

이중여자 유도발전기에 의한 가변속 풍력 발전시스템의 동특성 해석

論 文

55B-6-6

Dynamic Analysis of Variable Speed Wind Power Systems with Doubly-Fed Induction Generators

崔 璋 英* · 張 錫 明†

(Jang-Young Choi · Seok-Myeong Jang)

Abstract -This paper deals with the dynamic analysis of variable speed wind power systems with doubly-fed induction generators (DFIG). First, the mathematical modeling of wind farm which consists of turbine rotor, DFIG, rotor side and grid side converter and control systems is presented. In particular, the equation for dynamic modeling of the DFIG and the AC/DC/AC converter is expressed as dq reference frame. And then, on the basis of mathematical modeling for each component of wind farm, dynamic simulation algorithms for speed and pitch angle control of wind turbine and generated active and reactive power control of the DFIG and the AC/DC/AC converter are established. Finally, 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 in steady state. Moreover, this paper also presents the dynamic performance for the case when the voltage sag in grid source and phase fault in bus are occurred.

Key Words : dynamic analysis, variable speed wind power systems, doubly-fed induction generators.

1. 서 론

풍력 에너지는 친 환경적이고 경제적이어서 최근 들어 전 세계적으로 가장 중요한 신 재생에너지 중의 하나로 자리잡아가는 추세이며, 관련 산업분야도 빠르게 발달하고 있다. 그러나 풍력 발전 시스템은 유효 및 무효전력 제어의 어려움으로 전력시스템 분야에서 여러 가지 문제를 갖고 있었으나, 이를 해결하기 위한 다양한 노력의 결과와 함께 국내외적으로 상업용 발전시스템의 건설이 크게 증가하고 있다 [1].

즉 독일의 경우는 2002년 6월말 풍력 발전 시스템의 총 정격 용량이 9837.27 MW에 달하고 있으며, 또한 풍력터빈 한 기당 평균 발전용량이 지속적으로 증가되고 있다. 2002년 상반기동안 독일에 설치된 풍력터빈 한 기당 평균 발전용량이 1314kW로, 이는 2001년 같은 분기에 비하여 약 8%의 증가를 보인 것이다 [2]. 또한 영국은 2MW급 유도발전기에 의한 풍력단지 18 곳을 해안근처에 조성할 계획에 있다고 발표 하였으며, 각 풍력 단지마다 평균 60MW의 발전량을 생산할 수 있을 것이라고 예측했다. 영국뿐만 아니라, 네덜란드 및 스페인과 같은 유럽의 각 국에서도 약 1000MW까지의 용량을 갖는 해안가 근처의 풍력단지 조성을 계획 중이다 [3].

한편, 풍력 발전시스템의 원천인 바람은 계절 및 시간 등의 변화에 따라 가변속 특성을 갖고 있기 때문에, 이러한 조건에서 일정 주파수의 전력을 생산하는 기술이 풍력 발전시스템에서 반드시 필요하다. 이 기술은 정 주파수 컨버터가 그리드(grid)와 발전기 사이의 인터페이스에 사용된다는 가정 하에 동기 발전기를 사용하여 가능케 할 수 있다. 또 하나의 대안은 가변 주파수 회전자 전압을 회전자에 공급함으로써 고정자로부터 일정한 주파수의 전력을 발전할 수 있는 이중여자 권선형 유도발전기를 사용하는 것이다. 이중여자 권선형 유도 발전기는 양방향 PWM 컨버터를 회전자 측과 그리드 측에 필요로 하고 이를 통해 양방향 전력 제어를 하게 되는데, 이는 동기기의 단방향 전력제어에 비해 제어시스템의 구조를 복잡하게 만든다. 그러나 이중여자 유도발전기의 회전자 전류가 PWM 인버터를 사용한 고정자 자속 제향 벡터 제어에 의해 제어된다면 고정자에서 생산된 유효 및 무효전력을 분리해서 제어할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 유도기는 동기기와는 달리 역률이 1이 아닌 전력 생산을 하기 때문에, 발전을 위해 필요한 무효 전력을 공급하기 위한 추가적인 커패시터를 설치하는 비용을 줄일 수 있다는 장점을 갖는다 [1].

이중여자 권선형 유도기를 사용한 풍력발전시스템의 동특성에 대한 연구는 회전자 측 및 그리드 측 전력컨버터사이의 전력제어 개념, 다양한 풍속에 대해 풍력 터빈의 회전속도 대 출력 곡선으로부터 얻어지는 최대 출력 추종 제어 개념 및 풍력 터빈의 속도 제어를 위한 피치각 제어 측면에서 주로 이루어지고 있다 [4-6].

† 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : smjang@cnu.ac.kr

* 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 2006年 4月 1日
最終完了 : 2006年 5月 11日

따라서, 본 논문은 이중여자 풍력 발전기를 갖는 풍력 발전시스템의 동특성 해석을 위해서 언급한 내용 위주로 다루고자 한다. 먼저 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 경우와 그리드 전원의 불안정 및 특정 버스에 고장 발생 등의 이상 상태인 경우에 풍력발전시스템의 발전 특성에 대해 동특성 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2. 이중여자 유도발전기를 갖는 풍력발전 시스템

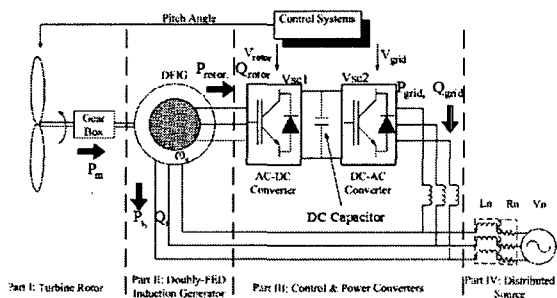


그림 1. 이중여자 유도발전기를 사용한 풍력 발전시스템의 개념도

Fig. 1. Schematic of wind power generation systems with DFIG

2.1 시스템의 구조

그림 1은 이중여자 권선형 유도발전기 (이하 DFIG)를 사용한 풍력발전시스템의 개요를 보여준다. 그림으로부터 DFIG를 이용한 풍력 발전시스템은 크게 4가지 즉 터빈로터, DFIG, 전력 컨버터 및 분산전원 부분으로 구성된다. 특히, 전력 컨버터 부분은 DFIG 회전자 측 AC-DC컨버터와 그리드 측 DC-AC 컨버터로 구분된다. 두 컨버터 모두 DC 전압원에서 AC전압을 합성하기위해 IGBT 전력전자 소자를 사용한 전압원 컨버터이다. 그리드 측 컨버터의 역할은 DC 링크 전압을 일정하게 유지하고 시스템의 역률을 향상시키는 것이고, 회전자 측의 컨버터의 역할은 발전기의 고정자와 그리드 사이에 교환되는 유효 및 무효전력을 제어하는 것이다 [4]. 다음으로 DFIG에서 회전자 권선은 슬립링과 브러시를 통해 회전자 측 컨버터에 연결되어 있고, 고정자 권선은 직접 그리드에 연결되어 있다. 발전 과정은 풍력 터빈에 의해 얻어진 기계적 출력은 DFIG에 의해 전기적 출력으로 변환되고, 이는 회전자와 고정자권선을 통해 그리드에 전송된다. 이 과정에서 제어시스템은 그리드 측의 무효전력, DC 버스 전압 및 풍력 터빈의 출력을 제어하기 위하여 그리드 측 컨버터와 회전자 측 컨버터에 전압 명령 신호를 내보내고 동시에 풍력 터빈에 피치 각 명령을 주어 풍력터빈의 속도를 제어하게 된다.

