

직접 구동형 풍력 발전시스템의 PSCAD/EMTDC 모델링 및 시뮬레이션

김명호*, 박기현**

포항공과대학교*, 포항가속기연구소**

A SIMULATION AND MODELING OF DIRECT DRIVEN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR BASED ON THE PSCAD/EMTDC

Myoung-Ho Kim*, Ki-Hyeon Park**

Pohang university Of Science and Technology*, Pohang Accelerator Laboratory**

Abstract - 본 논문에서는 전력계통의 조류해석에 자주 사용되는 PSCAD/EMTDC 상용 소프트웨어를 이용하여 영구자석형 풍력발전 시스템을 모델링하였다. 발전기의 최대 출력을 얻기 위한 제어전략, 풀 컨버터를 통해 발전된 전력을 계통에 연계하는 기법과 시뮬레이션 결과를 기술하였다.

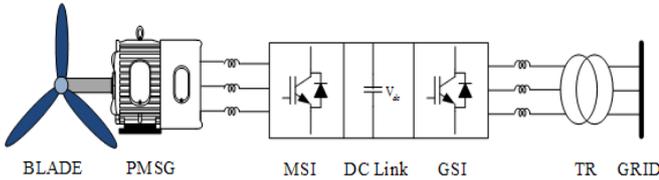
1. 서 론

최근 산업의 발전에 따른 에너지 소비증가와 석탄, 석유, 천연가스 등의 에너지 자원 고갈로 신재생 에너지에 관심이 쏠리고 있다. 그 중 풍력발전은 에너지 변환 효율이 높고, 발전단가가 싸기 때문에 전 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 신재생 에너지원이다. 특히, 직접 구동형 풍력발전 시스템(PMSG 타입)은 넓은 범위의 가변속 운전이 가능하여 다른 풍력발전방식에 비해 발전효율이 높다. 또한, 기어박스 제거를 통한 유지보수 비용 및 전체 시스템 무게를 줄일 수 있어 대응량화와 해상 풍력발전에 유리하다. 따라서 PMSG 풍력발전 시스템의 특성을 이해하고, 최대 출력제어 및 그리드 코드를 만족하는 계통연계와 풍력발전 시스템의 동특성을 모의할 수 있어야 한다.

2. 직접 구동형 풍력발전 시스템

2.1 풍력발전 시스템 특성

PMSG 풍력발전 시스템은 크게 블레이드, 발전기, 전력변환장치로 구성되며 <그림1>과 같다.



<그림 1> PMSG 풍력발전 시스템 구성

블레이드는 바람의 운동에너지를 역학적인 에너지로 변환하여 발전기에 토크로 전달하고, 발전기는 역학적인 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 영구자석형 동기발전기는 따로 여자 시스템이 필요 없어 회전자에 의한 동손을 줄일 수 있어 에너지 변환효율이 높다. 발전기를 통해 생산된 전력은 전력변환장치를 통해서 AC-DC-AC형태의 에너지 변환과정을 거쳐 계통연계조건에 맞추어 계통에 공급된다.

2.1.1 블레이드의 공력학적 특성

바람으로부터 얻어진 블레이드의 기계적인 에너지는 다음과 같다[1,2].

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho_{air} A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{1}$$

여기서 A : 블레이드 단면적, ρ_{air} : 공기밀도, V_w : 풍속, $C_p(\lambda, \beta)$: 출력계수이다. $C_p(\lambda, \beta)$ 는 피치각(β)과 주속비(λ)의 함수이고, 주속비는 블레이드 선단속도에 대한 풍속의 비율로써 아래와 같이 정의한다.

$$\lambda = \frac{w_{blade} R}{V_w} \tag{2}$$

여기서 w_{blade} : 블레이드 각속도, R : 블레이드 반경이다.

위의 (1)식과 (2)식으로부터 블레이드 출력 P_{blade} 과 발전기에 공급하는 토크 T_{blade} 는 아래의 식 (3),(4)와 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_{pmax} \frac{R^3}{\lambda_{opt}^3} w_{blade}^3 = K_{blade} w_{blade}^3 \tag{3}$$

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{w_{blade}} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_{pmax} \frac{R^3}{\lambda_{opt}^3} w_{blade}^2 = K_{blade} w_{blade}^2 \tag{4}$$

2.1.2 영구자석 동기 발전기 특성

저속 운전에 유리한 다극형 PMSG의 전기적인 특성은 다음과 같이 동기 좌표계상에서 고정자 권선의 전압식과 토크 방정식으로 표현된다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + L_d \frac{di_{ds}^e}{dt} - w_r L_q i_{qs}^e \tag{5}$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + L_q \frac{di_{qs}^e}{dt} + w_r L_d i_{ds}^e + \psi_{PM} w_r \tag{6}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [(L_d - L_q) i_{ds}^e i_{qs}^e + \psi_{PM} i_{qs}^e] \tag{7}$$

