

피치 제어를 이용한 계통연계 풍력발전 시스템의 최대출력 제어

유 행 수* 노 경 수
 동국대학교 전기공학과

The control of maximum power output for a grid-connected wind turbine system by using pitch control method

Haeng-Soo Ryu* Kyoung-Soo Ro
 Department of Electrical Engineering, Dongguk University

Abstract - This study is for the pitch control of blade, used in most horizontal-axis wind turbine systems, to sustain the maximum power output supplied to grid. The control of a blade can be divided into a stall regulation and a pitch control methods. The stall regulation method using an aerodynamic stall is simple and cheap, but it suffers from fluctuation of the resulting power. Pitch control method is mechanically and mathematically complicated, but the control performance is better than that of the stall regulation method. In this paper 2.5MW MOD-2 wind turbine system is adopted to be controlled by a pitch controller with PI method. The simulation performed by MATLAB will show the variation of frequency, generator output, and pitch angle.

1. 서 론

현재 풍력발전기의 대부분을 차지하고 있는 수평축 발전 시스템의 날개의 영각을 제어하여 계통에 공급되는 최대출력을 제어할 수 있다. 날개의 영각을 제어하는 방법 중 스톨제어는 일정 풍속 이상에서 스톨이 발생하도록 날개를 제작하여 스톨발생 이상의 풍속에서는 실속이 일어나 회전수가 제어되는 방식으로, 원리 및 구조가 단순하지만 정격출력 상태에서 출력에 요동이 발생하는 단점이 있다. 이에 반하여 피치제어 방식은 정격풍속 이하의 풍속일 때 최대출력을 내도록 제어하고, 정격 이상에서는 일정출력을 내도록 제어하는 방식으로 기계적인 복잡성은 있으나 제어 성능이 양호하기 때문에 풍력발전 시스템의 제어방식으로 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 2.5MW MOD-2 풍력발전시스템에 대하여 PI 제어기를 이용한 피치제어를 통해 발전기의 출력을 제어하고, 계통에 정주파수를 공급하기 위해 3상 브리지 정류기와 3상 브리지 인버터를 통하여 계통에 공급되는 구조로 한다. 모의는 MATLAB을 이용하여 풍속의 변화에 따른 주파수 변동 및 발전기의 출력 그리고 피치각의 변화등을 해석해 보도록 할 것이다.

2. 풍력 발전 시스템

본 논문에서 고려하는 대상시스템을 아래에 도시하였다. 풍력발전기는 MOD-2 시스템이며 3상 브리지 정류기와 3상 브리지 인버터가 채용되었다.

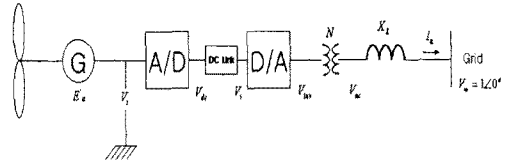


그림 1. 풍력발전 시스템 구조

2.1 풍력발전부

발전 시스템은 보잉사에서 제작된 MOD-2 모델을 사용하였으며 이것의 전체적인 제원은 다음의 그림 2와 같다.

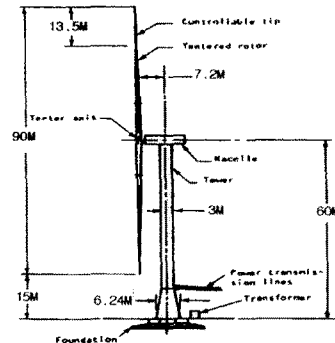


그림 2. MOD-2 system configuration

풍차의 출력과 주속비는 다음의 식으로 나타낸다.[1]

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) = 1.806 C_p(\lambda, \beta) R^2 v^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\text{Lin. speed at the tip of the rotor blade}}{\text{Wind speed}} = \frac{\omega R}{v} \quad (2)$$

본 논문에서 시뮬레이션을 위해 정의한 출력계수는 아래의 식과 같다.[2]

$$C_p = (0.44 - 0.167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{7.5 - 0.15\beta} \right] - (\lambda - 3)(0.00184\beta) \quad (3)$$

2.2 컨버터부

그림 1의 풍력발전 시스템 구성도에서 발전기의 단자전압이 V_i 일 때 한상의 정류기 및 인버터 출력과의 관계식은 식 4와 같다.[3] 먼저 정류기의 출력전압은 아래와 같으며 ψ 는 V_{dc} 와 V_m 의 위상차이다.