2.2 전력의 흐름

그림 1에서 바람의 속도 w 에 의해 DFIG의 회전자가 기

계적 토크 T_m 을 갖고 회전속도 ω_r 로 회전할 때 기계적 출력은 $P_m = T_m \omega_r$ 이다. 회전 속도가 일정해 지는 정상상태에서 전기적 토크는 운동방정식에 의해 기계적 토크와 같다. 즉, $T_e = T_m$ 이 되고 유도발전기의 고정자 전력은 $P_s = T_e \omega_s$ 가 된다. 여기서 ω_s 는 고정자권선과 연결된 그리드 측 전원의 회전자계의 각 주파수이다. 결론적으로 만약 DFIG의 손실이 0이라 가정하면 $P_m = P_r + P_s$ 이므로 DFIG의 회전자 전력은 식 (1)로 표현할 수 있다 [5].

$$P_r = -sP_s \tag{1}$$

여기서 $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ 는 DFIG의 슬립으로 일반적으로 슬립의 절대 값은 1보다 훨씬 작다. 음의 슬립의 경우 즉 동기 속도보다 회전 속도가 빠른 경우 식 (1)에 의해 P_r 은 양의 값을 갖고, 양의 슬립의 경우는 P_r 은 음의 값을 갖는다. 만약 회전속도가 동기속도보다 빠른 경우, 회전자의 발전 전력은 회전자 측 컨버터를 통해 커패시터에 전달되고 그것의 DC 전압을 상승시킨다. 반대로 회전속도가 동기속도보다 느린 경우, 회전자의 전력은 커패시터로부터 회전자 측 컨버터를 통해 공급받고 그것의 DC 전압을 감소시킨다. 이 때, 회전자 측 전력컨버터를 통한 전력 조류에 의해 증가 혹은 감소하는 커패시터의 DC 전압을 일정하게 유지시키기 위하여 그리드 측 전력 컨버터를 통해 전력을 그리드 측에 내보내거나 그리드 측에서 전력을 공급받는다. 이러한 과정에서 DFIG 회전자 측 컨버터에서 흡수 혹은 공급되는 전력을 통해 풍력 터빈의 속도가 제어된다.

3. 시스템의 수학적 모델링

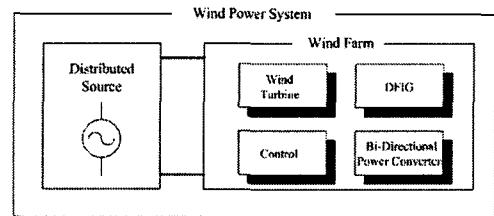


그림 2. 풍력발전시스템 개념도

Fig. 2. Block diagram of wind power systems

그림 2는 풍력 발전시스템의 개념 도를 보여주며, 본 장에서는 특히 wind farm 부분을 구성하는 각각의 요소들 즉 풍력 터빈, DFIG, 전력전자에 대한 수학적 모델링을 수행하고, 특히 풍력발전기의 전력 조류 제어를 위한 기본개념을 제시하고자 한다.

3.1 풍력 터빈

풍력 터빈은 그것의 속도 대 출력 특성에 의해 특징지어진다. 임의의 바람속도에 대하여 풍력 터빈이 흡수할 수 있는 즉 풍력 터빈의 출력은 식 (2)로 주어진다 [6].

$$P_t = 0.5C_p \rho A w^3 \tag{2}$$

여기서 ρ 는 공기밀도 이고, A 는 터빈의 단면적이며 w 는 바람의 속도로 단위는 m/s이다. C_p 는 전력 계수로 풍력 터

빈의 날개 끝 속도와 바람 속도의 비 즉 식 (3)으로 주어지는 tip-speed ratio (이하 TSR)에 의해 결정된다.

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{w} \quad (3)$$

여기서 w_t 및 R 은 터빈 날개의 선속도 및 반경을 나타낸다. 그림 3은 본 논문의 다음 장에서 논의될 동특성 시뮬레이션에 쓰일 터빈의 C_p 곡선 vs. TSR의 특성을 보여준다. 다양한 TSR의 값에 대해 C_p 는 0.48이하의 값을 갖으며, 본 논문에서 제시된 풍력 터빈뿐만 아니라 대부분의 경우 풍력 터빈의 C_p 는 일반적으로 0.5이하의 값을 갖는다. 따라서 식 (2)에서 알 수 있듯이, 풍력 터빈의 출력은 C_p 에 비례하기 때문에, 풍력 터빈은 터빈 출력을 최대 하기 위해 최대 출력을 추종하도록 제어 되어야만 한다. 한편, 풍력 터빈의 토크에 대한 해석적 표현은 식 (4)로 주어진다 [7].

$$T_m = 0.5 \rho C_t R^3 w^2 \quad (4)$$

여기서 $C_t = C_p / \lambda$ 로 주어지는 토크 계수이다. 주어진 풍속에서 공기역학적인 효율을 최대 하기 위한 터빈의 회전속도는 식 (3)으로부터 식 (5)로 표현된다.

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} w}{R} \quad (5)$$

여기서 λ_{opt} 는 전력계수 C_p 가 최대가 되는 TSR의 값이다. 식 (5)를 식 (4)에 대입함으로써 최적 운전속도에서 풍력 터빈의 기계적 토크는 식 (6)과 같다.

$$T_m^{opt} = \left\{ 0.5 \rho C_p^{max} \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} \right\} \omega_{opt}^2 = K_{opt} \omega_{opt}^2 \rightarrow P_m^{opt} = K_{opt} \omega_{opt}^3 \quad (6)$$

식 (6)으로부터 풍력 터빈에 대한 최적의 기계적 출력 및 토크는 최적의 회전속도의 3승 및 2승에 각각 비례함을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 풍력 터빈의 제어는 터빈 토크-속도 곡선을 이용하거나 [8][9] 터빈 출력-속도 곡선을 이용하여 [4][5] 각각의 풍속에 대해 최대 출력 혹은 최대 토크를 터빈이 발생시키도록 이루어진다. 식 (6)으로부터 풍력 터빈에 대한 최적의 기계적 출력 및 토크는 최적의 회전속도의 3승 및 2승에 각각 비례함을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 풍력 터빈의 제어는 터빈 토크-속도 곡선을 이용하거나 [8][9] 터빈 출력-속도 곡선을 이용하여 [4][5] 각각의 풍속에 대해 최대 출력 혹은 최대 토크를 터빈이 발생시키도록 이루어진다. 그림 4는 풍력터빈의 각 풍속에 대한 출력-속도 특성을 보여주며, 1-2-3-4로 연결된 선은 다음 장에 논의될

동특성 해석 모델의 터빈의 피치 각 제어 및 속도 그에 따른 출력 제어를 위해 사용될 터빈의 회전속도에 따른 최대 출력 곡선을 나타낸다. 특히 2-3을 잇는 곡선은 각 풍속에 대해 최대출력을 내는 점을 연결되었음을 알 수 있다. 그림 4에 표시된 지점 1의 속도는 컷-인 스피드라 하고 1-2를 연결하는 선은 낮은 풍속에서 터빈의 회전속도가 상수에 가깝다.

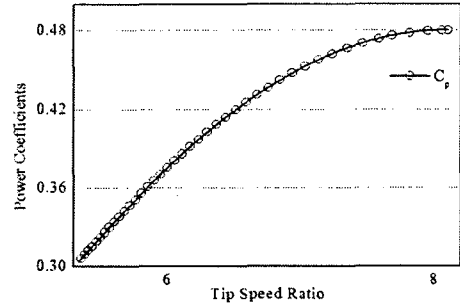


그림 3. Cp 곡선 vs. TSR
Fig. 3. Cp curve vs. TSR

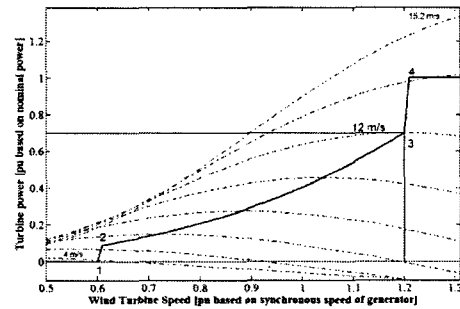


그림 4. 다양한 풍속에 대한 풍력터빈의 회전속도에 따른 출력 곡선
Fig. 4. Turbine power curve according to rotational speed of wind turbine for various values of wind speed

다음으로 지점 4 이후 즉 터빈의 회전속도가 1.21pu 이상에서는 터빈 출력은 일정한데, 만약 풍속이 계속해서 증가하는 경우 터빈속도 역시 증가되므로 이때 바로 터빈의 피치 각을 조절하여 속도를 제어하고 이에 따른 출력도 일정하도록 할 수 있다. 한편, p.u. (Per Unit) 단위법에서 식 (2)는 식 (7)로 표현된다.

$$P_t^{pu} = C_p^{pu} (w^{pu})^3 \quad (7)$$

여기서 C_p^{pu} 는 C_p 의 최대값을 베이스로 한 즉 전력계수를 p.u. 단위법으로 표현한 값이다.

