이는 공역학적으로 불가능 하다. 따라서 풍력터빈에 의해 기계적인 출력으로 흡수되는 풍력은 [그림1]과 같이 터빈의 회전자 에서 풍력의 감소분에 해당한다. 실제로 풍력터빈에 의한 기계적 출력은 상류풍속과 하류풍속 사이에 차에 해당된다, 풍력터빈에 의해서 발생하는 기계적 출력은 식(2-3)과 같다.

$$P = \frac{1}{2} [\rho A \frac{v_1 + v_2}{2}] (v_1^2 - v_2^2) \tag{2-3}$$

여기서 $V_1[m/s]$ 은 상류 풍속, $V_2[m/s]$ 는 하류 풍속이다, 식 (2-3)은 식(2-4)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2} [\rho A \frac{v_1 + v_2}{2}] (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p \tag{2-4}$$

여기서 C_p 는 풍력터빈의 출력계수 혹은 회전자 효율로 정의된다. 식(2-4)는 풍력터빈에 의해서 변환되는 기계적인 출력을 나타내는 식으로 상류출력의 일부분이 풍력터빈에 의해서 획득됨을 보여준다. C_p 값은 주어진 상류풍속의 V_1 과 하류풍속 V_2 의 비에 의해서 결정되고 이론적으로 하류풍속이 상류 풍속의 $\frac{1}{3}$ 일 때 최대값 0.593을 가진다. 이는 식(2-4)이 최대출력을 가지기 위한 미분한 값이 0이 되는 조건을 구하면 알 수 있다.

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho A [V_1^3 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] = 0 \tag{2-5}$$

따라서 $V_2 = V_1/3$ 이 된다, 이 조건을 식 (2-4)에 대입하면 최대 출력은 식(2-6)과 같이 구할 수 있다

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A v_1^3 \tag{2-6}$$

최대 회전자 효율은 식(2-7)과 같다

$$C_{pmax} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = 0.593 \tag{2-7}$$

여기서 최대 출력 계수를 Betz의 계수라고도 한다. 이 최대출력 계수는 이론적으로 발생할 수 있는 값이고 실제적으로는 C_{pmax} 가 0.5이하의 값을 가진다, 2블레이드 타입의 고속 터빈의 경우 일반적으로 0.5이하의 값을 가지고 저속의 터빈의 경우는 0.2~0.4의 값을 가진다. 풍력터빈의 특성은 터빈의 전력계수 C_p 와 주속비의 곡선에 의해서 주어진다. 주속비는 식(2-9)과 같이 정의 된다. 본 연구에서 사용된 출력계수 (C_p)를 다음과 같은 식으로 정의하였다.

$$C_p = (0.44 - 0.167\beta) \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{7.5 - 0.15\beta} \right] - (\lambda - 3)(0.00164\beta) + 0.1646 \quad (2-8)$$

$$\lambda = \frac{w_m R}{V} \quad (2-9)$$

여기서 λ 는 주속비 이며, w_m 은 풍차의 회전 속도 [rad/sec], R은 풍차의 반지름[m], V는 풍속[m/sec]으로 정의 된다. 출력계수와 주속비의 곡선은 풍차의 종류에 따라 다른 형태의 특성을 나타냄을 아래의 [그림2]을 통해 알 수 있다.

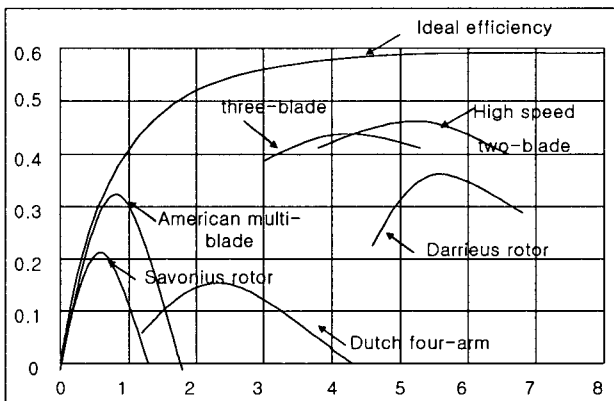


그림 2. 풍차의 종류에 따른 출력계수와 주속비 특성
Fig. 2. A characteristic between wind turbine and pitch angles according to the type of windmill

