

유도형 풍력발전기 제어 모델링에 관한 연구

이수미, 전영환
홍익대학교

Static and Dynamic Modeling of Induction Generator for Wind Turbine Power Control

Su-Mi Lee, Yeong-Han Chun
Hong-ik University

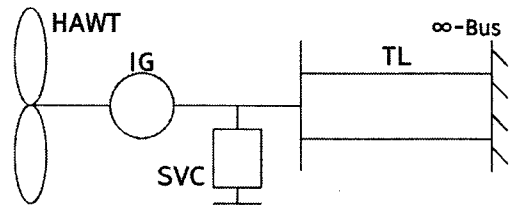
Abstract - 풍력발전의 출력은 다른 발전원에 비해 입력 즉 바람의 세기에 따라 변동되는 특성을 갖고 있다. 출력의 변동은 계통에 연계되었을 시 주파수 안정도에 큰 영향을 미친다. 점차 전체 발전기 중 풍력발전기의 비중이 높아짐에 따라 그에 관한 상세한 제어의 필요하게 되었다. 본 논문에서는 유도형 풍력발전기의 상세한 모델링을 제안하였다.

1. 서 론

전세계적으로 환경오염과 화석연료 고갈의 문제가 대두되면서 에너지 절약, 기후변화협약, 지속 가능한 에너지원 개발 등을 통한 해결책을 꾸준히 모색하고 있다. 지속 가능한 에너지원 즉 신재생 에너지원의 개발 중 풍력에너지원은 유럽을 중심으로 꾸준한 개발과 보급이 이루어지고 있다. 세계적으로 계통에 연계되어 운전되는 용량이 증가되고 있고, 그 단위 발전 용량 또한 MW급이 상용화 되는 등 활발하게 연구되고 있다. 우리나라에서도 제주 계통과 대관령 풍력발전단지에서 풍력발전기를 운전 중이다. 현재의 풍력 발전 용량은 기존의 화력발전기나 가스터빈 발전기 용량에 비해 매우 적기 때문에 계통에 미치는 주파수 안정도 문제는 무시할 수 있다. 그러나 점차 발전단지의 형태로 대형화되면서 세계적으로 설비 용량이 2004년 초에 이미 4GW를 넘고 있으며, 앞으로 그 양이 증가할 전망이다. 전체 계통 설비 용량에 비해 풍력발전용량이 적을 경우에는 풍력발전기의 출력 변동이 미치는 영향은 적으나 그 용량이 증가함에 따라 계통 주파수 안정도에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 대비책이 필요하다. 특히 풍력발전기의 출력 변동은 바람의 세기에 직접적인 관계가 있으므로 계통의 상황에 맞물려 상황을 더 악화시킬 우려가 있다. 따라서 단위 풍력발전기의 입출력 관계를 분석할 수 있는 모델링이 필요하다. 계통을 해석하고 풍력발전기의 영향을 정확하게 분석하기 위해서 본 논문에서는 유도형 풍력발전기의 모델링을 제안하였다.

2. 본 론

본 논문에서 제시된 풍력발전기는 풍력터빈, 유도형 발전기, 정지형 무효전력 보상기로 구성되어 있고, 송전선을 통하여 계통에 연결되어 있다. 풍력 터빈은 수평축 풍력터빈(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)을 사용하였다. 그림 1은 이 풍력발전기를 그림으로 나타내었다.



<그림 1> 풍력발전 시스템

2.1 풍력 터빈 모델

풍력 터빈에서 발생하는 기계적 출력(T_m , Mechanical torque)의 효율은 회전날개의 upstream(V)과 downstream(V_0)의 관계인 C_p 로서 나타낼 수 있다.[1]

$$C_p = \frac{(1 + \frac{V_0}{V})[1 - (\frac{V_0}{V})^2]}{2} \quad (1)$$

이는 또한 tip speed ratio인 λ 와 회전날개의 pitch각인 β 로 표현할 수 있다.[2]

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (2)$$

이때의 회전날개의 정점에서 선형적인 풍속 비율인 λ 는

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_w} \quad (3)$$

이다. 여기서 Ω 는 풍력 터빈 회전자의 기계적 각속도, R은 풍력 터빈의 회전자 반지름이다.

이 때의 풍력 터빈의 기계적 토크를 수식으로 나타내면 다음의 수식을 얻는다.

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A R C_p V_w^2 \lambda \quad (4)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도, A는 회전 날개의 회전 단면적, V_w 는 풍속이다.

2.2 유도 발전기 모델

동태 방정식으로 발전기의 과도 상태를 해석하기 위해서는 정상상태에서의 유도발전기의 초기값이 필요하다.

2.2.1 유도 발전기 모델의 정상상태 모델

유도발전기의 동태 방정식을 계산하기 위하여 고정자와 회전자의 각 전류와 전압과 슬립(slip) 초기값을 계산 해주어야 한다. 이 때 모든 수식은 d-, q-축으로 나타낸다.[3]

$$V_s = 1 = R_s I_s + jX_s I_s + jX_m (I_s + I_r) \quad (5)$$

$$V_r = 0 = \frac{R_r}{s} I_r + jX_r I_r + jX_m (I_s + I_r) \quad (6)$$

$$I_r = \frac{V_e}{(R_e + R_r/s) + j(X_e + X_r)} \quad (7)$$

$$\text{이 때, } V_e = \frac{jX_m V_s}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (8)$$

식 (5)~(8)에서 구한 I_r, I_s 를 통하여 $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ 은 d축과 q축이 90°차이가 나는 것을 이용하여 구할 수 있다.

$$I_s = (i_{ds} + i_{qs})/\sqrt{2} \quad (9)$$

$$I_r = (i_{dr} + i_{qr})/\sqrt{2}$$

이 때의 쇄교자속을 계산하면,

$$\psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr}$$

$$\psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (10)$$

$$\psi_{dr} = X_r i_{dr} + X_m i_{ds}$$

$$\psi_{qr} = X_r i_{qr} + X_m i_{qs}$$

위 식 (9), (10)에 의하여 전기적 토크를 구할 수 있다.