3.2 DFIG

이상적인 3상 유도기는 대칭적으로 균등한 공극을 갖는다고 가정된다. 정좌표계 및 동기 좌표계에서의 d-q 모델링이 일반적으로 유도기 해석에 사용될지라도, 임의의 기준 좌표계에서 d-q 모델링은 대개 다른 시스템과의 결합성 및 편리성 측면에서 유리하기 때문에 본 논문에서는 유도기의 해

석에 임의의 기준좌표에서 d-q 모델링을 사용하였다. 즉 그림 5에서 알 수 있듯이, 본 논문은 회전자의 회전방향으로 속도 ω 로 회전하는 임의의 기준좌표에서 유도기의 전압방정식을 유도하였다. 한편, 정지좌표계 및 동기좌표계에서 유도기의 전압 방정식은 그림 5에서 $\omega=0, \omega=\omega_e$ 로 각각 바뀌어 줌으로써 얻을 수 있다. 여기서 ω_e 는 동기 각주파수 즉 고정자 기자력의 각 주파수를 나타낸다. 그림 5에 보이는 각 속도 ω 로 회전하는 기준좌표에서 qd0와 고정자 및 회전자 3 상과의 관계는 식 (8)과 같다 [10].

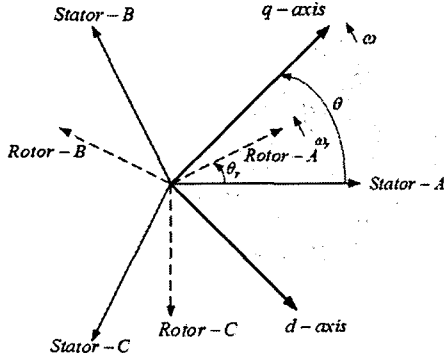


그림 5. abc와 임의의 기준좌표 qd0사이의 관계
Fig. 5. Relationship between abc and arbitrary qd0

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 변수 f 는 유도기의 상 전압, 전류 및 쇄교자속을 나타낸다. 그림 5에서 변환 각 $\theta(t)$ 즉 고정자 a상과 속도 ω 로 회전하는 기준좌표의 q축사이의 각은 식 (9a)에 의해 얻을 수 있다. 같은 방식으로 회전자 각 $\theta_r(t)$ 즉 고정자 a상과 속도 ω_r 로 회전하는 회전자 a상사이의 각은 식 (9b)에 의해 얻을 수 있다.

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (9a)$$

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (9b)$$

결론적으로 식 (8), (9) 및 [10]에 제시된 방법을 사용하여 식 (10)으로 표현되는 임의의 기준좌표에서의 dq 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (10)$$

여기서 밑첨자 d, q, r 및 s 는 각각 임의의 기준좌표에 대한 d 축 및 q 축과 발전기의 회전자 및 고정자를 나타내며, V, i, ω 및 λ 는 각각 전압, 전류, 각 주파수 및 쇄교자속을 나타낸다. 여기서 회전자의 저항 및 쇄교자속은 고정자로 환산한 값이고 고정자와 회전자의 쇄교자속은 식 (11)로 주어진다.

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (11)$$

여기서 L_s 와 L_r 는 각각 유도기의 고정자와 회전자의 동기 인덕턴스로 각각 $L_m + L_{ls}$ 와 $L_m + L_{lr}$ 로 계산된다. L_{ls}, L_{lr} 는 각각 고정자와 고정자로 환산된 회전자의 누설 인덕턴스이며, L_m 은 고정자에 대한 자화 인덕턴스로 식 (12)의 관계를 갖고 이 식은 회전자의 변수를 고정자로 환산하여 표현할 때 사용되어졌다 [10].

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3 N_s}{2 N_r} L_{sr} = \frac{3 N_s}{2 N_r} L_{rr} \quad (12)$$

여기서 L_{ss}, L_{rr} 및 L_{sr} 는 각각 고정자의 자기인덕턴스, 회전자의 자기인덕턴스 및 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스를 나타내고, N_s 및 N_r 은 고정자와 회전자 권선의 턴 수이다. 위에서 언급된 방정식으로부터 그림 6으로 표현되는 등가회로를 얻을 수 있다.

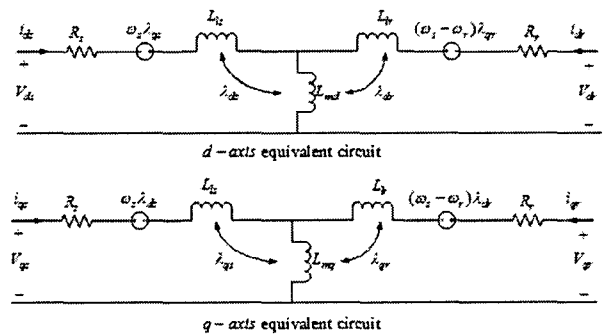


그림 6. 유도기의 dq축 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit representation of an induction machine in the arbitrary reference frame

그림 6에서 고정자 및 회전자의 증성점과 외부와의 결선이 없는 경우 3상 고정자 및 회전자의 전류 합이 0이라고 가정할 수 있으므로, d-q 변수만으로 유도기의 고정자와 회전자가 표현되었다. 여기서 전류의 방향이 외부에서 발전기 안으로 들어가는 경우를 양으로 가정하였다. 만약 발전기에서 외부로 향하는 전류의 방향을 양으로 한다면 식 (10)의 저항 부분의 부호는 모두 음으로 바꾸어주기만 하면 된다 (11). 다음으로 발전기의 전기적 토크는 앞서 구한 고정자전류와 고정자 쇄교자속으로부터 pu 단위 측면에서 식 (13)과 같이 구할 수 있다 [12].

$$T_e = (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (13)$$

마지막으로 기기의 운동 방정식은 풍력터빈의 기계적 토크와 식 (13)의 전기적 토크로부터 식 (14)로 계산된다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2J} (T_m - T_e) \quad (14)$$

여기서 J는 관성을 나타낸다.

3.3 전압원 컨버터 및 컨트롤러

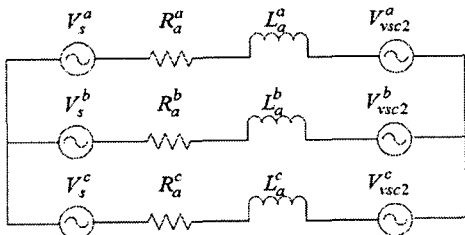


그림 7. 고정자 전압과 그리드 측 컨버터 VSC2의 3상 표현
Fig. 7. Three-Phase representation of stator voltage and Vsc2

그림 7은 그리드 측 컨버터의 전압과 3상 고정자 전압 사이의 관계를 나타낸다. 편의상, 이 모델은 Park 변환 행렬에 의해 공급 주파수 ω_s 에서 회전하는 dq좌표계로 변환되어질 수 있다. 이러한 시변 변환과정에서, 기본 주파수에서 정상 분은 상수가 되고, 스위칭으로 인한 상(phase)들 사이의 상호작용에 의한 효과는 없다고 하면, 그림 7에 보이는 모델의 dq 변환 전압 방정식은 식 (15)와 같다 [12].

$$\frac{di_a^d}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a^d + \omega_s i_a^q + \frac{1}{L_a} V_s^d - \frac{1}{L_a} V_{vsc2}^d \quad (15a)$$

$$\frac{di_a^q}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a^q - \omega_s i_a^d + \frac{1}{L_a} V_s^q - \frac{1}{L_a} V_{vsc2}^q \quad (15b)$$

여기서 i_a , L_a 및 R_a 는 각각 고정자와 그리드 측 컨버터 사이에 흐르는 전류, 그리드 측 컨버터의 인덕턴스 및 저항을 의미하며, 위 첨자 d 및 q는 각각 d축 및 q축을 의미한

다. 한편 DC 전압을 일정하게 공급해 주는 커패시터에 흐르는 전류(i_c)는 식 (16)과 같다.

