

동특성해석을 위한 계통연계 풍력발전 시스템의 모델링

추연식, 노경수
 동국대학교 전기공학과 / 차세대전력기술연구센터

Modeling of a Grid-Connected Wind Energy Conversion System for Dynamic Performance Analysis

Yeoun-sik Choo, Kyoung-soo Ro
 Dept. of Electrical Engineering, Dongguk University / NPT Center

Abstract - This paper presents a modeling and simulation of a utility-connected wind energy conversion system with a link of a rectifier and an inverter. It discusses the maximum power control algorithm for the wind turbine and presents the relationship of wind turbine output, rotor speed, power coefficient, tip-speed ratio and wind speed when the wind turbine is operated under the maximum power control algorithm. The control objective is to extract maximum power from wind and transfer the power to the utility. This is achieved by controlling the pitch angle of the wind turbine blades. 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 speed, pitch angle, and generator output.

여기서, ρ [kg/m^3]는 공기의 밀도, A [m^2]는 풍차의 날개가 커버하는 면적, v [m/sec]는 풍속, C_p 는 풍차의 출력계수(power coefficient), β 는 풍차날개의 피치각이고, λ 는 주속비(tip-speed ratio)로서 다음과 같이 표현된다.

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

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

풍차의 특성은 풍차의 출력계수 (C_p)와 주속비(λ) 사이의 상관곡선으로 나타내어지는데 그러한 곡선의 한 예가 그림1에 주어지고 있다[2].

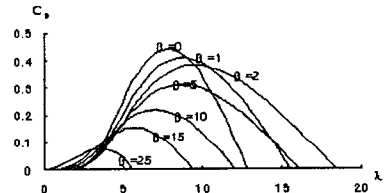


그림 1 출력계수와 주속비사이의 특성곡선

1. 서론

환경오염에 대한 관심의 증대로 각 나라마다 자연환경이나 주변 여건에 따라 다양한 대체에너지 개발방법이 연구되고 있는데, 최근들어 세계 각국에서 풍력발전에 대한 관심이 증가하면서 새로운 기술개발이나 풍력발전 설비 용량의 증설에 힘쓰고 있는 실정이다. 풍력발전은 바람의 특성상 정속운전에서보다 가변속운전에서 20~30% 더 많은 에너지를 얻을수 있는데 이점을 고려하여 풍속의 변화에 대응하여 가변속으로 발전을 수행하여 풍력에너지의 변환효율을 최대로 이용하고 있다. 초기 풍력발전시스템에서는 동기발전기를 많이 사용하였으나 최근에는 구조가 간단하고 값이 싸며 내구성이 강하고 가변속운전에 적합한 유도발전기의 이용이 증가하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 발전기의 종류로는 가변속운전에 적합한 유도발전기를 이용하고 출력제어방법은 PI 제어기를 이용하여 정격풍속이상에서 일정출력을 유지하도록하는 피치제어와 인버터 스위칭제어를 통하여 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급하는 방법을 사용하고자 하며 그 효율성을 검증하고자 한다.

2. 풍차의 특성

바람이 가지는 에너지로부터 풍차가 흡수하는 전력 (P_m)은 다음과 같이 표현된다[1].

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

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

$$\text{여기서, } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

3. 최대출력 제어 알고리즘

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 풍속이상이 되면 풍차는 발전을 수행하여 전력을 계통에 공급하게 된다. 이 경우 시스템은 일정 출력계수 영역으로 들어가며 항상 최대출력 운전점을 추적하게끔 운전된다. 풍속이 계속하여 증가하면 풍차의 회전속도는 최대 허용출력에 도달하게 된다. 출력한계에 도달하면 출력을 일정하게 유지하기 위해 풍차의 회전속도는 감소하여야 하며, 이에 따라 풍차는 낮은 출력계수 값에서 운전하게 된다[3].

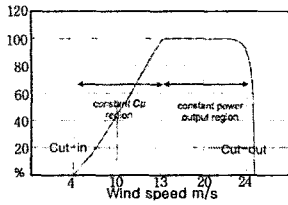


그림 2 풍속에 따른 두가지 제어영역

4. 풍력발전 시스템과 모델링

그림 2은 제어를 포함한 풍력발전 시스템의 구조를 표시하고 있다. 풍차는 드라이브 트레인을 통해 발전기와 연결된다. 본 연구에서는 풍차가 언제나 바람이 불어 오는 방향으로 향한다고 가정하고, 풍차의 종류는 수평형이며, 발전기는 6극, 정격 1.5MW, 3상, 60 Hz 3.37 kV의 출력을 계통에 공급하는 유도발전기이다. 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.

