

가변 풍력발전 시스템의 최대출력 제어를 위한  
Fuzzy 제어기 설계

김재곤, 김병륜, 허욱열  
인하대학교 전기공학과

A fuzzy logic Controller design for Maximum Power Extraction of variable speed Wind Energy Conversion System

Jae-Gon Kim, Byung-Yoon Kim, Uk-Youl Huh  
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

**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.

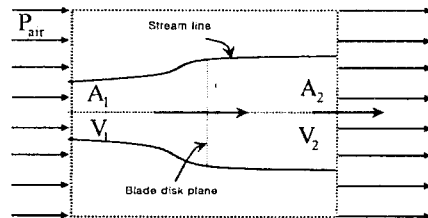
1. 서 론

지난 20세기 동안 인류의 문명과 기술발전이 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 고조되고 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.[2] 본 논문에서는 풍력발전 시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서 블레이드와 동력전달부등 풍력발전시스템 각부분의 특성을 모의 하였다. 특히 가변 하는 풍속에 대하여 풍차의 회전속도와 실제 풍속을 입력으로 하는 Fuzzy 제어기를 설계하여 피치각제어가 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 효율성을 검증 하였다.

2. 본 론

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 Rankine에 의해서 최초로 개발되어 Froude에 의해 개선되었다, [그림2.1]은 유체유동의 검사체적에 대해서 유동에 의해 날개의 회전면에 작용하는 힘을 계산하는 것으로 풍력터빈의 특성을 이론적으로 계산할 때 많이 사용하는 이론이다.



[그림2.1] 검사체적을 사용한 유체 해석

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

$$E = \frac{1}{2} m v^2 [J] \quad (2-1)$$

이때 공기가 갖는 풍력은 식(2-2)와 같이 정의 된다

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 [W] \quad (2-2)$$

여기서  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]는 공기의 밀도, A[m<sup>2</sup>]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 공역학적 으로 불가능 하다. 따라서 풍력터빈에 의해 기계적인 출력으로 흡수되는 풍력은 [그림2.1]과 같이 터빈의 회전에서 풍력의 감소분에 해당한다. 실제로 풍력터빈에 의한 기계적 출력은 상류풍속과 하류풍속 사이에 차에 해당된다. 풍력터빈에 의해서 발생하는 기계적 출력은 식(2-3)과 같다.

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

여기서 V<sub>1</sub>[m/s]은 상류 풍속, V<sub>2</sub>[m/s]는 하류 풍속이다, 식(2-3)은 식(2-4)과 같이 표현된다.

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

여기서  $C_p$ 는 풍력터빈의 출력계수 혹은 회전자 효율로 정의된다. 식(2-4)는 풍력터빈에 의해서 변환되는 기계적인 출력을 나타내는 식으로 상류출력의 일부가 풍력터빈에 의해서 획득됨을 보여준다.  $C_p$  값은 주어진 상류 풍속의  $V_1$ 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.

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

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

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad (2-6)$$

최대 회전자 효율은 식(2-7)과 같다

$$C_{Pmax} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} = 0.593 \quad (2-7)$$

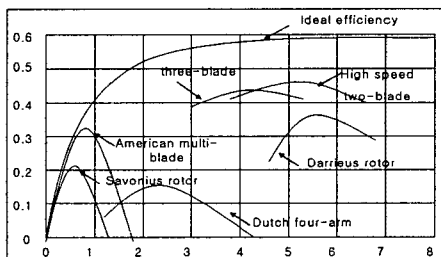
여기서 최대 출력 계수를 Betz의 계수라고도 한다. 이 최대출력 계수는 이론적으로 발생할 수 있는 값이고 실제적으로는  $C_{Pmax}$ 가 0.5이하의 값을 가진다, 2블레이드 타입의 고속터빈의 경우 일반적으로 0.5이하의 값을 가지고 저속의 터빈의 경우는 0.2~0.4의 값을 가진다. 풍력터빈의 특성은 터빈의 전력계수  $C_p$ 와 주속비의 곡선에 의해서 주어진다. 주속비는 식(2-9)과 같이 정의된다. 본 연구에서 사용된 출력계수( $C_p$ )를 다음과 같은 식으로 정의하였다.

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

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

여기서  $\lambda$ 는 주속비이며,  $w_m$ 은 풍차의 회전 속도 [rad/sec], R은 풍차의 반지름[m], V는 풍속[m/sec]으로 정의된다.

출력계수와 주속비의 곡선은 풍차의 종류에 따라 다른 형태의 특성을 나타냄을 아래의 [그림2.2]을 통해 알 수 있다.



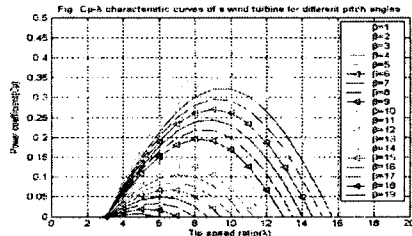
[그림2.2] 풍차의 종류에 따른 출력계수와 주속비 특성

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

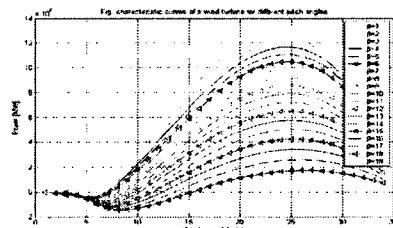
$$P_m = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{r w_m}{\lambda} \right)^3 A C_p(\lambda, \beta) \quad (2-10)$$

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 도시하였다. [그림2.3]은 출력계수와 피치각, 주속비의 상관관계를 도시 하였으며, [그림2.4]는 출력, 피치각, 풍차의 회전속도와와의 상관관계를 도시 하였다.