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}{\pi} V_i = 0.78 V_i \angle \psi \quad (4)$$

이상적인 DC Link 라고 가정하여 $V_{dc} = V_i$ 로 놓으면 변압기 2차 출력단의 전압은

$$V_{ac} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot N \cdot V_{dc} \cos \alpha = 0.702 \cdot N \cdot V_i \cos \alpha \angle \psi \quad (5)$$

3. 제어기 모델

본 연구의 목적인 풍력발전기 출력 제어를 위해 기계적인 연결(Drive train)부분과 피치 제어(Pitch control) 부분에 대해서 모의를 위한 각각의 파라미터들을 그림 3에 도시하였다.

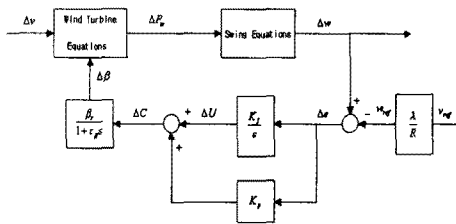


그림 3. 제어기 모델 블록 다이어그램

3.1 대상 시스템의 계수값 및 초기치

그림 2에 소개한 대상 시스템의 세부적인 파라미터들을 다음의 표 1, 2, 3에 나타내었다. 표 1에서는 풍차의 파라미터, 표 2에서는 미분방정식의 초기치, 그리고 표 3에서는 발전기 상수를 보여주고 있다.

표 1. 풍차의 파라미터

상수	값
R	45 m
C_{pmax}	0.3956
λ_{max}	6.8919
ω_{ref}	1.8378 m/s

표 2. 미분방정식의 초기치

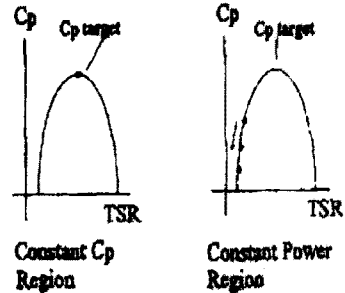
상수	값
$\delta(0)$	39.8091°
$w(0)$	0
$ E'_a(0) $	0.927
$u(0)$	0
$\beta(0)$	0°

표 3. 발전기 상수

상수	값(pu)
P_e	1.0
Q_e	0.2
V_i	$1.0 \angle 0^\circ$
$X_d = X_q$	1.0
X'_d	0.2
X_L	0.1

3.2 제어 알고리즘

제어 알고리즘은 크게 두 영역으로 나누어 지는데 첫째로 일정 출력계수 영역(*Constant C_p Region*)과 제어가 동작하는 일정 출력 영역(*Constant Power Region*)으로 나누어지며 아래의 그림 4에 나타내었다.[1]



CONTROL ALGORITHM

그림 4. 제어 알고리즘

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

아래의 사례 연구 1, 2에서는 정격풍속인 12 m/s 에서 운전되고 있는 풍차가 t=0에서 풍속이 정격이하 및 정격 초과 풍속으로 변할때 발전기의 회전자각, 주파수, 피치각, 그리고 전기적 출력의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 사례연구 1은 풍속 8 m/s 일 경우이며 날개를 최대한으로 편 상태로 운전되는 영역으로 출력은 정격을 밀드는 상태로 운전된다. 이 경우 날개의 설계 방법에 따라 좀 더 빠른 안정성을 가질 수 있다. 사례연구 2는 풍속이 18 m/s 일 경우이며 이때는 피치제어가 이루어져 정 출력을 유지하는 것을 알 수 있다. 출력 파형은 보다 좋은 성능을 가진 제어기에 의해 개선될 수 있다.

4.1 사례연구 1

아래의 그림 7에서 보는 바와 같이 풍속이 정격 이하에서는 발전기 출력이 약 0.4 pu 정도로 나타남을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 정격이하의 풍속에서는 최대 출력계수로 운전되는 영역이다.