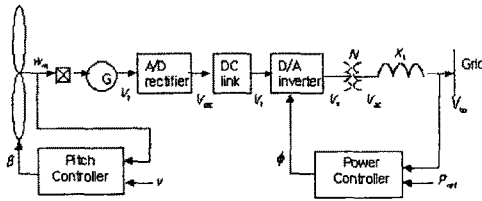


그림 3 계통에 연계된 풍력발전 시스템 구조

4.1 Drive Train 모델

풍차의 회전자가 회전하면서 발생한 기계적인 힘은 드라이브 트레인을 거쳐서 발전기에 전달이 되는데, 여기서 기어는 터빈의 회전자 회전속도가 낮기 때문에 터빈의 회전자와 발전기의 회전자 사이에 삽입한다. 드라이브 트레인의 동특성은 다음과 같이 표현된다[4].

$$\left(-\frac{J_w}{n^2} + J_c\right) \frac{dw_r}{dt} = \left(\frac{T_w}{n} - T_c\right) - \left(\frac{D_w}{n^2} + D_c\right) w_r \quad (5)$$

여기서, w_r 은 발전기 회전자 속도(rad/s), n 은 기어비,

T_w 는 풍차의 토크(Nm), T_c 는 발전기 회전자축에 적용되는 토크(Nm), J_w 는 풍차 회전자의 관성계수 ($kg \cdot m^2$), J_c 는 발전기 회전자의 관성계수이며, D_w 와 D_c 는 각각 풍차와 발전기의 마찰계수(Nm/rad)이다.

4.2 유도발전기 모델

동기속도에서 회전하는 좌표축에 관한 유도발전기의 d-q 축 모델방정식은 다음과 같다[5, 6].

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + X_s i_{qs} + v_d \quad (6)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - X_s i_{ds} + v_q \quad (7)$$

$$v_{dr} = 0 = -R_r i_{dr} + s \lambda_{qr} - \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (8)$$

$$v_{qr} = 0 = -R_r i_{qr} - s \lambda_{dr} - \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (9)$$

여기서, $X_s = X_r + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m}$ 은 과도상태 리액턴스이며, X_s 는 고정자 리액턴스이고, X_r 는 회전자 리액턴스이며, X_m 는 상호리액턴스이고, v_d , v_q 은 과도상태 고정자 d-q축의 전압이다.

식 (8), (9)에서 회전자 전류를 제거하고 회전자 누설자속을 v_d , v_q 에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d v_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [v_d - (X - X_r) i_{qs}] + \frac{d \theta_r}{dt} v_q \quad (10)$$

$$\frac{d v_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [v_q + (X - X_r) i_{ds}] - \frac{d \theta_r}{dt} v_d \quad (11)$$

여기서 $T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r}$ 은 과도상태 개방회로 시상수이며, L_r , L_m 은 고정자와 회전자 누설인덕턴스이며, 리액턴스 X 는 $X = X_r + X_m$ 이며, $\frac{d \theta_r}{dt} = \frac{\omega_r - \omega_r}{\omega_r}$ 이다.

4.3 계통연계시스템 모델

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

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \alpha \quad (12)$$

여기서, V_i 는 발전기 출력단의 선간전압이며, α 는 정류기 스위칭의 지연각이다. 본 논문에서는 지연각 (α)을 제어하지 않으며 ($\alpha=0$) DC링크는 손실이 없는 이상적인 DC링크라고 가정한다.

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

$$V_{ll} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) V_i \cos \delta \quad (13)$$

인버터 출력단의 변압기는 풍력발전시스템과 계통과의 분리를 가능하게 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.

$$P_{ac} = \frac{|V_\infty| |V_{ll}| \sin \phi}{X_L} \quad (14)$$

5. 제어기 모델

피치제어의 목적은 풍속이 정격 이상일 경우 풍차가 항상 정격출력을 흡수하도록 하는 것인데, 풍속이 정격 이상이 되면 풍차날개의 피치각을 조절하여 풍차가 흡수하는 전력을 제어하여야 한다. 그 동특성을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\Delta u}{dt} = K_{la}(\Delta \omega_m - \Delta \omega_{ref}) \quad (15)$$

$$\frac{d\Delta \beta}{dt} = \frac{1}{\tau_\beta} (\Delta u + K_{P\alpha} \Delta \omega_m - K_{P\alpha} \Delta \omega_{ref} - \Delta \beta) \quad (16)$$