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (11)$$

(5)~(10)까지 구해진 고정자와 회전자의 전압, 전류, slip을 통하여 동태 시뮬레이션을 시작하기 위한 초기값들을 정할 수 있다.

2.3. 유도 발전기 모델의 다이내믹 모델

유도발전기를 채용한 풍력 발전기는 d-, q- 축으로 나타낸 쇄교자속(flux linkage, ψ)로 계산한다.

$$p\psi_{ds} = \omega_b (V_{ds} + R_s i_{ds} + \psi_{qs}) \quad (12)$$

$$p\psi_{qs} = \omega_b (V_{qs} + R_s i_{qs} - \psi_{ds}) \quad (13)$$

$$p\psi_{dr} = \omega_b (V_{dr} - R_r i_{dr}) + (\omega_b - \omega_m) \psi_{qr} \quad (14)$$

$$p\psi_{qr} = \omega_b (V_{qr} - R_r i_{qr}) - (\omega_b - \omega_m) \psi_{dr} \quad (15)$$

위 식들에서 모두 고정자측 변수들로 표현한 전기적 토크를 구하면 기계적 토크와의 관계를 구할 수 있다.

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (16)$$

이 전기적 토크와 기계적 토크 사이의 차이만큼 회전자는 가속된다.

$$p\omega_m = \frac{\omega_b}{2H} (T_m - T_e) \quad (17)$$

여기서 H는 풍력 터빈과 유도 발전기 회전자의 등가 관성 상수이다.

2.4 정지형 무효전력 보상기

풍력발전기 내부에 유도발전기를 채용함에 따른 전압 변동을 제어하기 위해 정지형 무효전력 보상기를 설치한다. 본 논문에서는 사이리스터로 제어하는 정지형 고정 커패시터 무효전력 보상기(FC-TCR, static fixed-capacitor thyristor-controlled reactor compensator)를 사용한다.

$$V_{qs} = \frac{1}{\omega_b} p V_{ds} - X_c i_{dc} \quad (18)$$

$$V_{ds} = -\frac{1}{\omega_b} p V_{qs} + \omega_b X_c i_{qc} \quad (19)$$

푸리에 변환으로 유도 전류 성분을 계산하면 다음 수식을 얻을 수 있다.

$$i_L = \frac{2(\pi - \alpha) - \sin[2(\pi - \alpha)]}{\pi X_{Leq}} B_s = \frac{V_s}{X_{Leq}} \quad (20)$$

여기서 X_{Leq} 는 TCR의 등가 리액턴스이고, α 는 gating firing 각도이다.

i_L 을 d-, q-축 미분 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$p i_{dL} = \omega_b (V_{ds} + X_{Lr} i_{qL})/X_{Leq} \quad (21)$$

$$p i_{qL} = \omega_b (V_{qs} - X_{Lr} i_{dL})/X_{Leq} \quad (22)$$

2.5 송전선 모델

송전선을 통한 전압을 d-, q-축 성분으로 나타낸다.

$$V_{ds} = V_{db} + R_{TL} i_{dTL} - X_{TL} i_{qTL} + \frac{X_{TL}}{\omega_b} p i_{dTL} \quad (23)$$

$$V_{qs} = V_{qb} + R_{TL} i_{qTL} + X_{TL} i_{dTL} + \frac{X_{TL}}{\omega_b} p i_{qTL} \quad (24)$$

2.6 제어 모델링

풍속에 따라 변하는 출력량을 제어하기 위하여 시간에 따라서 각 변수들을 행렬화한다. 이때의 변수들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} \Delta \psi_{ds}, \Delta \psi_{qs}, \Delta \psi_{dr}, \Delta \psi_{qr}, \Delta \omega_m \\ \Delta V_{ds}, \Delta V_{qs}, \Delta i_{dr}, \Delta i_{qr}, \Delta i_{dTL}, \Delta i_{qTL} \end{bmatrix}$$

풍력발전기의 제어는 2가지로 나타낼 수 있다. 첫 번째로 정지형 무효전력 보상기로 풍력발전기 내의 유도발전기 말단에 위치하여 출력량을 제어할 수 있다. 두 번째로 회전날개의 pitch각을 조절하여 발전기로 들어오는 기계적 토크를 조절하는 것이다. 전기적 토크와 전압은 풍력발전기 제어에 사용되며, 선형모델링을 통하여 제어된다.

3. 결 론

본 논문에서는 바람의 세기에 따라 출력이 변하는 유도형 풍력발전기의 제어형 모델을 제안하였다. 풍력발전의 비중이 전체 발전량에 비해 점차 증대됨으로써, 출력의 변동에 따른 계통에 미치는 안정도 영향을 최소화할 수 있다. 앞으로 본 모델을 바탕으로 풍력발전기의 출력 제어에 적용하여 제어기별 특성을 비교, 분석 할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mukund R. Patel, Ph.D., P.E., "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, pp. 35-39, 1999
- [2] Ezzeldin S. Abdin, Wilson Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE, Vol. 15, No. 1, pp. 91-96
- [3] P. Kunder, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, pp. 279-305, 1994