

PSCAD/EMTDC를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델 개발

정병창, 송승호
전북대학교 전자정보공학부

Development of PSCAD/EMTDC Simulation Model
for Doubly-Fed Induction-type Wind Power Generation System

Byoung-Chang Jeong, Seung-Ho Song

Division of Electronics and Information Eng. Chonbuk National University

Abstract - In this paper, doubly-fed induction-type wind power generation system simulation model for grid connection is developed. The simulation model is based on PSCAD/EMTDC and consists of rotor-blade, generator, power converter and controller. Simulation results are shown for the variable wind speed conditions. The simulation model can be utilized for study of actual interaction between wind turbine and grid for reliable operation and protection of power system.

1. 서 론

풍력발전 시스템이 대형화되면서 MW이상의 대용량 전력변환 장치를 구성해야 하는 문제점을 해결하고 시스템의 에너지 변환효율을 높이기 위하여 많은 풍력발전 시스템 제작사들이 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 기본구조로 채택하고 있다. 그림 1에서 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 구조와 전류, 전력의 방향성을 보여주고 있다. 발전기로 권선형 유도기를 사용하며 발전기의 고정자는 차단기를 통하여 계통에 연결된다. 회전자에는 전력변환 장치를 연결하여 풍력발전 시스템의 출력을 제어할 수 있다. 전력변환 장치는 2대의 컨버터를 back-to-back으로 연결하며 각각 회전자측 컨버터와 계통측 컨버터라고 한다. 전력용 필터는 계통과 계통측 컨버터 사이에 위치하며 고조파를 억제한다.

국내에서도 2개 업체에서 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 개발하고 있다. 또한 외국에서 상용화된 제품의 도입을 추진하고 있다. 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 계통에 연계하기 위해서는 사전에 계통에 미치는 영향에 대한 분석이 된다.

계통에 연계된 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 동특성과 계통에 대한 영향을 분석하기 위하여 PSCAD에 기반한 이중여자 유도형 풍력발전 시스템 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발한 모델은 블레이드, 발전기 그리고 전력변환 장치를 포함하며 계통은 등가 전원으로 구성하였다. 풍력발전 시스템의 전기부분을 제어하기 위한 각종 제어기를 설계하였으며 풍속 변동시에도 최대 출력점을 추종하도록 제어하는 알고리즘을 포함하고 있다. 본 논문에서는 개발한 시뮬레이션 모델의 구성과 동특성을 보여주고 있다.

2. 이중여자 유도형 풍력발전 시스템 모델링

이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 제어하기 위하여 먼저 시스템에 대한 모델링을 진행한다. 모델링은 발전기와 전력용 필터로 나뉘어서 각각 수행한다. 모델링 결과를 바탕으로 제어기를 설계한다.

2.1 이중여자 유도기의 모델링

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에서 고정자와 회전자 상태방정식을 d-q 좌표계로 표현하면[1]~[4]

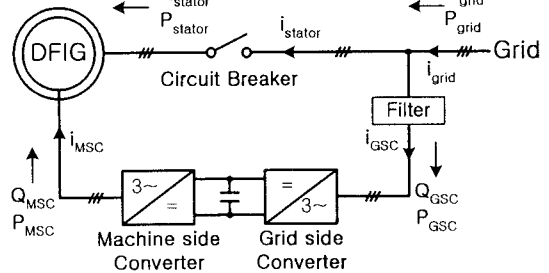


그림 1 이중여자 유도형 풍력발전 시스템
Fig. 1 Doubly-fed induction generation system

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$V_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (3)$$

$$V_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (4)$$

r_s 는 고정자 권선저항, r_r 은 회전자 권선저항을 의미한다. 정지좌표계에서는 $\omega = 0$, 동기좌표계에서는 $\omega = \omega_e$ 을 사용한다.

d-q 좌표계로 표현된 유도기의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_s} \frac{L_m}{L_s} (\lambda_{qs} i_{dr} - \lambda_{ds} i_{qr}) \quad (5)$$

고정자의 유효전력과 무효전력은

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \quad (7)$$

2.2 전력용 필터 모델링

전력용 필터가 인덕터 L_f 로 구성되어 있다고 가정하고 전력용 필터 양단의 상태방정식을 d-q 좌표계로 정리하면

$$E_d = L_f \frac{d}{dt} i_d - \omega L_f i_q + V_d \quad (8)$$

$$E_q = L_f \frac{d}{dt} i_q + \omega L_f i_d + V_q \quad (9)$$

E_{dq} 는 계통연계 지점의 d-q 축 전압, V_{dq} 는 계통측 컨버터의 d-q 축 전압을 의미한다.