이상과 같이 위식들을 정의하면 풍력터빈에 의해서 발생하는 기계적인 출력은 (2-10)과 같이 정의된다. 이는 출력계수 (C_p)와 주속비(λ)의 함수로 정의됨을 보여 준다.[7]

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{w_m}{\lambda} \right)^3 A C_p(\lambda, \beta) \quad (2-10)$$

이를 바탕으로 풍차에서 얻는 이상적인 출력으로 풍속에 대한 그래프를 나타내었고, 아울러 출력계수(C_p)값을 고려한 풍력발전기의 출력을 그래프로 나타냈었다. 아래의 그림은 본 논문에서 사용한 풍력 터빈의 특성을 도시 하였다. [그림 3]은 출력계수와 피치각, 주속비의 상관관계를 도시 하였으며, [그림4]는 출력, 피치각, 풍차의 회전속도와와의 상관관계를 도시 하였다.

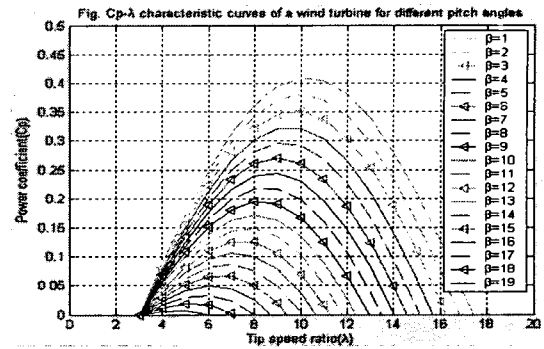


그림 3. 피치각과 주속비 출력계수와의 관계곡선
Fig. 3. Cp -lambda characteristic curve of a wind turbine

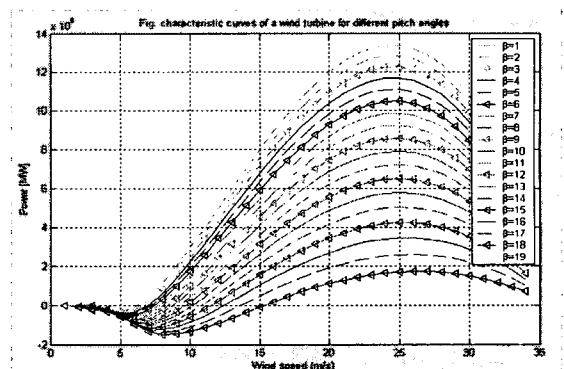


그림 4. 피치각과 풍속, 출력과의 관계곡선
Fig. 4. Characteristic curves of pitch angles, wind speed and output power

2.2. 풍력발전 시스템과 모델링

그림 3.1은 제어기를 포함한 풍력발전 시스템의 구조를 보여주고 있다. 풍차는 기어를 통해 발전기와 연결 된다. 본 연구에서는 풍차가 언제나 바람이 불어오는 방향으로 향한다고 가정하고 풍차의 종류는 수평형이며, 발전기는 6극, 정격 6 MW, 3상, 60Hz, 5.5 KV의 출력을 계통에 공급하는 동기발전기이다. 이 발전기에 의해 기계적인 에너지가 전기적인 에너지로 변환되며 이 전기 에너지는 계통에 바로 공급되지 않고 계통연계시스템에 의해 계통에 연결하게 된다