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (16)$$

여기서 C는 커패시터의 정전용량이고, V_{dc} 는 커패시터 양단 전압이다. 다음으로 회전자측 전력컨버터, DC 커패시터 및 그리드 측 전력 컨버터사이의 전력 관계는 전력 평형에 의해 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{dc} = -P_{ac1} + P_{ac2} \quad (17a)$$

$$P_{ac1} = \frac{3}{2} (V_{vsc1}^d \cdot i_r^d + V_{vsc1}^q \cdot i_r^q) \quad (17b)$$

$$P_{ac2} = \frac{3}{2} (V_{vsc2}^d \cdot i_a^d + V_{vsc2}^q \cdot i_a^q) \quad (17c)$$

$$P_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} \quad (17d)$$

여기서 V_{vsc1} 및 i_r 은 각각 회전자 측 전력컨버터의 전압 및 회전자와 회전자 측 전력 컨버터 사이에 흐르는 전류를 의미한다. 한편, 회전자 측 전력 컨버터의 전압과 dc 커패시터 전압 및 그리드 측 전력컨버터의 전압과 dc 커패시터 전압사이에는 식 (18)로 주어지는 관계식이 성립한다.

$$V_{vsc1}^{d,q} = \frac{V_{dc}}{2} M_1^{d,q} \quad (18a)$$

$$V_{vsc2}^{d,q} = \frac{V_{dc}}{2} M_2^{d,q} \quad (18b)$$

여기서 M_1 및 M_2 는 각각 회전자 측 및 그리드 측 전압원 컨버터의 전압을 제어하는 제어 신호 혹은 변수라 한다 [13]. 한편, 회전자 측 전력컨버터의 전압과 회전자 전압의 관계는 그리드 측 전력 컨버터 전압과 그리드 전압사이의 전압관계 유도과 동일하게 이상적인 컨버터 모델이라는 가정 아래 따라 식 (19)와 같이 유도된다.

$$\frac{di_r^d}{dt} = -\frac{R_R}{L_R} i_r^d + (\omega_s - \omega_r) i_r^q + \frac{1}{L_R} V_r^d - \frac{1}{L_R} V_{vsc1}^d \quad (19a)$$

$$\frac{di_r^q}{dt} = -\frac{R_R}{L_R} i_r^q - (\omega_s - \omega_r) i_r^d + \frac{1}{L_R} V_r^q - \frac{1}{L_R} V_{vsc1}^q \quad (19b)$$

여기서 L_R 및 R_R 은 각각 회전자 측 컨버터의 인덕턴스 및 저항을 의미한다. 식 (15)~식 (19)를 이용하여 식 (20)으로 정리되는 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_R/L_R & \omega_s - \omega_r \\ -(\omega_s - \omega_r) & -R_R/L_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_R} \begin{bmatrix} V_r^d \\ V_r^q \end{bmatrix} - \frac{V_{dc}}{2L_R} \begin{bmatrix} M_1^d \\ M_1^q \end{bmatrix} \quad (20a)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a^d \\ i_a^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & \omega_s \\ -\omega_s & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^d \\ i_a^q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} V_s^d \\ V_s^q \end{bmatrix} - \frac{V_{dc}}{2L_a} \begin{bmatrix} M_2^d \\ M_2^q \end{bmatrix} \quad (20b)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{4C} \left[\left(M_1^d \cdot i_r^d + M_1^q \cdot i_r^q \right) + \left(M_2^d \cdot i_a^d + M_2^q \cdot i_a^q \right) \right] \quad (20c)$$

식 (20)에 의해 표현된 시스템 모델은 식 (20c)에서 상태변수 i^d 및 i^q 와 입력 M^d 및 M^q 사이의 곱이 존재하기 때문에 비선형적이다. 그리드 측 혹은 회전자 측 전력 컨버터는 무효 및 유효전력을 즉시 제어하기 위하여 상태변수 i^d 및 i^q 를 필요로 하고 DC 커패시터 전압 V_{dc} 는 항상 일정한 값을 유지해야만 한다. 그러나 이 모델은 두개의 독립적인 입력 M^d 및 M^q 를 갖고 있어서 정확한 피드백 기법을 구현하기 어렵다. 이러한 어려움은 식 (20)으로부터 제어 기법을 두 가지 루프로 나누어 해석함으로써 해결될 수 있는데, 하나는 내부의 빠른 전류루프(inner fast current loop)이고 나머지 하나는 외부의 느린 dc 전압 루프 (outer slow dc voltage loop)가 그것이다 [13-14]. 우선 임의의 입력에 대해 식 (21)로 정의되는 행렬식을 고려하기로 한다 [15].

$$\begin{bmatrix} u^d \\ u^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di^d}{dt} \\ \frac{di^q}{dt} \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 i^d 와 i^q 는 각각 발전기 고정자와 그리드 측 컨버터 및 회전자와 회전자 측 컨버터 사이에 흐르는 d 및 q 성분 전류를 나타내며, 입력 u^d 및 u^q 에 따라 독립적으로 제어될 수 있다. PI제어를 사용하여 추종목표 값과의 오차를 줄일 수 있기 때문에 각 컨버터에 대한 제어기는 식 (22)로 주어지는 수식으로 설계될 수 있다.

$$\begin{aligned} u^d &= \frac{di^d}{dt} = \frac{di^{d*}}{dt} + K_p^c (i^{d*} - i^d) + K_i^c \int (i^{d*} - i^d) dt \\ u^q &= \frac{di^q}{dt} = \frac{di^{q*}}{dt} + K_p^c (i^{q*} - i^q) + K_i^c \int (i^{q*} - i^q) dt \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 첨자 *는 기준값을 나타내고 K_p^c 및 K_i^c 는 각각 전류제어기의 비례 및 적분 이득을 나타낸다. 식 (20)과 식 (22)로부터 식 (23)으로 주어지는 M_1 및 M_2 에 대한 d 및 q축 성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M_1^d &= \frac{2L_R}{V_{dc}} \left\{ -u^d + \frac{V_r^d}{L_R} - \frac{R_R}{L_R} i_r^d + (\omega_s - \omega_r) i_r^q \right\} \\ M_1^q &= \frac{2L_R}{V_{dc}} \left\{ -u^q + \frac{V_r^q}{L_R} - \frac{R_R}{L_R} i_r^q - (\omega_s - \omega_r) i_r^d \right\} \end{aligned} \quad (23a)$$

$$\begin{aligned} M_2^d &= \frac{2L_a}{V_{dc}} \left\{ -u^d + \frac{V_a^d}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a^d + \omega_s i_a^q \right\} \\ M_2^q &= \frac{2L_a}{V_{dc}} \left\{ -u^q + \frac{V_a^q}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a^q - \omega_s i_a^d \right\} \end{aligned} \quad (23b)$$

회전자 측 컨버터 및 그리드 측 컨버터의 전류가 일단 측정 이 되면 각 전류의 기준값과 측정값의 오차를 식 (22)로 대표되는 PI제어를 통해 독립된 입력 u^d 및 u^q 를 얻을 수 있고, 이를 다시 식 (23)과 연동하여 제어 변수 M_1 및 M_2 를 얻을 수 있다. 따라서 궁극적으로 식 (18)에 의해 그리드 측 및 회전자 측 컨버터의 전압을 얻을 수 있다.

식 (22)로 표현된 전류제어를 위한 개념과 유사하게, 커패시터의 dc 전압제어를 위한 제어기는 식 (24)와 같이 설계될 수 있다.

$$i_e = \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{dV_{dc}^*}{dt} + K_p^v (V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i^v \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (24)$$

여기서 첨자 *는 기준값을 나타내고 K_p^v 및 K_i^v 는 각각 전압제어기의 비례 및 적분 이득을 나타낸다. 식 (24)와 식 (20c)를 이용하여 dc 전압을 제어하기 위한 그리드 측 d축 기준 전류 측 제어입력 i_a^{d*} 를 얻을 수 있다.

3.4 전력컨버터의 제어 개념

3.3절에서 보는 바와 같이 전압원 전력 컨버터의 수학적 모델링은 크게 회전자 측 전압원 전력 컨버터 모델링, 그리드 측 전력컨버터 모델링, dc 커패시터에 걸리는 전압 및 이들 과정에서 도출되는 피치 각 모델링과 같이 크게 4가지로 나눌 수 있다. 그 만큼 복잡한 시스템으로 이번 절에서는 개략적인 시뮬레이션 블록도를 다루어 전력 변환 및 제어방식을 어떻게 가지고 가는지에 대해 알아보기로 한다.

