

PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 풍력발전시스템 모델링

김슬기, 김응상
한국전기연구원

Modeling of Grid-connected Wind Energy Conversion System Using PSCAD/EMTDC

Kim Seul Ki, Kim Eung Sang
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The paper presents an electrical model of a grid-connected wind energy conversion system (WECS) with a variable speed drive, a fixed pitch angle, a synchronous generator as a wind generator and AC-DC-AC conversion scheme for simulating dynamic behaviors and performance responding to varying wind speed input. The electric output of the WECS is controlled by the AC-DC-AC conversion scheme, the objective of which is to capture the maximum active power under varying wind conditions and to keep the voltage of WECS terminal bus at a specific level. Aerodynamic models are used to incorporate the power characteristics to wind speed. The modeling and simulation of the WECS are realized on PSCAD/EMTDC environment.

수준 유지를 위한 무효전력제어 알고리즘이 적용된다.

2. 본 론

2.1 전체 시스템 구성

본 연구에서 모델링하는 풍력발전시스템의 구성은 그림 1과 같다. 블레이드, 터빈, 동기발전기, 정류기 및 인버터로 구성되며, 이들로 구성된 전체 풍력시스템은 배전선을 통해 계통에 연계되어 있다.

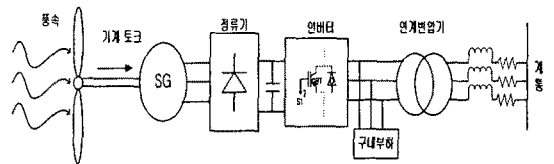


그림 1 풍력발전시스템

1. 서 론

풍력발전시스템은 전력망에의 접속여부에 따라 독립운전 방식과 계통연계 방식으로 구분된다. 독립운전 방식은 송배전선을 통해 상용 전력계통과 연결되지 않고 도서지역이나 산간지역과 같이 고립된 지역에서 수용가에 직접 전력을 공급하는 방식인데, 풍속의 가변특성으로 인해 출력이 변하여 풍력발전만으로 전체 부하를 항상 충족시킬 수 없다. 따라서 상용계통과 연계되어 초과하거나 부족한 전력을 계통으로 보내거나 계통으로부터 공급받을 수 있는 계통연계방식이 안정적인 전력공급 측면이나 풍력자원의 포괄적인 활용측면에서 요구되어 진다[1]. 풍력발전의 효율적인 운용을 위하여 계통연계 방식이 필수적임에도 불구하고, 그 진전이 미비한 이유는 풍속의 가변성으로 인한 출력의 불규칙성으로 인해 주변 계통 수용가와 부하의 전압, 주파수 등의 전력품질에 악영향을 미칠 우려가 있고 기존의 전원에서 부하로의 일방향적인 계통구성이 전원과 부하가 혼재된 계통구성으로 바뀌어서 기존의 보호협조체제로 정확한 사고검출 및 차단이 어려울 수 있기 때문이다[2]. 실제 특정용량을 가지는 풍력발전은 계통연계하기에 앞서, 투입되는 풍력발전시스템으로 인한 주변 계통의 전기품질 및 보호체계에 미치는 영향에 대한 과도현상 및 정상상태 해석이 필수적으로 선행되어야 하며, 이러한 사전검토를 위하여 컴퓨터 해석 프로그램을 이용한 풍력발전시스템의 전기 모델링이 이루어져 한다.

2.2 풍력터빈

풍속과 고정피치각을 갖는 블레이드에 의한 기계토크의 일출력 관계는 다음 식 (1)로 나타낸다.

$$T_m = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{w^2}{\lambda^3} C_p \quad (1)$$

여기서, T_m 는 풍력터빈을 통해 풍력발전기에 입력되는 기계토크, ρ 는 공기밀도 [kg/m^3], R 는 블레이드 반지름 [m], $\lambda (= \frac{wR}{v})$ 는 tip speed ratio, w 는 회전자의 회전각속도 [rad/s], v 는 풍속 [m/s] 그리고 C_p 는 출력계수로서 일반적으로 풍력발전기의 출력성능시험에 의해 얻은 실측 데이터를 regression하여 얻는 것으로 여기서는 식 (2)와 같은 출력계수식을 사용하였으며[3], 고정피치각 β 를 0° 로 두었다.