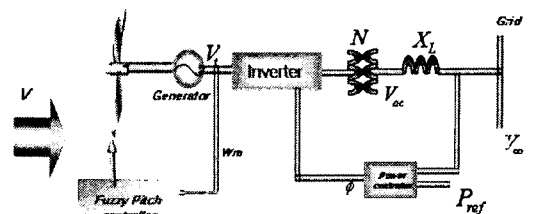


그림 3.1. 계통에 연계된 풍력발전시스템 구조
Fig. 3.1. Configuration of a grid-connected wind energy conversion system

또한 풍차는 기어부분을 거쳐 발전기의 회전자에 연결된다. 따라서 풍차와 발전기의 회전 시스템은 다음과 같이 간단한 회전운동 방정식으로 나타낼 수 있다.[10, 11]

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

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, ω_r [rad/sec]은 발전기 회전자 축의 회전속도이며, n 은 기어비이며, J_m [kgm²]은 풍차의 관성계수이며, J_e [kgm²]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 같은 모델을 사용하였다.[12]

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

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

T_{do} [sec]는 무부하 과도상태 시정수이며, L_F 는 발전기 계자 권선의 자기인덕턴스이며, M_F 는 계자권선과 전기자권선의 상호인덕턴스이며, r_F 는 계자권선의 저항이며, λ_F 는 계자권선의 쇄교 자속이며, 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.

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

여기서, V_i 는 발전기 출력단의 선간전압이며, α 는 정류기 스위칭의 지연각이다. 본 논문에서는 지연각(α)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 분리 가능성을 하며 또한 계통연계에 적당한 전압크기로 조절하는 역할을 한다. 계통전압(V_∞)과 인버터 출력단 전압의 위상각차(ϕ)를 제어변수로 도입하면 인버터 출력단에서 계통에 유입되는 유효전력은 다음과 같이 표시되며 따라서 위상각차를 제어하여 계통에 유입되는 유효전력을 조절할 수 있게 된다.

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

3. 풍력발전 제어시스템

3.1 풍력발전기의 운전 모드

회전자의 속도는 다음의 4가지 영역으로 나눌 수 있다, 이는 더 많은 에너지를 얻고, 높은 풍속으로부터 로터, 발전기, 전력전자장치 등을 보호한다, 또한 부하가 갑자기 차단되었을 경우 제어 장치가 없다면 발전기의 로터 속도는 급격히 증가하여 기계부가 파괴됨을 막기 위해서 운전모드를 나누어서 운전한다.

- ① Cut-in speed : 전력을 생산하기 위해 풍차가 기동하는 속도, 이 속도 이하일 경우 풍차를 운전하는 것이 오히려 비효율적이다.
- ② constant maximum Cp : 풍속의 변화에 따라 회전자의 속도가 변화는 영역으로 TSR은 일정하며 최대 출력계수로 운전된다.
- ③ constant output : 풍차는 발전기와 전력변환장치를 과부하로부터 보호하기 위해 일정출력으로 운전된다. 이것은 로터의 속도를 줄임으로써 가능해진다. 전기적인 부하를 증가시켜 속도가 감소되면 발전기는 과부하가 될 것이다. 따라서 이러한 발전기의 과부하를 방지하기 위하여 브레이크, 와류, 또는 다른 종류의 장치가 반드시 회전자에 장착되어야 한다.
- ④ cut-out speed : 어떠한 속도를 초과하였을 경우 날개, 발전기, 그리고 시스템의 다른 구성 요소 등을 보호하기 위해 전력의 생산을 중단하는 영역이다