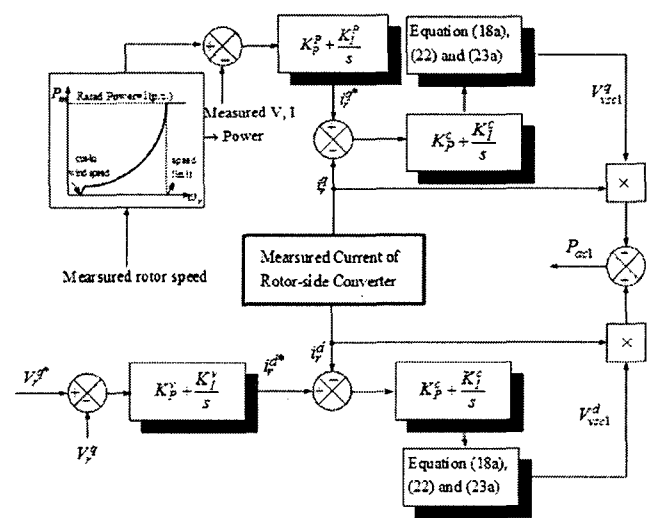


그림 8. 회전자 측 전압원 전력 컨버터의 전력 제어를 위한 개념도

Fig. 8. Block diagram for power control of rotor side voltage source converter

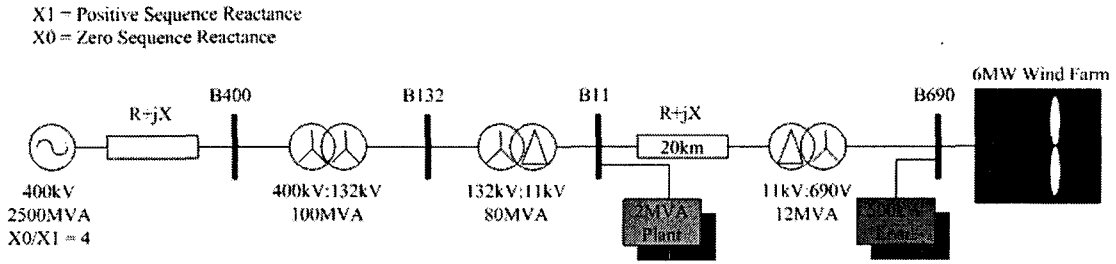


그림 11. 분산전원과 결합된 6MW 풍력 발전시스템
 Fig. 11. 6MW wind farm connected with distributed source

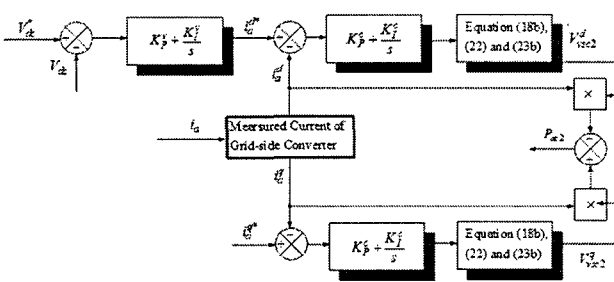


그림 9 그리드 측 전압원 전력 컨버터의 전력 제어를 위한 개념도
 Fig. 9. Block diagram for power control of grid side voltage source converter

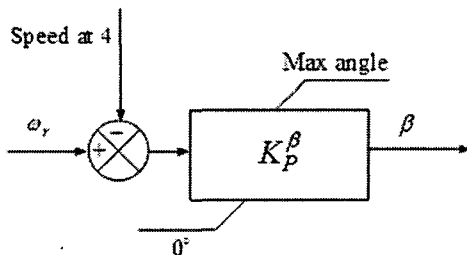


그림 10. 피치각 제어 개념
 Fig. 10. Generic Model of pitch control system

그림 8은 회전자 측 전압원 컨버터의 전력제어를 위한 개념도를 보여준다. 회전자의 속도가 측정되기만 하면 그림 4에 제시된 미리 정해진 터빈속도 대 출력 곡선으로부터 그 속도에 대응하는 터빈의 요구(기준) 출력이 나오므로 이는 실제 측정된 출력과 비교된다. 기준 출력과 실제 출력과의 차이는 전력 제어를 위한 PI제어기를 통해 기준 q축 전류 즉 i_q^* 로 내보내 지고 이것은 다시 실제 측정된 q축 전류 즉 i_q 와 비교된다. 비교 결과는 다시 전류 제어를 위한 PI 제어기와 방정식 (18a), (22) 및 (23a)를 통해 v_{uscl}^d 를 만든다. 일반적으로 회전자 측 컨버터의 역할은 풍력터빈의 속도 제어와 전압 제어를 위해 사용되는데, 바로 v_{uscl}^d 가 풍력터빈의 속도제어를 위해 사용된다. 다음으로 회전자 측 컨버터의 d축 전류 성분 즉 i_d^* 는 발전기에 흡수되는 혹은 발전되는 무효전력을 변화 시키는데 사용되고, 이것에 대한 기준전류는 그림 8에서 알 수 있듯이, 측정된 회전자 측 교류 전압과 기

준이 되는 회전자 측 교류 전압과의 차를 전압 제어를 위한 PI제어기를 통해 만들어진다. 일단 만들어진 기준전류는 측정된 회전자 측 d축 전류와 비교되고 전류제어를 위한 PI 제어기와 방정식 (18a), (22) 및 (23a)를 통해 v_{uscl}^d 를 만든다. 한편, 그림 8에서 회전자 측 컨버터의 d축 기준 전류를 만들기 위해 사용된 전압제어기는 무효전력 제어기로 대체 가능하고 이 경우 d축 기준전류를 만들기 위한 기준 전압은 기준 무효전력으로 바꾸고 역시 전압 측정대신 무효전력을 측정해야만 한다. 이 경우 발전기는 역률이 항상 일정하게 유지되도록 동작된다 [2].

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. 그림 9에서 알 수 있듯이, 미리 정해 놓은 dc 커패시터의 기준전압과 측정된 전압을 비교한 후 전압제어기를 통해 d축 기준전류를 만든다. d축 기준전류는 또 측정된 기준전류와 비교되어 전류 제어기 및 방정식 (18b), (22) 및 (23b)를 통해 그리드 측 컨버터의 d축 전압을 만들게 되는 것이다. 그리드 측 컨버터의 q축 기준전압 역시 같은 방식으로 만들어 지고 다만, 전압제어기 없이 미리 정해진 q축 기준전류를 쓴다는 점이 다를 뿐이다. 그림 8과 9의 P_{ac1} 과 P_{ac2} 를 식 (17)에 대입하여 적절한 DC 커패시터를 모델링할 수 있다.

일반적으로 터빈의 회전속도는 회전속도 제어기와 피치 각 제어기에 의해서 제어된다. 그러나 피치 각 제어기는 높은 풍속에서만 작동되고 현대 풍력터빈의 날개 크기로 인해 즉시 제어가 불가능할지라도 회전속도를 제어하기 위해 기계적 토크를 증가시키면 발전기와 컨버터에 과부하가 발생하기 때문에 이 제어기를 사용하여 피치 각을 조절하면 회전속도뿐만 아니라 전력계수를 감소시키기 때문에 터빈의 파워가 증가하는 것도 막아준다 [11]. 그림 10은 터빈 로터 날개의 피치를 제어하기 위한 개념도를 보여준다. 그림 4에 보이는 미리 정해진 트래킹 곡선에서 알 수 있듯이, 4 지점의 속도 아래에서 터빈 출력은 1-2-3-4를 연결하는 최대 출력 추종 곡선에 따라 터빈의 회전속도에 비례하여 발생하도록 되어있다. 그런데 최대 회전속도 즉 4지점의 속도에 터빈의 속도 도달하면, 최대출력은 상수를 유지하기 위해 그림 10에 보이는 터빈 피치 각 제어 시스템이 가동한다. 이 피치 각 제어 시스템은 보통 터빈 날개의 피치를 0도에서 그림 10에 제시된 최대 각까지 변화시킬 수 있다.