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

2.3 풍력발전기

풍력발전기로 이용되는 동기발전기의 모델과 인버터의 DC link 전압을 적절한 수준으로 하기위한 여자기의 모델은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 IEEE 모델을 사용하였으며, 모델링에 사용된 풍력발전기는 정격용량 1MW의 84극 동기발전기이고 정격속도는 분당 회전수 26.82로서, 식 (3)을 적용하여 정격주파수를 구하면 18.77(Hz)이다.

$$f [Hz] = \frac{P}{2} \frac{n [rpm]}{60} \quad (3)$$

본 연구에서는 AC-DC-AC 변환장치를 통해 계통과 연계되고 가변속 드라이브와 고정 피치각을 가지며 동기발전기를 풍력발전기로 갖는 풍력발전시스템에 대한 전기적인 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현한다. 블레이드와 풍력터빈은 풍속과 그에 의한 기계적 출력의 관계로 나타나는 공기역학 모델이 이용된다. 정류기와 인버터로 구성된 전력변환장치 모델과 풍속에 따른 최대 출력을 제어하기 위한 유효전력 제어와 단자전압의 일정

단, f 는 정격주파수, P 는 발전기 극수, n 은 발전기의 정격 회전속도이다.

2.3 AC-DC-AC 변환부

풍속의 가변성에 의해 일정하지 못한 동기발전기의 출력을 정류기를 거쳐 직류로 변환하고 다시 인버터를 통해 일정 전압 및 일정 주파수를 갖는 교류출력으로 변환한다. 6개의 다이오드를 사용한 일반적인 수동 3상 정류기를 구성하고, 인버터는 6개의 IGBT 소자로 구성하였다. 끊임없이 변하는 풍속 입력에 대응하여 최대의 유효전력 출력을 이끌어 내고 동시에 단자전압 수준이 계통전압의 크기와 동일하게 유지하도록 무효전력 출력을 제어하며, 60Hz의 일정주파수를 유지하도록 정현파폭변조(SPWM) 방식의 스위칭 방식을 이용한 전류제어형 전압원인버터를 구현하였다.

2.3.1 인버터 제어전략

풍력발전시스템의 출력제어를 위한 인버터의 제어전략은 다음과 같다.

- 최대 유효전력 제어 - 해당 풍속에 따라 최대 출력을 이끌어 낼 수 있는 로터의 회전속도는 다르므로 풍속의 가변에 따라 최대 출력을 위한 로터 회전속도를 추종하여 최대 유효전력 출력을 내도록 제어
- 무효전력 제어 - 계통연계형 풍력발전시스템의 구내부하 또는 주변 계통부하의 급격한 변동에 의해 풍력발전시스템 단자전압은 계통에서 허용하는 전압크기 수준을 벗어날 수 있다. 적절한 무효전력 출력제어를 통해 전압크기를 일정 수준으로 유지하여야 한다.
- SPWM 스위칭 제어 - 전류제어형 전압원인버터를 통해 유효 및 무효전력 제어 시, 원하고자 하는 출력을 갖게 하는 기준전류를 설정하고 실제 전류가 이러한 기준전류를 추종하도록 하기 위하여 정현파폭 변조 방식을 이용하여 IGBT 소자에 스위칭 신호를 전달한다.

2.3.2 전류제어 및 기준전류의 설정

d-q 변환을 이용하여 유효 및 무효전력 제어를 위한 기준전류를 d축 및 q축 상의 기준전류로 나타내고 이를 다시 역 d-q 변환을 통해 a, b, c 상의 기준전류를 변환하며 이를 SPWM 스위칭 제어를 통해 실제전류가 추종하도록 한다. 이러한 방식의 총괄적인 개념은 그림 2에서 보여준다.