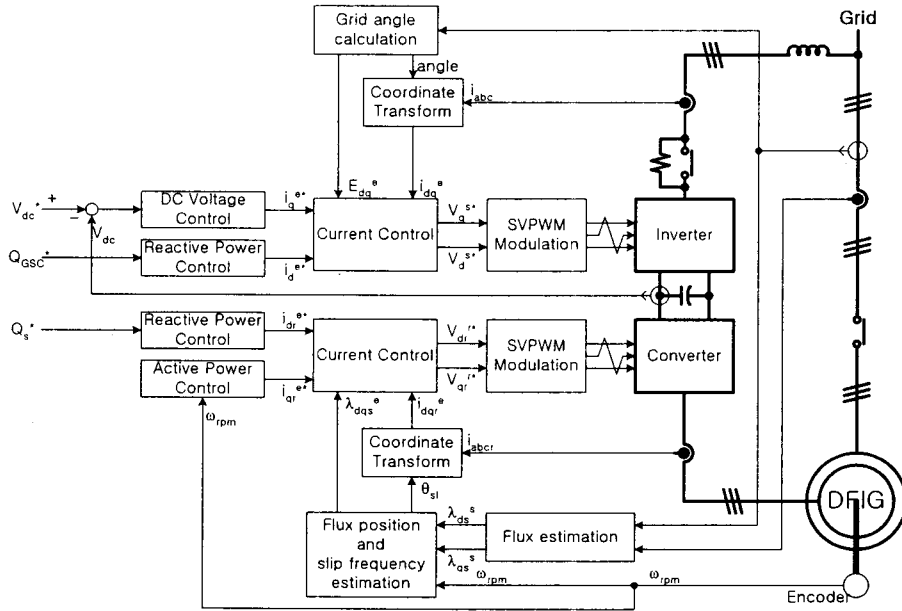


그림 2 이중여자 유도형 풍력발전시스템 제어 블록도
 Fig. 2 Control block diagram for DFIG system

2.3 제어기 설계

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 제어 블록을 그림 2에서 보여주고 있다. 제어기는 크게 계통측 컨버터를 제어하기 위한 부분과 회전자측 컨버터를 제어하기 위한 부분으로 구성되어 있다. 회전자측 컨버터 제어기는 다시 자속 추정 및 동기 위상각 계산, 전류 제어, 발전량 제어, 그리고 고정자 무효전력 제어로 나눌 수 있다. 회

전자측 컨버터도 동일하게 계통 동기 위상각 계산 블록, 전류 제어, 직류단 전압제어 그리고 무효전력 제어로 나눌 수 있다.[2][4] 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 발전량은 주어진 풍속에서 최대가 되도록 제어한다. 블레이드에 의한 입력이 작아서 발전량이 작을 경우 전력 변환 장치의 정격을 제한하기 위하여 회전속도를 일정하게 유지한다. 발전량이 증가하면 발전기의 토크를 제어함으로써 최대 출력점을 추종한다.[2][3] 고정자 무효전력 제어기는 고정자의 무효전력을 임의로 제어한다.[3]