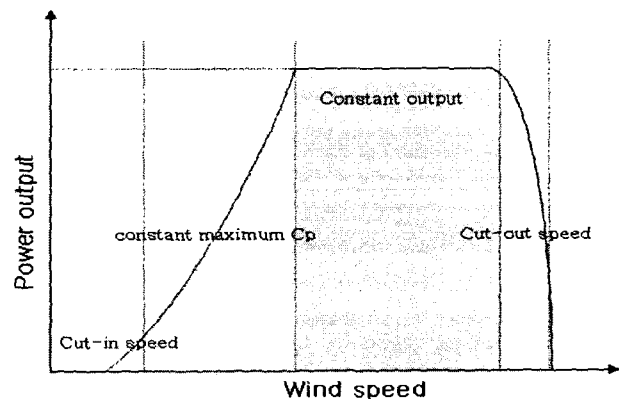


그림 5. 풍력 발전기의 운전 모드

Fig. 5. Operational modes of a wind power generator

피치각제어의 목적은 풍속이 정격 이상일 경우 풍차가 항상 정격출력을 흡수하도록 하는 것인데, 풍속이 정격이상이면 풍차날개의 피치각을 조절하여 풍차가 흡수하는 전력을 제어하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 피치각 제어를 위하여 퍼지 제어를 이용하였다

3.2 퍼지제어를 사용한 피치각제어기

피치각제어의 목적은 풍속이 정격 이상일 경우 풍차가 항상 정격출력을 흡수하도록 하는 것인데, 풍속이 정격이상이면 풍차날개의 피치각을 조절하여 풍차가 흡수하는 전력을

제어하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 피치각 제어를 위하여 피치 제어기를 이용하였다

그림 3.2는 풍력발전 시스템의 정격 회전수를 유지하기 위한 회전수 제어시스템의 블록선도를 나타낸다.

그림에서 제어기에 입력된 속도오차(회전수 오차)는 제어기와 속도-피치각 모델을 통하여 기준 피치각인 θ_{ref} 로 나타내어지며, 이 θ_{ref} 는 다시 유압제어기의 입력이 되며 유압시스템을 거쳐 실제 피치각과 풍속, 그리고 현재의 각속도에 따른 회전익의 토크를 계산하고, 이 토크가 풍력발전 시스템의 입력되어 거기에 따른 각속도 W 가 최종 출력된다. 이 각속도는 다시 입력 쪽으로 되먹임 되어 W_{ref} 와의 차가 속도제어기에 입력된다. [그림3.2]는 이와 같은 제어 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 또한 그림에서와 같이 풍속의 변화 값과 회전자의 회전속도 에러 값을 가지고 피치각을 지정한다. 그리고 Fuzzy Inference Engine 은 Mamdani's Max-Min Method를 사용하고 Defuzzifier 에서는 Center of gravity Method를 사용하여 기준피치각을 출력해 낸다.

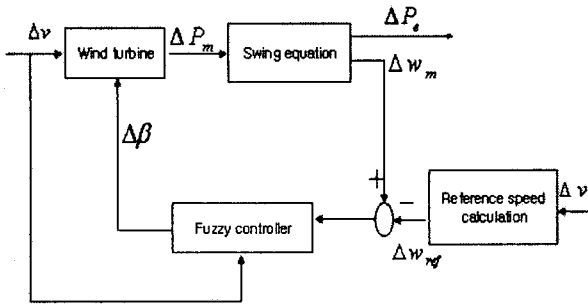


그림 3.2 피치 피치각제어기의 구성도
Fig. 3.2 A diagram fuzzy pitch angle controller

그림3.3은 모터의 현재 속도와 속도 변화량에 대한 멤버십 함수와 피치각에 대한 멤버십 함수를 보여준다.