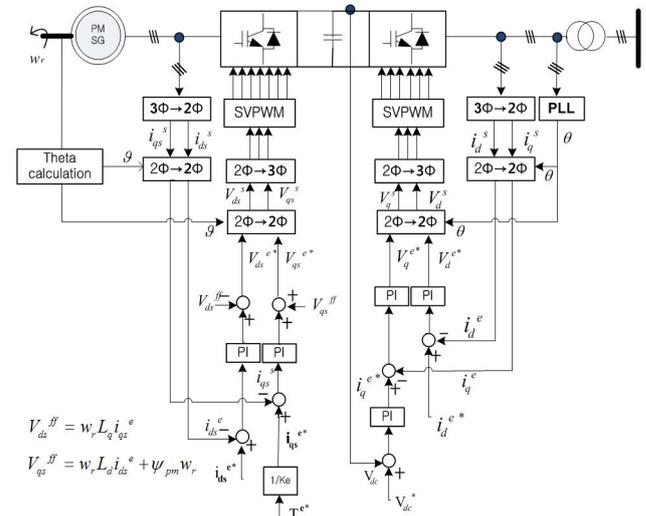
$$w_r = \frac{P}{2} w_{blade} \tag{8}$$

여기서 L_d, L_q : d, q축 인덕턴스, P : 극수, ψ_{PM} : 역기전력 상수 이다.

3. 풍력발전 제어 시스템

3.1 영구자석형 풍력발전 시스템 구성 및 제어 구성도

영구자석형 풍력발전 시스템 구성 및 제어 구성도는 <그림2>와 같다.



<그림 2> PMSG 풍력발전 시스템 구성

발전기측 컨버터는 주어진 풍속에서 최대 출력을 얻기 위해 d축 전류는 항상 0으로 제어하고, q축 전류로 발전기의 토크를 제어한다. 계통측 컨버터는 풍속의 변화와 부하변동에 대해 직류단 전압을 일정하게 유지 시킴으로써, 발전기측 컨버터로부터 유입되는 모든 전력을 계통으로 공급하는 역할을 한다. 계통의 전압, 위상과 동기화하여 d축과 q축 전류를 제어함으로써 무효전력과 유효전력을 독립적으로 제어한다.

3.1.1 토크 제어기

최적 주속비를 만족하도록 출력계수(C_p)가 제어되고, w_{blade} 가 일정하다면, 발전기의 기계 방정식으로부터 발전기의 기준 토크값 T_e^* 을 (9)식과 같이 구할 수 있고, (8)식과 (10)식을 이용하면 토크 상수값(K_t)을

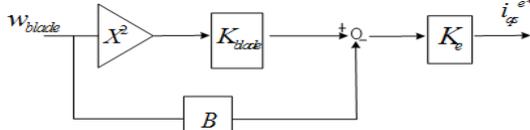
(11)식과 같이 얻을 수 있다 [3].

$$T_e^* = T_{blade} - Bw_{blade} = K_{blade}w_{blade}^2 - Bw_{blade} \approx K_{blade}w_{blade}^2 \quad (9)$$

$$P_g = V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e = \frac{3}{2} w_r \psi_{PM} i_{qs}^e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_{PM} i_{qs}^e w_{blade} \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_{PM} i_{qs}^e = K_e i_{qs}^e \quad (11)$$

(9)와 (11)식으로 이루어진 토크 제어기는 아래의 <그림3>과 같다.



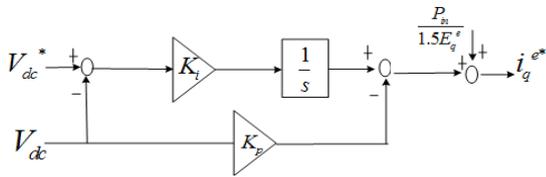
<그림 3> 토크 제어기

3.1.2 전압 제어기

컨버터 전력 방정식과 계통전원의 동기 위상각을 기준으로 동기좌표 계로 변환된 계통으로 유입되는 전력은 (12), (13)식과 같다[4].

$$P_{in} - P_{grid} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} V_{dc}^2 \quad (12)$$

$$P_{grid} = \frac{3}{2} (E_d^e i_d^e + E_q^e i_q^e) \approx \frac{3}{2} E_q^e i_q^e \quad (13)$$



<그림 4> 전압 제어기

<그림 4>의 q축 전류 기준값과 (11), (12)식으로부터 얻어지는 비선형 미분방정식을 테일러 시리즈로 전개하여 전압 제어기의 전달함수를 구하였다.

$$\frac{V_{dc}^*}{V_{dc}} = \frac{\frac{1.5E_{max}K_i}{C_{dc}V_{dc0}}}{s^2 + \frac{1.5E_{max}K_p}{C_{dc}V_{dc0}}s + \frac{1.5E_{max}K_i}{C_{dc}V_{dc0}}} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (14)$$

여기서 w_n : 비감쇠 주파수, ζ : 감쇠비, V_{dc0} : 직류단 동작전압이다.