[그림2.3] 피치각과 주속비 출력계수와의 관계곡선



[그림 2.4] 피치각과 풍속, 출력과의 관계곡선

## 2.2 풍력발전기의 운전 모드

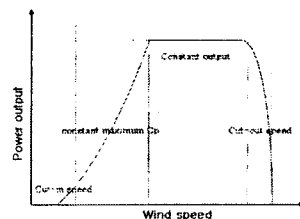
회전자의 속도는 다음의 4가지 영역으로 나눌 수 있다. 이는 더 많은 에너지를 얻고, 높은 풍속으로부터 로터, 발전기, 전력전자장치 등을 보호한다, 또한 부하가 갑자기 차단되었을 경우 제어 장치가 없다면 발전기의 로터 속도는 급격히 증가하여 기계부가 파괴됨을 막기 위해서 운전모드를 나누어서 운전한다.

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 높은 풍속이 계속될: 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.

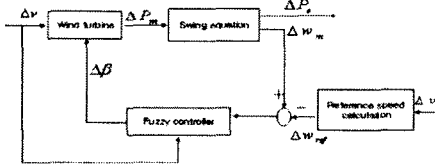
④ cut-out speed: 어떠한 속도를 초과하였을 경우 날개, 발전기, 그리고 시스템의 다른 구성 요소 등을 보호하기 위해 전력의 생산을 중단하는 영역이다



[그림2.5] 풍력 발전기의 운전 모드

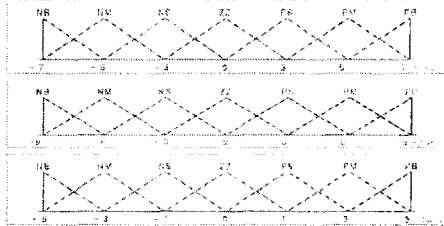
### 3. Fuzzy 피치각 제어기

다음 [그림3.1]는 퍼지제어기의 구성도 이다. 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.



[그림3.1] 퍼지 피치각제어기의 구성도

[그림3.2]은 모터의 현재 속도와 속도 변화량에 대한 멤버십 함수와 피치각에 대한 멤버십 함수를 보여준다.



[그림3.2] 멤버십 함수

$\Delta v$	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

[표3.1] 룰 베이스

### 4. 시뮬레이션

제안한 최대전력 운용 구조의 타당성을 검증하기 위해서 사용한 파라미터는 [표.4.1]과 같다.

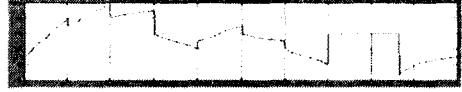
풍력 터빈	발전기
블레이드 반경:61 [m]	p =6
정격 속도 :17.55 [rpm]	정격출력=6[Mw]
블레이드 날개 수 : 2개	정격속도=1200[rpm]

[표.4.1]시뮬레이션 파라미터

[그림4-2]은 풍속에 따른 피치각 변화를 나타낸 것으로 정격풍속이상의 경우 피치제어가 수행되어 피치각이 변화되는 것을 알수 있다.



[그림4.1] 시간에 따른 풍속의 변화



[그림4.2] 피치각 변화

### 5. 결 론

본 논문은 가변 회전속도 계통연계 풍력발전시스템의 출력 제어를 위한 퍼지 피치각제어기의 모델링과 시뮬레이션 결과를 제시하고 있다. 먼저 그래프 형태로 최대 출력 제어 알고리즘에 따라 운전되는 풍차의 제 특성과 풍속과의 상관관계를 밝혀내었다. 제안하는 제어기는 풍차가 최대출력을 추종할 수 있도록 하는 퍼지 피치각 제어기와 생산된 최대출력을 계통에 공급되도록 하는 전력제어기로 구성되었다. 퍼지 피치각 제어기는 정격 풍속 이상에서 피치제어에 의해 정출력을 계통에 공급하고 정격 미만의 풍속에서는 일정하게 최대 출력계수로 운전되는 것을 목적으로 동작하였으며 전력제어기는 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급할 수 있도록 인버터를 제어하였다. 풍속의 변화에 대해 발전기의 회전자각, 각속도 및 전기적 출력의 변화에 대한 시뮬레이션 결과로써 제안하는 제어기의 효율성을 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 대체에너지로서의 풍력발전기술 활성화에 기여할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines", DOE/NASA workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio.Viterna, L.A. and Corrigan, R.D. 1966.
- [2] "Global Wind Energy Market Report", AWEA Report, 1999.
- [3] Randall C. Maydew and Paul C. "Aerodynamic Performance and Horizontal Axis turbine"J of energy(USA), vol 5,on 3, pp189~190,1981
- [4] R.J.Templine, "Aerodynamic Performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine", national Research and Council Canada, Laboratory Technical Report, LTR LA 160, 1974
- [5] M.R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, pp. 35~92,1999
- [6] A.R. Bergen and V. Vittal, "power System Analysis", Prentice Hall, 2000.
- [7] M.G.Simoes, B.K.Bose, and R. j. Spiegel, "design and Performance Evaluation of a fuzzy-logic based Variable Speed Wind generation system", IEEE trans. on IA, vol.33, no.4, pp.966~965, 1997
- [8] 허종철, 조경호, 김건훈, 김은일, "제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구 용역(II)", 제주도, 2000.