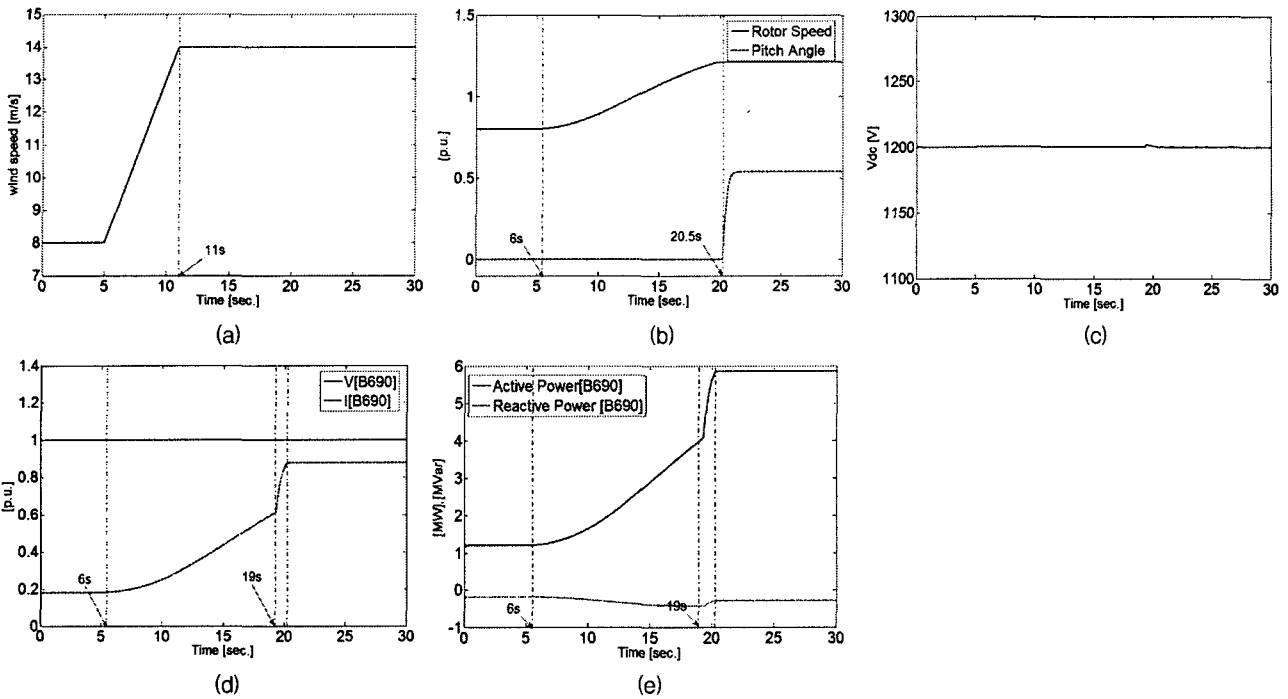


그림 12 풍력 터빈의 동특성: (a) 바람 속도, (b) 회전 속도 및 피치각 변화, (c) 커패시터 전압, (d) B690에서 측정된 발전기 축 전압 및 전류 와 (e) 발전 유효 및 무효전력

Fig. 12. Dynamic performance: (a) wind speed, (b) turbine rotor speed and pitch angle, (c) the dc capacitor voltage, (d) voltage and current measured in B690 bus and (e) generated active and reactive power

4. 분산전원을 고려한 이중여자 풍력발전기의 동특성 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

그림 11에 제시된 6MW급 이중여자 풍력 발전시스템은 본 논문의 시뮬레이션 모델로 [12]에 제시된 풍력발전시스템을 수정한 블록도를 나타내며 MATLAB/SIMULINK에서 제공하는 SimPower System Block을 사용하여 시뮬레이션 모델이 구성되었다. 그림 11의 풍력 발전시스템은 20km 11kV 급전선 (feeder)을 통해 400kV 그리드로 전력을 내보내고 같은 급전 버스 B11에 2MVA공장부하가 연결되어 있다. 또한 500kW 저항 부하가 풍력 발전기의 690 버스선 즉 B690에 연결되어 있다. 여기서 풍력 터빈과 2MVA 발전소의 전동기 부하는 모두 전압, 전류 및 회전속도를 감시하고 프로그램 되어진 혹은 정해진 값보다 크게 혹은 너무 작게 나온다면 트립을 시킬 수 있는 보호 장치를 갖는다.

4.2 정상상태 동특성 시뮬레이션

이번 절에서는 앞에서 유도한 수식 및 시뮬레이션 알고리즘을 사용하여 분산전원을 고려한 DFIG의 동특성을 세 가지 부분 즉 풍력터빈, 발전기 및 전력전자 그리고 분산전원으로 나누어 특성을 제시하고 설명하고자 한다. 특히 이번 절의 동특성은 분산전원 축의 fault 및 전압 sag이 없는 정상상태로 가정하였으며, 다음절에서 전압 fault 및 sag이 발생한 경우의 동특성에 대하여서도 다룰 것이다.

4.2.1 풍력 터빈

앞에서도 설명하였듯이, 풍력 터빈의 출력은 미리 정해진 트래킹 특성 곡선에 의해 제어되는데, 그림 11에 제시된 모델은 그림 4의 특성곡선에 의해 풍력터빈의 출력을 제한 받게 된다. 즉, 0.6[pu]까지의 속도 즉 동기속도 이하에서는 터빈 출력은 0이다. 0.62[pu]에서 1.2[pu]사이의 속도에서 트래킹 곡선은 풍력 터빈의 최대 출력의 궤적을 그린다. 마지막으로 1.21[pu]를 초과하는 속도에서는 풍력터빈의 출력은 일정하다. 여기서 c점에서의 바람속도는 12(m/s)이고 최대출력은 0.7이다. 그림 12 (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 바람의 속도를 정하였다. 그림 12(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 4에 보이는 터빈의 트래킹 곡선으로부터 풍력터빈의 출력을 1[pu]로 유지하도록 함을 알 수 있다. 그림 12(c)는 그리드 축 전압제어 전력 인버터와 회전자 축 전압 제어 전력인버터 사이에 존재하는 커패시터의 전압을 보여준다. 앞서서도 말하였듯이, 이 커패시터의 전압은 항상 일정하게 유지되도록 회전자 축 및 그리드 축 전력 컨버터를 이용하여 전력을 제어하기 때문에 그림 12(c)에 제시된 것과 같이 풍력터빈의 출력 및 속도변화에 대하여 일정한 전압을 가짐을 알 수 있다. 그림 12(d)

는 B690 버스 측의 전압 및 전류를 보여주는데, 전압은 항상 1 [pu]를 유지하도록 발전기의 발전전력 중 무효전력을 제어해 주기 때문에 항상 1이다. 그림 12(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. 또한 유효전력이 증가하는 구간에서 무효 전력은 반대로 -쪽으로 발전을 하는데, 이는 반대로 그 만큼의 양을 풍력터빈이 흡수한다고 볼 수 있다. 한편 유효 전력 및 무효전력에서 19초에서 20.5초사이의 증가분은 그림 4 및 그림 12 (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.

4.2.2 발전기 및 전력전자

그림 13은 발전기 고정자의 dq전압 및 전류특성을 보여 준다. 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 측 컨버터의 q축 전압은 그림 13 (b)에서 알 수 있듯이, 발전기의 고정자 전압과 동일한 양상으로 증가를 하나, d축 전압은 오히려 반대의 양상을 보이며, 발전기의 속도가 동기속도가 되는 시점(그림 12(b)에서 알 수 있듯이 약 13초)에서 양에서 음으로 음에서 양으로 각각 값이 변화한다. 회전자 측 컨버터의 d 및 q축 전류는 각각 발전기 고정자의 q 및 d축 전류 동일한 양상을 보인다. 마지막으로 그림 13(c)의 그리드 측 전력 컨버터의 전압은 발전기의 고정자 측 전압과 동일함을 알 수 있고, dq축 전류는 회전자 측 전력 컨버터의 dq축 전압과 유사하게 동기속도가 되는 시간을 기점으로 부호가 바뀔 수 있다.