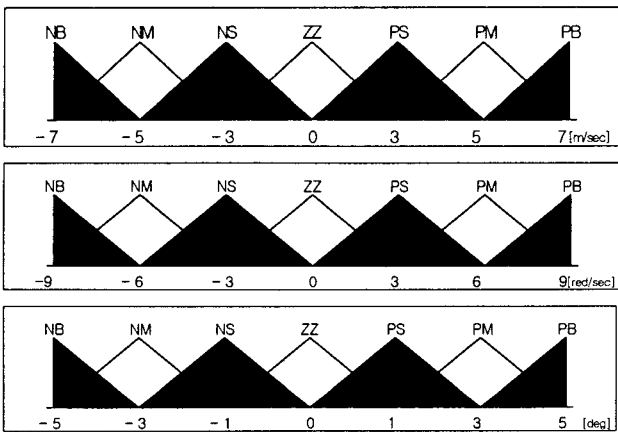


그림 3.3 멤버십 함수
Fig. 3.3 Membership function

표 3.1 룰 베이스
Table 3.1 Rule base

Δv w_r	NB	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZZ
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZZ	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZZ	PS	NS
ZZ	NB	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZZ	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZZ	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 3.1은 현재의 속도와 속도의 변화량에 대한 규칙 기반을 보여준다. 그리고 다음은 룰베이스에 쓰인 약자를 풀어 써 놓았다.

- ZZ : Zero
- PM : Positive Medium
- NB : Negative Big
- NS : Negative small
- PB : Positive Big
- PS : Positive small
- NM : Negative Medium

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

앞에서 제시한 제어기를 검증하고 풍력발전시스템의 성능을 평가하기 위해 풍속이 그림 4.1과 같이 변화하는 경우에 대해서 발전기 회전자 각속도, 피치각, 출력계수, 그리고 계통에 공급되는 유효전력, 무효전력 등에 대해 모의실험을 실시하고, 그 결과를 아래에 나타내었다. 표 4.1에서 본 연구에 사용된 각종 파라미터 값을 나타내었다.

표 4.1 풍력터빈의 파라미터

Table 4.1 Parameters for wind turbine system

풍차의 정격	6 [MW]
정격 풍속	15 [m/s]
풍차의 반경	61 [m]
공기밀도	1.25 [kg/m ³]
발전기의 정격	5.5 [kV]

그림 4.2과 그림4.3에서는 풍속의 변화에 따른 발전기의 토크변화와 회전자 각속도의 변화를 보여주고 있다. 그림 4.4는 계통에 공급되는 유효전력을 나타내는데 정격풍속이하에서는 인버터 스위칭제어에 의해 풍차가 흡수하는 최대전력이 계통에 공급되며, 정격풍속이상에서는 피치제어에 의해 일전출력이 계통에 공급됨을 확인 할수 있다.

그림 4.5은 풍속에 따른 피치각 변화를 나타낸 것으로 정격풍속이상의 경우 피치제어가 수행되어 피치각이 변화되는 것을 알수 있다. 그림 4.6은 풍속에 따른 출력계수값의 변화를 나타낸 것으로 풍속이 정격이하일 경우 출력계수가 최대이며 정격이상일 경우는 피치제어가 수행되어 출력계수가 작아짐을 확인 할 수 있다. 그림 4.7과 그림 4.8는 풍속의 변화에 따라 계통에 공급되는 무효전력변화와 발전기 단자전압의 변화를 보여주고 있다.

