

이중여자 권선형 유도 발전기에 의한 풍력발전시스템의 동특성 해석

장석명\*, 최장영\*, 조한욱\*, 박지훈\*, 윤기갑\*\*  
\*충남대학교, \*\*한국 전력연구원

Dynamic Analysis of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Power Applications

Seok-Myeong Jang\*, Jang-Young Choi\*, Han-Wook Cho\*, Ji-Hoon Park\*, Ki-Kab Yoon\*\*  
\*Chungnam National University, \*\*Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - Using the MATLAB/SIMULINK, this paper presents dynamic simulation model for 6MW wind power generation systems with the DFIG considering distribution systems and performs the dynamic analysis of wind power systems

1. 서 론

본 논문은 그림 1에 제시된 이중여자 풍력 발전기를 갖는 풍력 발전시스템의 동특성 해석을 위해, 풍력 발전 시스템을 구성하는 주요 요소 즉 풍력 터빈, 이중여자 발전기 및 AC/DC/AC 컨버터의 수학적 모델링을 제시한 후 제시된 수학적 모델링을 통해 시뮬레이션을 위한 블록도 혹은 제어 개념 도를 제시한다. 다음으로 MATLAB/ SIMULINK를 이용하여 분산전원을 갖는 풍력 발전시스템을 구성하고 정상상태인 경우에 풍력발전시스템의 발전 특성에 대해 동특성 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2. 시스템의 수학적 모델링

2.1 풍력 터빈

입의 바람속도에 대하여 풍력 터빈이 흡수할 수 있는 즉 바람에 의한 풍력 터빈의 출력은 식 (1)로 주어진다 [1].

$$P_t = 0.5 C_p \rho A w^3 \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도 이고,  $A$ 는 터빈의 단면적이며  $w$ 는 바람의 속도로 단위는 m/s이다.  $C_p$ 는 전력 계수로 풍력 터빈의 날개 끝속도와 바람 속도의 비 즉 tip-speed ratio (이하 TSR)에 의해 결정된다. 풍력 터빈의 출력은  $C_p$ 에 비례하고 그 값은 일반적으로 0.5 이하이기 때문에, 풍력 터빈은 터빈 출력을 최대로 하기 위해 최대출력을 추종하도록 제어 되어야만 한다. 그림 2는 풍력터빈의 각 풍속에 대한 출력-속도 특성을 보여주며, 1-2-3-4로 연결된 선은 본 논문의 동특성 해석 모델에 대한 터빈의 회전속도에 따른 최대 출력 곡선을 나타낸다.

2.2 이중여자 권선형 유도 발전기

이중여자 권선형 유도발전기의 수학적 모델링은 [2]에 제시된 회전 동기 좌표계의 dq 이론을 이용하여 모델링 되었으며, 궁극적으로 식 (2)로 표현되는 PU 단위법으로 표기된 토크 방정식을 얻을 수 있다.

$$T_e = (\lambda_d i_{qs} - \lambda_q i_{ds}) \quad (2)$$

2.3 전압원 컨버터 및 컨트롤러

그림 3은 그리드 측 컨버터의 전압과 3상 고정자 전압 사이의 관계를 나타낸다. 그림 3으로부터 그리드측 컨버터의 dq 변환 전압 방정식을 얻을 수 있고, 같은 방식으로 회전자측 컨버터의 전압방정식을 얻을 수 있다 [3]. 한편, 회전자 측 전력 컨버터의 전압 ( $V_{vsc1}$ )과 dc 커패시터 전압 및 그리드 측 전력컨버터의 전압 ( $V_{vsc2}$ )과 dc 커패시터 전압사이에는 식 (3)으로 주어지는 관계식이 성립한다.

$$V_{vsc1}^{d,q} = V_{dc} M_1^{d,q} / 2 \quad (3a) \quad V_{vsc2}^{d,q} = V_{dc} M_2^{d,q} / 2 \quad (3b)$$

PI제어를 사용하여 추종목표 값과의 오차를 줄일 수 있기 때문에 각 컨버터에 대한 제어기는 식 (4)로 설계될 수 있다 [4].

$$u^{d,q} = \frac{di^{d,q}}{dt} = \frac{di^{d,q*}}{dt} + K_p^c (i^{d,q*} - i^{d,q}) + K_I^c \int (i^{d,q*} - i^{d,q}) dt \quad (4)$$