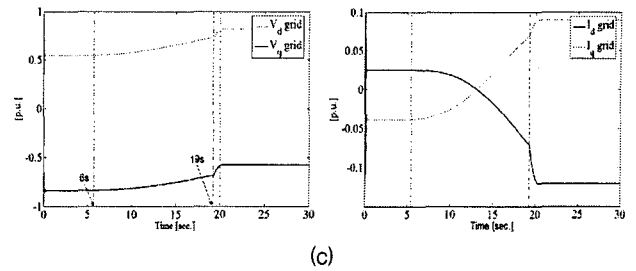
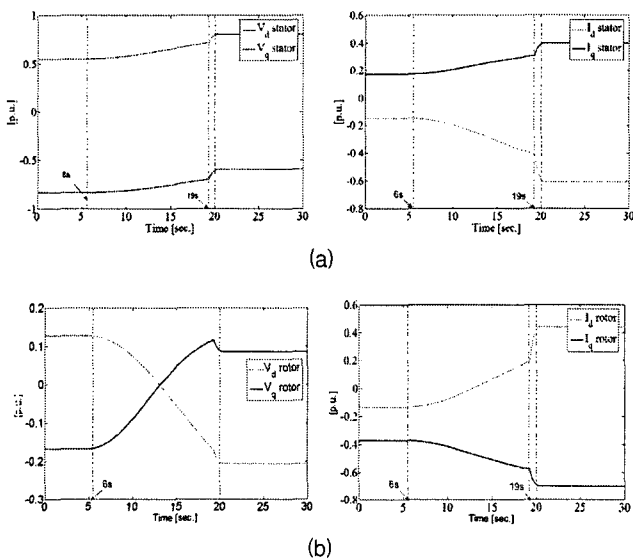


그림 13. 발전기 및 컨버터의 dq전압 전류 특성: (a) 발전기, (b) 회전자 측 컨버터 및 (c) 그리드 측 컨버터

Fig. 13. The characteristics of dq voltage and current for the generator, rotor side and grid side converter: (a) the generator, (b) rotor side converter and (c) grid side converter

그림 13에 제시된 발전기의 고정자, 회전자 측 및 그리드 측 전력 컨버터의 dq축 전압과 전류 분포를 식 (25)로 주어지는 유효 및 무효 전력 공식에 대입함으로써, 우리는 전력의 흐름을 표 1과 같이 예측할 수 있다. 여기서 dq축 전압 및 전류를 이용한 유효전력 및 무효전력은 다음과 같다 [3].

$$P = v_d i_d + v_q i_q \tag{25a}$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \tag{25b}$$

표 1 풍력발전시스템의 전력 흐름

Table. 1 Power Flow of Win Power Generation Systems

		동기속도 이하	동기속도 이상
발전기 고정자	유효 전력 (P_s)	-	-
	무효 전력 (Q_s)	+	+
발전기 회전자측 전력컨버터	유효 전력 (P_{rotor})	+	-
	무효 전력 (Q_{rotor})	+	-
그리드 측 전력 컨버터	유효 전력 (P_{grid})	+	-
	무효 전력 (Q_{grid})	+	-

(주) + : 공급, - : 흡수.

표 1의 결과를 간단하게 설명하면, 동기속도 이하에서는 발전기의 회전자 측 컨버터에서 발전기 회전자 쪽으로 전력을 공급(+)한다. 이 때 DC 커패시터 전압은 감소하려 하고, DC 커패시터 전압을 일정하게 유지하기 위하여 그리드 측 컨버터에서 전력을 DC 커패시터로 공급(+) 한다. 전력을 회전자 쪽에 공급받은 발전기는 풍력터빈의 입력을 고정자 측에서 흡수(-)하여 무효전력은 풍력 터빈 혹은 그리드 측에 공급(+)한다. 같은 방식으로 풍력터빈의 회전속도가 동기속도 이상인 경우에는 발전기 회전자 측 전력컨버터는 발전기 회전자의 전력을 흡수(-)하고 흡수된 전력은 DC 커패시터 전압을 증가 시키므로 이를 일정하게 유지하기 위하여 그리드 측 전력 컨버터 역시 전력을 흡수(-)한다. 이 때 역시 발전기의 고정자는 풍력터빈의 기계적 출력을 흡수(-)

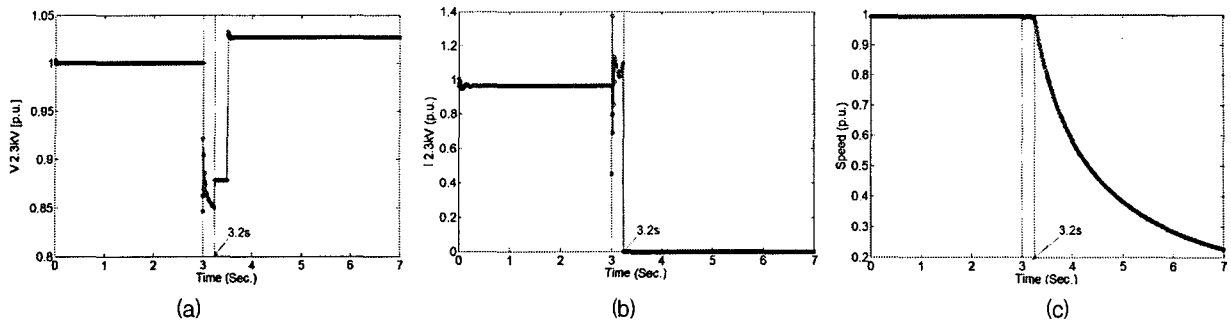


그림 15. 그리드 전원의 전압 하강에 따른 B11 버스에 연결된 유도전동기의 동특성 : (a) 전압, (b) 전류 및 (c) 속도
 Fig. 15. Dynamic performance for induction motor connected with B11 bus due to voltage sag of grid source: (a) voltage, (b) current and (c) speed

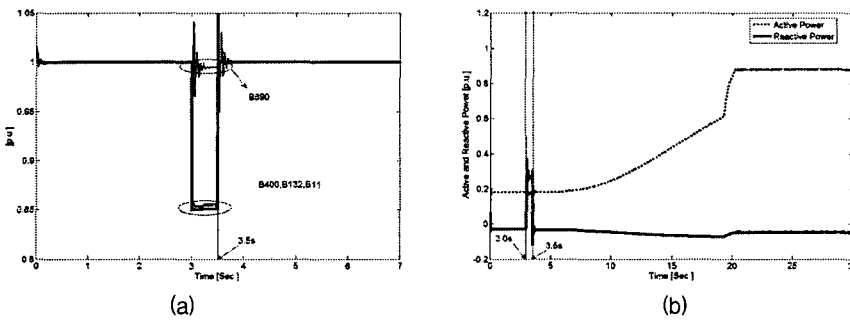


그림 16. 그리드 전원의 전압 하강에 따른 (a) 각 버스에서의 전압특성 및 (b) 풍력발전기의 유효 및 무효전력
 Fig. 16. (a) The variation of voltage for each bus and (b) the variation of active and reactive power for the DFIG due to voltage sag of grid source

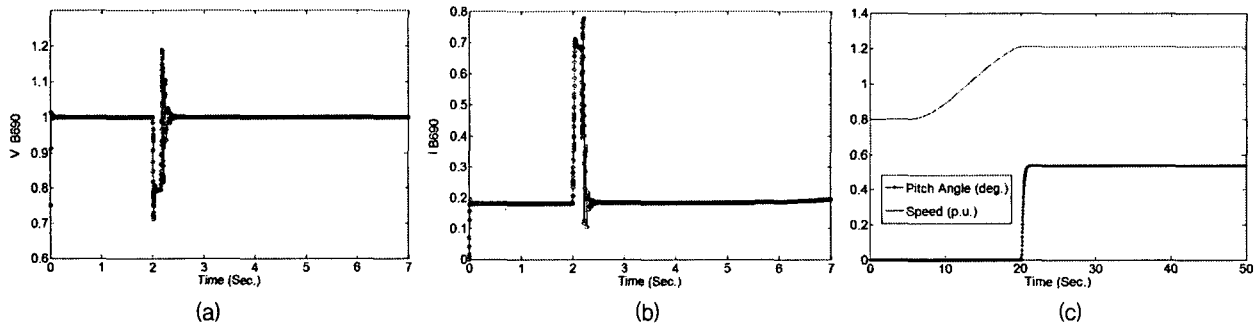


그림 17. B11 버스에 B상과 C상 폴트(fault) 발생시 동특성: (a) B690 버스의 전압, (b) B690 버스의 전류 및 (c) 풍력 터빈의 속도 및 피치각
 Fig. 17. Dynamic performance for the case when phase B and C of B11 bus are occurred fault: (a) voltage of B690 bus, (b) current of B690 and (c) speed and pitch angle of wind turbine

하여 무효전력은 발전기를 통해 그리드 측 전력 컨버터로 보내게 된다. 이 결과는 그림 1에서 설명한 풍력 발전시스템의 전력 조류와 일치한다.