(13)식으로부터 전압제어기의 비례이득(K_p)과 적분이득(K_i)을 구한다.

$$K_p = 2\zeta w_n \frac{C_{dc}V_{dc0}}{1.5E_{max}}, K_i = w_n^2 \frac{C_{dc}V_{dc0}}{1.5E_{max}} \quad (15)$$

4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 및 출력파형

Simulation에 적용한 주요 파라미터들과 시뮬레이션 시나리오는 각각 <표1>, <표2>와 같다.

<표 1> PMSG 풍력발전 시스템 파라미터 [1]

Parameters	Value	Parameters	Value
Turbine Rated power(MW)	2	Xq (pu)	0.5
Rotor diameter(m)	75	Optimal TSR	6.9
Rotating speed(rpm)	6-19.5	Maximum power coefficient	0.44
Nominal wind speed(m/s)	11.95	Magnetic strength(pu)	1.2
Generator rated power(MW)	2	Generator inertia(s)	0.55
Stator line voltage(V)	690	Equivalent wind turbine inertia(s)	2.45
Rated frequency(Hz)	50	DC-link voltage	1500
Number of pole pairs	154	DC-link capacitance(uF)	8000
Stator winding resistance(pu)	0.01	Switching frequency(kHz)	10
Xd (pu)	0.8	Grid voltage(V)	690

<표 2> 시뮬레이션 시나리오

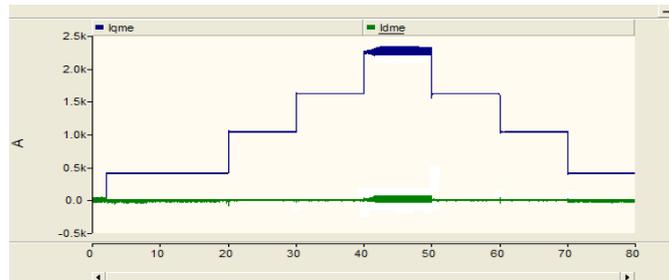
Simulation time (s)	Wind speed (m/s)	Simulation time (s)	Wind speed (m/s)
0	3.7 m/s	40	11.95 m/s
1	5 m/s	50	10 m/s
20	8 m/s	60	8 m/s
30	10 m/s	70	5 m/s

<그림5>의 결과파형1은 풍속 변화에 따른 발전기 출력(P_{gen})과 계통에 공급되는 유효전력(P_{grid} , Q_{grid}), 블레이드 토크(T_m)와 발전기 토크(T_e) 및 직류단 전압(V_{dc})을 나타낸다.



<그림 5> 결과 파형 1(파워, 토크, 풍속, 직류단 전압)

<그림 5>에서 풍속에 비례하여 발전기 출력과 토크는 증감하지만, 계통측 무효전력은 항상 0으로 일정하다. 이는 <그림 6>의 동기좌표계상의 계통전류를 유효전류(i_{qs}^e)와 무효전류(i_{ds}^e) 성분으로 나누어 각각 독립적으로 유효전력과 무효전력을 제어하기 때문이다. 또한 풍속변화에 관계없이 직류단 전압이 일정하게 유지되는데, 발전기측 출력이 모두 계통으로 공급되고 있음을 의미한다($P_{gen} = P_{grid}$). 그리고 정격 풍속구간인 40-50초 사이에서 발전기가 정격 출력(2MW)으로 운전되고 있다.



<그림 6> 결과 파형 2(계통측 d-q축 전류)

5. 결 론

본 논문에서는 2MW 영구자석형 풍력발전 시스템을 PSCAD/EMTDC로 구현하고, 최대 출력을 얻기 위한 제어기를 설계하였다. 이로써 풍력발전시스템의 전기적 출력특성을 시뮬레이션 결과를 통해서 확인하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Fujin, Zhe Chen "Power Control of Permanent Magnet Generator Based Variable Speed Wind Turbines", Electrical Machines and Systems, vol. 3, 2009
- [2] 이두영, "영구자석동기발전기 풍력시스템의 하드웨어 시뮬레이터 개발", 대한전기학회, 57-6-7, 951-957, 2008
- [3] 김정재, 송승호 "영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발", 전력전자학회, 제10권 제6호, 610-617, 2005.12
- [4] 설승기, "전기기기 제어론", 홍릉과학출판사, 261-265, 2009