여기서 첨자 \*는 기준값을 나타내고  $K_p^c$  및  $K_I^c$ 는 각각 전류제어의 비례 및 적분 이득을 나타낸다. 식 (4)와 각 컨버터의 전압방정식으로부터 식 (5)로 주어지는  $M_1$  및  $M_2$ 에 대한 d 및 q축 성분 을 얻을 수 있다.

$$M_1^{d,q} = \frac{2L_r}{V_{dc}} \left\{ -u^{d,q} + \frac{V_r^{d,q}}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} i_r^{d,q} + (\omega_s - \omega_r) i_r^{q,d} \right\} \quad (5a)$$

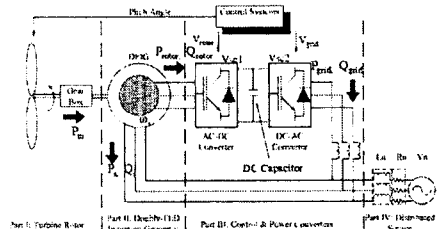


그림 1) 이중여자 유도발전기를 사용한 풍력 발전시스템의 구조

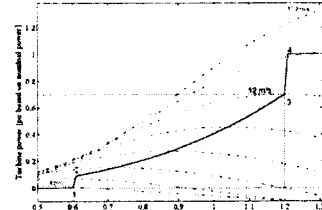


그림 2) 다양한 풍속에 대한 풍력터빈의 회전속도에 따른 출력.

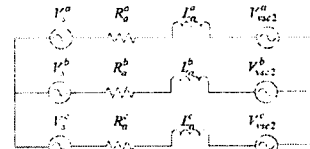


그림 3) 고정자 전압과 그리드 측 컨버터 VSC2에 대한 3상 표현.

$$M_2^{d,q} = \frac{2L_o}{V_{dc}} \left\{ -u^{d,q} + \frac{V_o^{d,q}}{L_o} - \frac{R_o}{L_o} i_o^{d,q} + \omega_s i_o^{q,d} \right\} \quad (5b)$$

회전자 측 및 그리드 측 컨버터의 전류가 일단 측정이 되면 각 전류의 기준값과 측정값의 오차를 식 (5)로 대표되는 PI제어를 통해 독립된 입력  $u_d$  및  $u_q$ 를 얻을 수 있고, 이를 다시 식 (5)와 연동하여 제어 변수  $M_1$  및  $M_2$ 를 얻을 수 있다. 따라서 궁극적으로 식 (3)에 의해 그리드 측 및 회전자 측 컨버터의 전압을 얻을 수 있다.

2.4 전력 컨버터의 제어개념

그림 4 및 5는 각각 그리드 측 및 회전자 측 전압원 컨버터의 전력제어를 위한 개념 도를 보여준다. 회전자의 속도가 측정되기만 하면 그림 2에 제시된 미리 정해논 터빈속도 대 출력 곡선으로부터 그 속도에 대응하는 터빈의 요구(기준) 출력이 나오므로 이는 실제 측정된 출력과 비교된다. 일반적으로 회전자 측 컨버터의 역할은 풍력터빈의 속도 제어와 전압 제어 및 발전기에 흡수되는 혹은 발전되는 무효전력을 변화 시키는 데 사용된다. 그리드 측 전력 컨버터의 제어 개념은 앞에서 설명한 회전자 측 컨버터의 그것과 매우 유사하다. 일반적으로 그리드 측 컨버터의 역할은 dc 커패시터 전압을 일정하게 유지함을 목적으로 하고, 또한 무효전력을 흡수하거나 발생시키는 역할을 한다 [5].

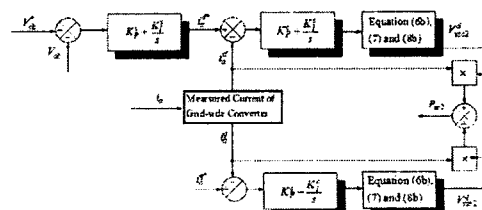
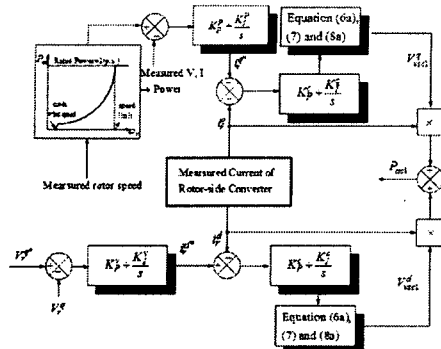


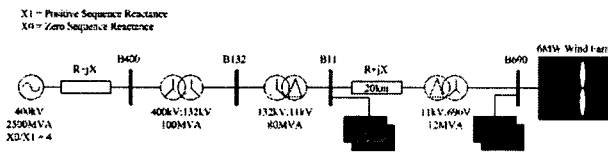
그림 4) 그리드 측 전압원 전력 컨버터의 전력 제어를 위한 개념도



〈그림 5〉 회전자 축 전압원 전력 컨버터의 전력 제어를 위한 개념도.