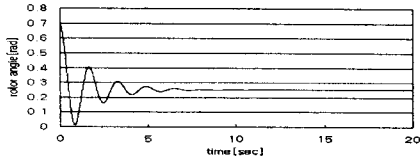


그림 5. 발전기 회전자각 변화

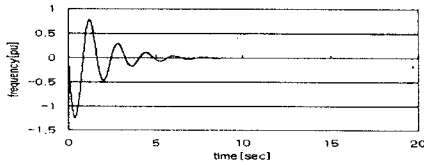


그림 6. 주파수 변화

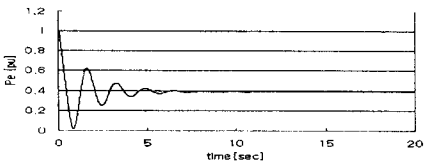


그림 7. 발전기 유효전력 변화

4.2 사례연구 2

아래의 그림 11에서는 풍속이 정격을 초과하였으므로 발전기의 정출력 영역이다. 이 구간에서는 피치제어에 의해서 출력을 1 pu로 낮추고 있음을 결과 파형에 의해 알 수 있다.

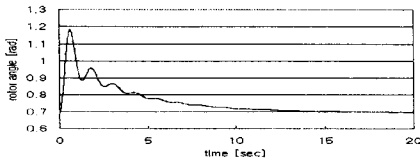


그림 8. 발전기 회전자각 변화

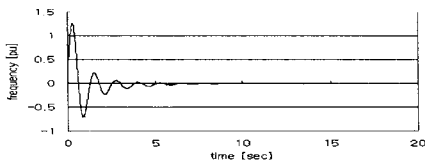


그림 9. 주파수 변화

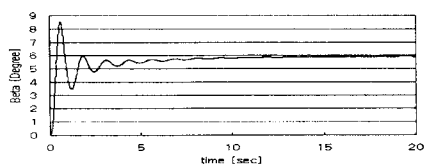


그림 10. 피치각 변화

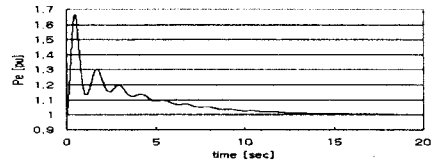


그림 11. 발전기 유효전력 변화

그리고 인버터의 점호각이 0.3rad 일 때 계통에 공급되는 유효전력과 무효전력을 아래의 그림 12, 13에 도시하였다.

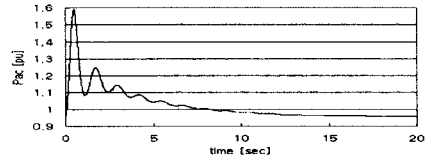


그림 12. 계통에 공급되는 유효전력 변화

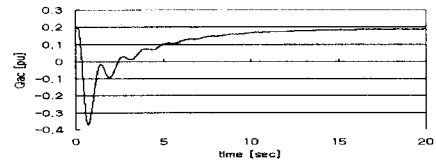


그림 13. 계통에 공급되는 무효전력 변화

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계 풍력발전 시스템의 최대출력 제어에 대해 고찰해 보았으며 정격 풍속 이상에서는 PI 제어를 이용한 피치제어에 의해 정출력을 계통에 공급하고 정격 미만에서는 최대 출력계수로 운전되는 것을 보였다. 시뮬레이션은 풍차의 피치각 제어에 의한 발전기의 회전자각과 주파수 변화 및 계통에 공급되는 전기적 출력을 보여주고 있다. 본 논문에서는 국내에서 현재 많은 관심을 가지고 연구하고 있는 풍력발전기술에 대해 외국의 사례를 연구하여 국내에서 채용할 수 있는 피치 제어 방식에 대해 MATLAB을 이용하여 모의해 보았다. 본 연구에서 제시한 풍력발전 시스템의 최대출력 제어를 위한 피치제어는 앞으로 상용화 될 풍력에너지의 효율적인 이용을 위해 시스템에 적용될 가능성이 유력한 것으로서 대체에너지로서의 풍력발전기술 활성화에 기여할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
- [2] A. Murdoch and R.S. Barton, 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.
- [3] Bimal K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 1986.