전력제어기는 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급할 수 있도록 인버터를 제어하는 것을 목적으로 한다. 전력제어기의 동특성은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta c}{dt} = K_{lb}(\Delta P_{ref} - \Delta P_{ac}) \quad (17)$$

$$\frac{d\Delta V_\phi}{dt} = \frac{1}{T_\phi} [K_\phi(\Delta c + K_{Pb} \Delta P_{ref} - K_{Pb} \Delta P_{ac}) - \Delta V_\phi] \quad (18)$$

6. 시뮬레이션

앞에서 제시한 제어기를 검증하고 풍력발전시스템의 성능을 평가하기 위해 풍속이 그림4와 같이 변화하는 경우에 대해서 발전기 회전자 각속도, 피치각, 전력계수, 그리고 계통에 공급되는 유효전력 출력등에 대해 모의 실험을 실시하고 그 결과를 아래에 나타내었다. 표 1에 본 연구에 사용된 각종 파라미터 값을 나타내었다.

표1 풍력터빈의 파라미터

파라미터	값
풍차의 정격	1.5(MW)
정격 풍속	13(m/s)
Cpmax	0.41
풍차 회전자의 반경	32[m]
공기밀도	1.035[kg/ m ²]

그림 6은 계통에 공급되는 유효전력출력을 나타내는데 정격풍속이하에서는 인버터 스위칭제어에 의해 풍차가 흡수하는 최대전력이 계통에 공급되며, 정격풍속이상에서는 피치제어에 의해 일정출력이 계통에 공급됨을 확인할 수 있다.

그림 7은 풍속에 따른 피치각 변화를 나타낸 것으로 정격풍속이상의 경우 피치제어가 수행되어 피치각이 변화되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 풍속에 따른 출력계수값의 변화를 나타낸 것으로 풍속이 정격이하일 경우 출력계수가 최대이며 정격이상일 경우는 출력계수가 작아짐을 확인할 수 있다.

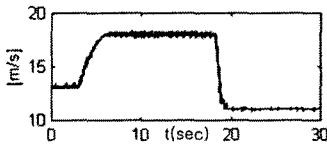


그림 4 풍속

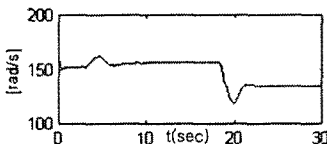


그림 5 발전기 회전자 각속도

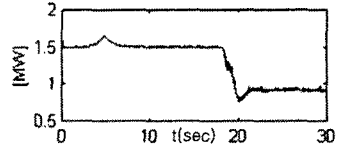


그림 6 계통에 공급되는 유효전력 출력

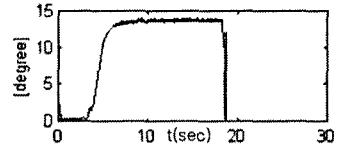


그림 7 피치각 beta

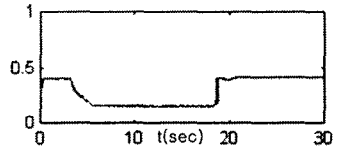


그림 8 출력계수(Cp)

7. 결론

본 연구에서는 PI제어기를 이용하여 정격풍속이상에서 일정출력을 유지하도록 하는 피치제어와 풍차가 흡수하는 최대전력을 계통에 공급하는 인버터 스위칭제어를 통하여 최대출력제어를 얻고자 하였으며, 풍속의 변화에 따라 가변속으로 발전을 수행하여 풍력에너지의 변환효율을 최대로 이용하였다. MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 제시한 알고리즘이 타당함을 검증하였다.

(감사의 글)

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

(참고 문헌)

- [1] 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.
- [2] Siegfried Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons, 1998
- [3] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
- [4] Z Chen and M McCormick, A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System For Variable Speed Wind Energy Conversion Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, No. 475, September 2000, pp 114-119.
- [5] Prabha Kundur, Power system Stability and Control, McGraw-Hill, 1993
- [6] Kannan Rajendiran and C.V Nayar, Pscad/Emtdc Based Simulation of A Wind-Diesel Conversion Scheme, IEEE Transactions, 2000, pp505-510