### 3. 풍력발전시스템의 동특성 해석

#### 3.1 시뮬레이션 모델



〈그림 6〉 분산전원과 결합된 6MW 풍력 발전시스템

그림 6에 제시된 6MW급 이중여자 풍력 발전시스템은 본 논문의 시뮬레이션 모델로 [3]에 제시된 풍력발전시스템을 수정한 블록도를 나타내며 MATLAB/SIMULINK에서 제공하는 SimPower System Block을 사용하여 시뮬레이션 모델이 구성되었다.

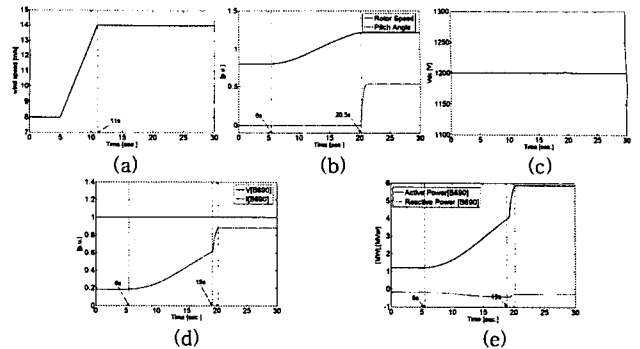
#### 3.2 풍력터빈

풍력 터빈의 출력은 미리 정해진 트래킹 특성 곡선에 의해 제어 되는데, 그림 6에 제시된 모델은 그림 2의 특성곡선에 의해 풍력터빈의 출력을 제한 받게 된다. 여기서 위치 3에서의 바람속도는 12[m/s]이고 최대출력은 0.7이다. 그림 7 (a)에서 알 수 있듯이 초기 바람속도는 8[m/s]로 셋팅 되었고, 5초일 때 바람속도가 증가를 시작하여 6초 후 즉 11초까지 바람속도가 14m/s로 증가를 한 후 11초 이후에는 바람의 속도가 14m/s로 일정하게 유지되는 속도를 정하였다. 그림 7(b)에서 알 수 있듯이, 터빈의 회전속도는 바람이 변한 직후 즉 6초에서부터 20.5초까지 증가를 시작하고 20.5초 이후에는 터빈 속도는 1.21[pu]로 고정된다. 여기서 풍력터빈의 피치 각이 20.5초에서 0°~0.5[pu]로 변함으로써 터빈로터의 속도를 1.21[pu]로 유지하도록 하고 따라서 그림 2에 보이는 터빈의 트래킹 곡선으로부터 풍력터빈의 출력을 1[pu]로 유지하도록 함을 알 수 있다. 그림 7(c)는 커패시터의 전압을 보여준다. 그림 7(d)는 B690 버스 축의 전압 및 전류를 보여주는데, 전압은 항상 1 [pu]를 유지하도록 발전기의 발전전력 중 무효전력을 제어해주기 때문에 항상 1이다. 그림 7(b) 및 (e)에서 알 수 있듯이, 풍력 터빈의 회전속도가 증가 할수록 유효전력은 증가하며, 터빈속도가 일정해지는 20.5초 이후 유효전력 역시 정격전력에 가까운 전력 즉 6MW에 가까운 전력을 일정하게 유지함을 볼 수 있다. 한편 유효 전력 및 무효전력에서 19초에서 20.5초사이의 증가분은 그림 2 및 그림 7 (b)에서 알 수 있듯이 19초에서 풍력터빈의 회전속도는 1.2로 트래킹 곡선으로부터 터빈의 출력은 0.7[pu]인데, 20.5초에서 12.1이 되었기 때문에 터빈의 출력은 1[pu]가 되므로, 이 사이의 0.3 [pu]증가분을 나타낸다고 볼 수 있다.