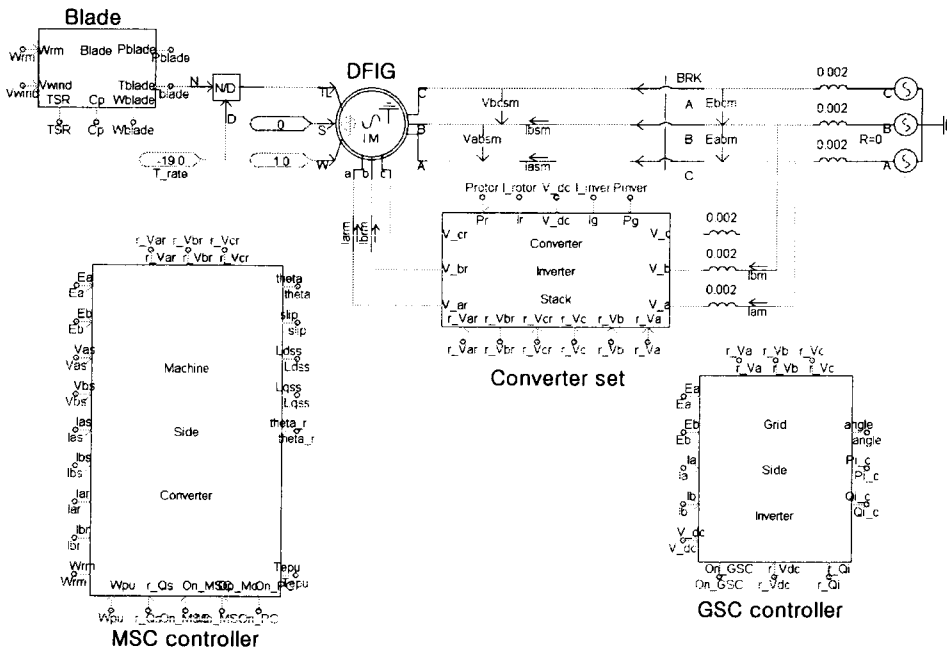


그림 3 PSCAD 기반 시뮬레이션 모델
 Fig. 3 Simulaton model with PSCAD

3. 시뮬레이션 모델 및 동특성 분석

그림 3에서 PSCAD로 구현된 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 보여주고 있다. 개발한 시뮬레이션 모델은 블레이드, 발전기, 전력변환 장치 그리고 제어를 포함하며 계통은 등가 전원으로 구현하였다. 시뮬레이션 모델에서 사용한 발전기의 사양을 표 1에서 보여주고 있다.

표 1 이중여자 유도형 풍력발전 시스템 사양
Table 1 Specification of DFIG system

정격풍속		12m/s	
발전기	고정자	정격 용량	3000W
		정격 전압	220V
		정격 전류	14.7A
	회전자	권선 저항	0.667 Ω
		인덕턴스	0.06731H
		정격 전압	128V
	정격 전류	14A	
	권선 저항	0.625 Ω	
	인덕턴스	0.06731H	
	상호 인덕턴스	0.0637H	
	극수	4	
전력용 필터 인덕턴스		0.002H	
직류단 커패시터	정격 전압	400V	
	커패시턴스	2400 μ F	

그림 4에서 풍속을 6m/s에서 12m/s로 서서히 변경했을 때 각부분의 유효전력을 보여주고 있다. (a)에서 풍속과 회전속도의 per unit을 보여주고 있다. per unit의 기준풍속은 11.2m/s, 기준 회전속도는 1800rpm으로 하였다. (b)에서는 블레이드의 기계적 출력과 풍력발전 시스템의 유효전력을 보여주고 있다. 블레이드의 기계적 출

력은 풍속의 3승에 비례하여 증가한다. 이때, 발전량이 적은 경우에는 회전속도를 일정하게 제어하고 발전량이 많은 경우에는 토크를 제어하여 최대 출력점을 추종한다. (c)에서는 고정자와 회전자의 유효전력을 보여주고 있다. 고정자는 항상 계통에 유효전력을 공급하고 회전자는 회전속도에 따라서 유효전력을 공급하기도 하고 흡수하기도 한다.

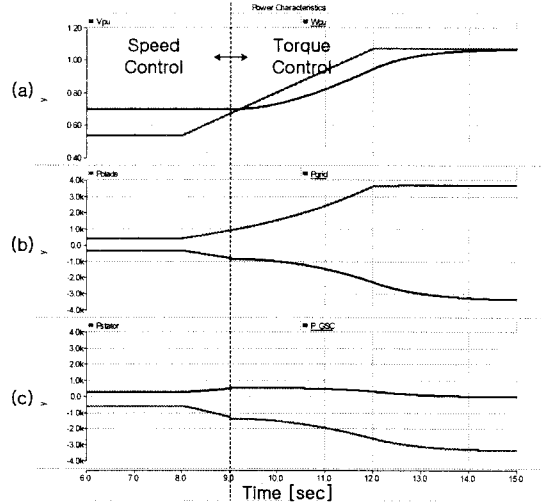


그림 4 시스템의 유효전력
Fig. 4 Active power of system

그림 5에서는 회전속도에 따라서 고정자와 회전자의 a 상 전압과 전류를 보여주고 있다. 0.7pu, 1.0pu, 1.07pu 등 3가지 회전속도에서 파형을 비교하고 있다. 고정자는 계통에 직접 연결되기 때문에 항상 일정한 전압이 인가된다. 고정자에 유입되는 무효전력은 '0'으로 유지되기 때문에 고정자 전류는 유효전력 성분만을 포함하고 있