4.2.3 정상상태에서 분산전원의 각 버스 전압

그림 14는 분산전원의 각 버스에서 측정된 전압 분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 버스에서의 전압은 0.99~1.001사이로 거의 모두 1을 유지한다고 볼 수 있으나, 전압의 크기 순으로 나열하면 B400 - B132 - B11 순으로 작고, 그래프의 변화추이는 같다.

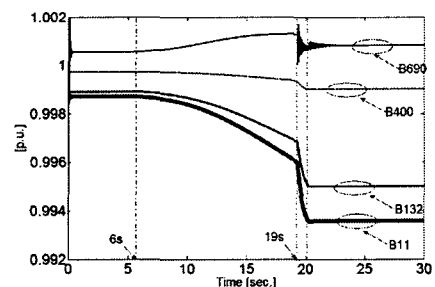


그림 14. 정상상태에서 분산전원의 각 버스 전압
 Fig. 14. Each bus voltage of distribution source systems in steady state

4.3 그리드 측 주 전원에 전압 강하 (voltage sag)가 발생한 경우 동특성 시뮬레이션

그림 15는 그리드 측 400kV 전원에서 3초에서 3.5초 사이에 0.15 p.u.의 전압강하 (voltage sag)가 발생하였을 경우에 B11버스에 물려있는 공장의 부하인 유도전동기의 동특성을 보여준다. 그림 15(a)에서 알 수 있듯이, 전압이 3초 직후에 0.9 p.u.이하로 떨어지고 떨어진 상태가 0.2초 이상 지속될 경우 공장의 보호 시스템이 유도전동기를 트립시키는 것으로 프로그램 되었기 때문에 그림 15(b)에서 알 수 있듯이, 3.2초에서 전류는 0이 되고, 그림 15(c)에서 알 수 있듯이 유도전동기의 속도는 3.2초 후에 점진적으로 감소한다. 그림 16 역시 그림 15와 같은 그리드 전원의 전압강하 조건에서 각 버스의 전압 변화 및 풍력발전기의 무효 및 유효 전력의 변화를 보여준다. 그림 16(a)에서 알 수 있듯이 B690버스를 제외한 모든 버스의 전압은 3초에서 3.5초 사이에서 0.15 p.u.의 전압강하를 보이는데, B690버스에서 전압강하가 일어나지 않는 이유는 B690버스의 전압은 항상 1 p.u.을 유지하도록 프로그램 되었기 때문이다. 그림 16(b)에서 알 수 있듯이, 3초에서 3.5초 사이에 풍력발전기의 유효전력은 변화가 없지만 무효전력은 그리드 전원의 전압 강하분 만큼 증가하는 동특성을 보여준다.

4.4 fault 발생 시 동특성시뮬레이션

그림 17은 B11 버스에 B상과 C상에 fault가 발생하였을 경우의 B690 측 즉 풍력 발전기 측의 전압, 전류 및 회전속도와 피치각의 변화를 보여준다. 시뮬레이션에서는 2초에서 10cycle 즉 1/6초 동안 B11의 B상과 C상을 fault 시켰다. 그림 17(a)에서 알 수 있듯이, fault가 발생한 시점 즉 2초에서 2.18초 동안 B690버스의 전압은 0.8 p.u. 정도로 하강하였다가 다시 1 p.u.으로 복귀하고 전류 역시 같은 특성을 보인다. 일반적으로 fault가 발생하였을 경우 풍력발전기를 트립시키거나 시뮬레이션의 트립 조건을 0.75 p.u. 이하의 전압이 0.1초 이상 지속하였을 경우에 트립 시키기로 프로그램 하였으므로, 그림 17(c)에서 보는 바와 같이 트립이 일어나지 않은 상태와 같은 회전속도와 피치각 특성을 얻는 것으로 보아 트립이 일어나지 않았음을 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 이중여자 권선형 유도발전기로 구성된 풍력 발전시스템의 동특성 해석에 대해 기술하였다. 먼저 풍력 발전 시스템을 구성하는 각각의 요소 즉 풍력 터빈, 이중여자 권선형 유도 발전기, AC/DC/AC 컨버터의 수학적 모델링을 수행하였고 특히 이중여자 권선형 발전기와 AC/DC/AC 컨버터의 수학적 모델링은 dq 기준 좌표계에서 수행되었다. 다음으로 발전기의 회전자 측 및 그리드 측 컨버터의 수학적 모델링으로부터 터빈의 속도 제어, 무효전력 제어 및 컨버터 사이의 DC 커패시터 제어 개념에 대한 블록도들이 제시되었고, 풍속에 따른 터빈 회전속도 대 출력곡선으로부터 미리 정해진 최대출력 추종곡선을 사용하여 피치각 제어 개념에 대한 블록도를 역시 제시하였다. 마지막으로 MATLAB/SIMULINK에서 제공하는 SimPower System 블록을 사

용하여 분산전원을 고려한 6MW급 풍력발전시스템에 대한 동특성이 수행되었고, 시뮬레이션 결과는 본 논문에서 제시된 제어개념 측면에서 설명되어 타당성을 입증하였다. 그리드 주 전원의 전압 강하 및 특정한 버스의 상(phase)에 고장(fault)이 발생한 경우에 트립조건이 고려된 풍력 발전시스템의 동특성 역시 제시되었다. 본 논문에서 제시된 풍력 발전 시스템을 구성하는 각각의 요소에 대한 수학적 모델링, 제어 개념 블록도 및 동특성 시뮬레이션 결과에 대한 토의는 이중여자 권선형 유도 발전기가 사용된 풍력 발전시스템을 이해하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] Aranzta Tapia, Gerardo Tapia, J. Xabier Ostolaza and Jose Ramon Saenz, " Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 18, no.2, pp. 194-204, June. 2003.
- [2] Markus A. Poller, " Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms," *IEEE Trans. Bologna PowerTech Conf.*, June. 2003.
- [3] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake and N. Jenkins "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 3, pp.343-352, May. 2003.
- [4] M. Machmoum, F. Poitiers, C. Darengosse and A. Queric "Dynamic Performances of a Doubly-fed Induction Machine for a Variable-Speed Wind Energy Generation," *Powercon 2002*, vol. 4, pp.2431-2436, Oct. 2002.
- [5] S. Muller, M. Deicke and Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines Based on Doubly-Fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 4, pp.2249-2254, Oct. 2000.
- [6] 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.
- [7] Freris L., *Wind Energy Conversion System*. Prentice Hall, 1990.
- [8] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake and N. Jenkins "Direct solution method for initializing doubly-fed induction wind turbines in power system

dynamic models," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 3, pp.334-342, May. 2003.

- [9] R. Pena, J.C. Clare, G.M. Asher "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp.231-241, May. 1996.
- [10] Chee-Mun Ong, *Dynamic Modeling of Electric Machinery*. Prentice Hall PTR, 1998.
- [11] J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling "Dynamic Modeling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Power Engineering Society Conference.*, vol. 1, pp.644-649, July. 2001.
- [12] 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.
- [13] C. Cshauer and H. Metha, "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensator," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 140, no. 4, pp.299-306, July. 1993.
- [14] N.Mendalek, K. Al-Haddad. L.A. Dessiant and F. Fnaiech, "Nonlinear Control Strategy Applied to a Shunt Active Power Filter," *Proc. of 2001 IEEE Power Electronics Specialist Conf.*
- [15] 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.

저 자 소 개



최 장 영(崔璋英)

1976년 10월 20일생. 2003년 충남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7608

E-mail : aramis76@cnu.ac.kr



장 석 명(張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 2004년 당학회 부회장, 2004년~2005년 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부분회 회장.

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@cnu.ac.kr

Homepage : <http://sems.cnu.ac.kr>