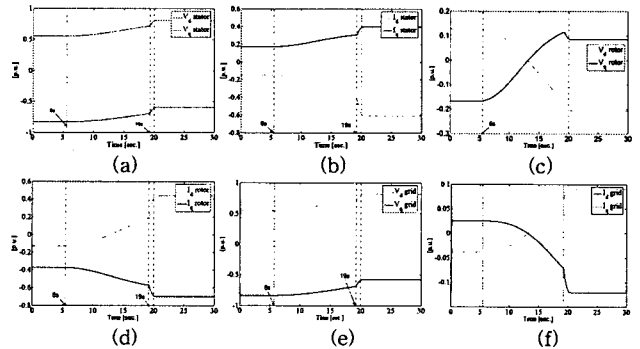
#### 3.3 발전기 및 전력전자

그림 8 (a) 및 (b)는 발전기 고정자의 dq전압 및 전류특성을 보여준다. 터빈의 회전속도가 증가하기 시작하는 6초에서 dq전압 모두 증가를 보이고 터빈속도가 일정해지는 20.5초 이후에 dq전압역시 일정해지고 d축 전압은 항상 양의 값을 q축 전압은 항상 음의 값을 갖는다. 한편, d축 전류는 항상 음의 값을 갖으며 회전속도가 증가할수록 감소함을 알 수 있고, d축 전류는 회전속도가 증가할수록 커지며 항상 양의 값을 갖는다.

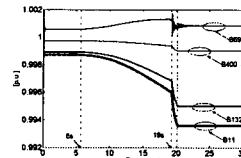
반면에 회전자 축 컨버터의 q축 전압은 그림 8 (c) 및 (d)에서 알 수 있듯이, 발전기의 고정자 전압과 동일한 양상으로 증가를 하나, d축 전압은 오히려 반대의 양상을 보이며, 발전기의 속도가 동기속도가 되는 시점(그림 7(b)에서 알 수 있듯이 약 13초)에서 양에서 음으로 음에서 양으로 각각 값이 변화한다. 회전자 축 컨버터의 d 및 q축 전류는 각각 발전기 고정자의 q 및 d축 전류 동일한 양상을 보인다. 마지막으로 그림 8 (e) 및 (f)의 그리드 축 전압 및 전류의 전압은 발전기의 고정자 축 전압과 동일함을 알 수 있고, dq축 전류는 회전자 축 전력 컨버터의 dq축 전압과 유사하게 동기속도가 되는 시간을 기점으로 부호가 바뀔 수 있다.



〈그림 7〉 풍력 터빈의 동특성 : (a) 바람 속도, (b) 회전 속도 및 피치각 변화, (c) 커패시터 전압, (d) B690에서 측정된 발전기 축 전압 및 전류 와 (e) 발전 유효 및 무효전력.



〈그림 8〉 발전기 및 컨버터의 dq전압 전류 특성: (a) 및 (b) 발전기, (c) 및 (d) 회전자 축 컨버터, (e) 및 (f) 그리드 축 컨버터.



〈그림 9〉 정상상태에서 분산전원의 각 버스 전압.

#### 3.4 분산전원의 각 버스전압

그림 9는 분산전원의 각 버스에서 측정된 전압 분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 버스에서의 전압은 0.99~1.00사이로 거의 모두 1을 유지한다고 볼 수 있으나, 전압의 크기 순으로 나열하면 B400 - B132 - B11 순으로 작고, 그래프의 변화추이는 같다.

### 4. 결 론

본 논문은 이중여자 권선형 유도발전기로 구성된 풍력 발전시스템의 동특성 해석에 대해 기술하였다. 먼저 풍력 발전시스템을 구성하는 각각의 요소의 수학적 모델링을 수행하였다. 다음으로 발전기의 회전자 축 및 그리드 축 컨버터의 수학적 모델링으로부터 터빈의 속도 제어, 무효전력 제어 및 컨버터 사이의 DC 커패시터 제어 개념에 대한 블록도들이 제시되었다. 마지막으로 MATLAB/SIMULINK를 사용하여 분산전원을 고려한 6MW급 풍력발전시스템에 대한 동특성이 수행되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Rajib Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Dpubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison with Alternative Schemes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 17, no. 3, pp. 414-421, Sept. 2002.
- [2] Chee-Mun Ong, *Dynamic Modeling of Electric Machinery*. Prentice Hall PTR, 1998.
- [3] P. Cartwright, L. Holdsworth, J.B. Ekanayake and N. Jenkins "Co-ordinated voltage control strategy for a doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind farm," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 4, pp.495-502, July. 2004.
- [4] Lie Xu, B.R. Andersen and Phillip Cartwright, "Control of VSC Transmission Systems under Unbalanced Network Conditions," *IEEE T&D Conf.* pp.626-632, Sept. 2003.
- [5] Markus A. Poller, " Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms," *IEEE Trans. Bologna PowerTech Conf.*, June. 2003.