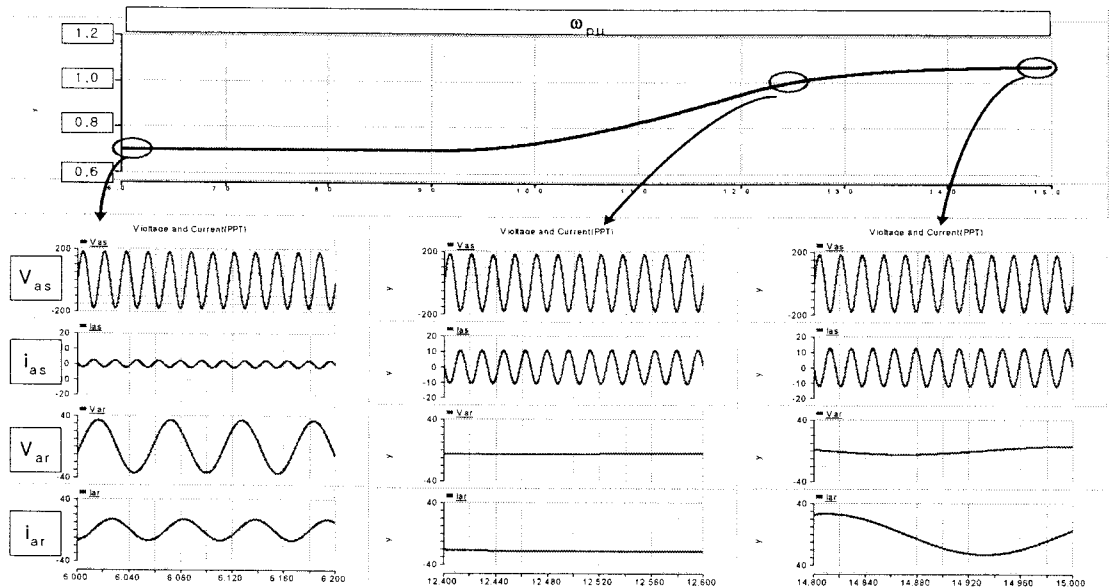


그림 5 회전속도에 따른 전압과 전류 파형
Fig. 5 Voltage and current with speed

다. 회전속도가 느릴 경우 고정자 전류의 크기도 작지만 회전속도가 증가하면 고정자 전류도 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 고정자 전압과 위상차가 180°로 계통에 유효전력을 공급하는 것을 볼 수 있다. 회전자 전압과 전류의 주파수는 슬립에 비례한다. 회전속도가 1.0pu인 경우 슬립이 0이기 때문에 회전자에는 직류와 같이 일정한 크기의 전압과 전류가 인가된다. 회전속도가 동기속도에서 멀어질수록 주파수가 증가한다. 회전자 전압의 크기는 슬립에 비례하여 변동하기 때문에 주파수와 마찬가지로 회전속도가 1.0pu 인 경우 아주 작은 값을 갖고 동기속도에서 멀어질수록 전압의 실효값이 커지는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 권선형 유도기를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 PSCAD로 구현하였다. 시뮬레이션 모델은 주어진 풍속에 따라서 풍력발전 시스템의 출력이 최대 출력점을 추종하도록 제어기를 설계하였으며 풍속 변동에 따른 시뮬레이션을 수행하여 결과를 보여주었다.

개발한 시뮬레이션 모델은 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 계통에 도입할 때 계통에 미치는 영향을 분석하기 위하여 활용 될 것으로 기대된다.

앞으로 대규모 풍력단지 of 계통연계 운전특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션 모델의 간략화가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Müller, M. Deicke, 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", IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, pp. 2249-2254, 2000.
- [2] 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, May, pp. 231-241, 1996.
- [3] Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Soerensen, Frede Blaabjerg, "Overall Control Strategy of Variable Speed Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine", 2004 Nordic Wind Power Conference, March 2004.
- [4] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자속 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘", 전기학회논문지 Vol. 52, No. 10, pp. 528-534, 2003.