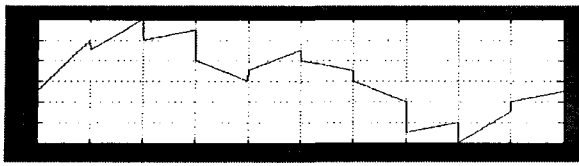


그림 4.1 시간에 따른 풍속의 변화

Fig. 4.1 Variation of wind speed considering time

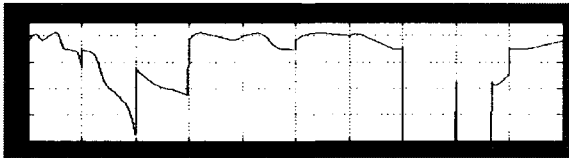


그림 4.2 발전기 토크의 변화

Fig. 4.2 Variation of generation's torque

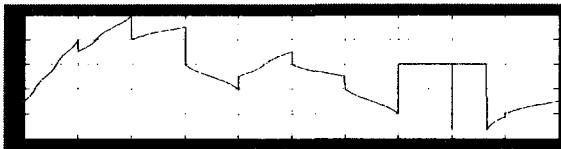


그림 4.3 피치각 변화

Fig. 4.3 Variation of pitch angles

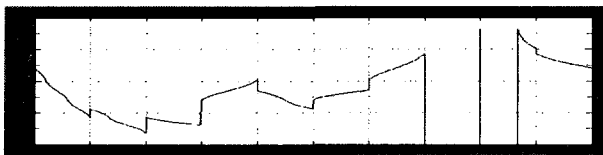


그림 4.4 출력계수의 변화

Fig. 4.4 Variation of output coefficient

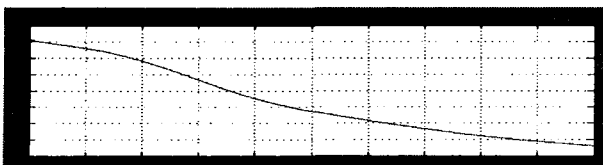


그림 4.5 계통에 공급되는 무효전력의 변화

Fig. 4.5 Variation of inefficiency power

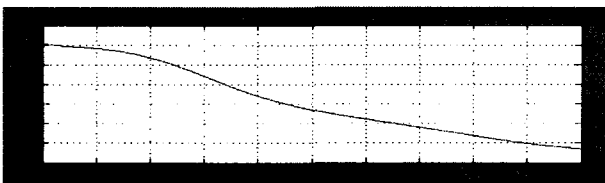


그림 4.6 발전기 단자전압의 변화

Fig. 4.6 Variation of node voltage for generator

5. 결 론

본 논문은 가변 회전속도 계통연계 풍력발전시스템의 출력 제어를 위한 피치 피치각제어기의 모델링과 시뮬레이션 결과를 제시하고 있다. 먼저 그래프 형태로 최대출력 제어 알고리즘에 따라 운전되는 풍차의 특성과 풍속과의 상관관계를 밝혀내었다. 제안하는 제어기는 풍차가 정격출력을 추종할 수 있도록 하는 피치 피치각 제어기와 생산된 최대출력을 계통에 공급되도록 하는 전력제어기로 구성되었다. 피치 피치각 제어기는 정격 풍속 이상에서 피치제어에 의해 정 출력을 계통에 공급하고 정격 미만의 풍속에서는 일정하게 최대 출력계수로 운전되는 것을 목적으로 동작하였으며 전력제어기는 풍차가 흡수하는 전력을 계통에 공급할 수 있도록 인버터를 제어하였다. 풍속의 변화에 대해 발전기의 회전각, 각속도 및 전기적 출력의 변화에 대한 시뮬레이션 결과로써 제안하는 제어기의 효용성을 입증하고 있다.

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

감사의 글

본 논문은 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.
(INHA-30260)

참 고 문 헌

- [1] M. Steninbuch, 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] M.R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Prss., pp. 35-92, 1999.

[8] 서영택, "풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 여자 특성", 경북대학교 공학박사학위논문, pp. 8-32, 1997.

[9] 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.

[10] 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.

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

[12] 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.

[13] 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.

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

[15] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison-Wesly, 1998.

저 자 소 개



김재곤(金載坤)

1978년 경북 구미 태생
현재 인하대학교 전기공학과 석사졸업



허욱열(許旭烈)

1978년 서울대학교 전기공학(공학석사),
1982년 서울대학교 전기공학과(공학박사),
1985~1986 미국 Univ. of illinoi, Visiting
Professor, 1997.04~1997.07 독일 RWTH
Aachen Univ., Visiting researcher, 현재
인하대학교 전기공학과 교수



김병륜(金丙倫)

1967년 서울 태생
1993년 인하대학교 전기공학과(공학석사)
2002년 Univ. of Pittsburgh, Department
of information Science for telecommuni-
cation(통신석사). 현재 인하대학교 전기공
학과 박사과정