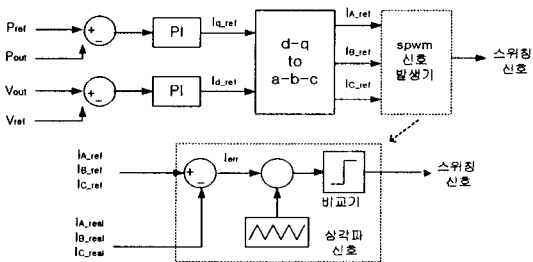


그림 2 유효 및 무효전력 제어를 위한 전류제어

제어하고자 하는 유효전력 기준값과 발전시스템 단자전압크기 기준값을 각각 실제 유효전력 출력 및 단자전압크기와 비교하여 나온 각각 오차신호를 PI제어기와 역 d-q 변환을 이용하여 a, b, c 상의 기준전류를 만들고 이를 SPWM 스위칭 신호 발생기를 통해 인버터가 동작하게 된다.

그림 2의 제어방식을 위해서 유효전력 출력 기준값 P_{ref} 와 단자전압 크기 기준값 V_{ref} 를 결정하여야 한다. V_{ref} 는 AC 계통전압의 크기와 동일하며, P_{ref} 는 해당 풍속에 대한 최대 출력값이 되어야 한다. 식 (1)을 이용하여 풍

속에 의한 최대 출력 P_m^{max} 을 구하면, 식 (3)과 같이 표현될 수 있다(4).

$$P_m^{max} = \omega T_m^{max} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_p^{max}}{\lambda_{opt}^3} \omega^3 = K \omega^3 \quad (3)$$

K 는 풍력터빈에 따라 결정되는 상수이며, ρ 는 공기밀도 [kg/m^3], R 은 블레이드 반지름[m], $\lambda (= \frac{wR}{v})$ 는 tip speed ratio, ω 는 회전자의 회전각속도 [rad/s], C_p^{max} 는 최대 출력계수, λ_{opt} 는 $C_p^{max} = C_p(\lambda_{opt})$ 를 만족하는 tip speed ratio 이다. 따라서, 유효전력 기준값 P_{ref} 는 P_m^{max} 에 적절한 손실계수를 곱한 값으로 설정한다. 식 (3)에 의해 해당 풍속에 대한 최대 출력은 그림 3과 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

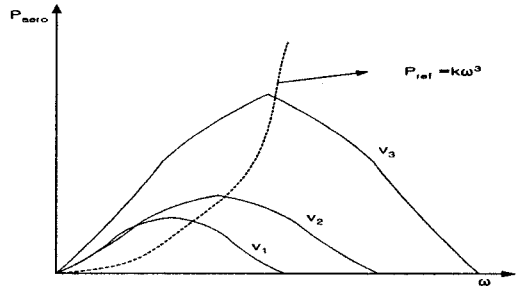


그림 3 각 풍속에 따른 로터회전속도에 대한 출력특성

2.4 성능모의

본 연구에서 개발된 계통연계형 풍력발전시스템 모델은 정격출력 1MW, 출력전압 690V로서, 470kW의 구내부하를 갖고 연계변압기를 통해 22.9kV의 배전선로에 연계하여 가변 풍속에 대한 시스템의 최대 유효전력 출력 제어 성능 및 구내부하변동에 대한 무효전력 제어 성능, 출력전압의 크기 및 주파수 성능을 모의하였다. 그림 1을 시스템을 PSCAD/EMTDC 상에서 모의한 회로는 그림 4와 같다.

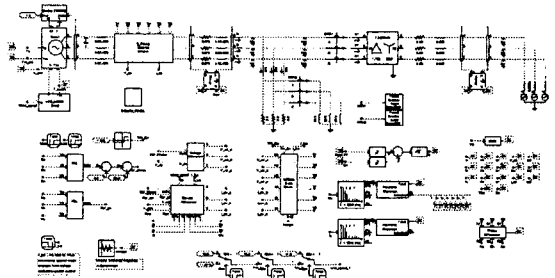


그림 4 계통연계 풍력발전시스템 모의

성능모의는 다음과 같이 진행하였다.

√ 다음과 같이 풍속의 변화를 주었을 때 출력 성능을 모의한다.

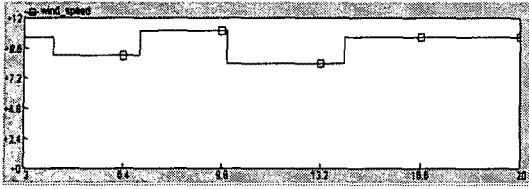
표 1 시간에 대한 풍속입력 변화

시간 [sec]	4	7	10	14	
풍속 [m/s]	10.5	9	11	8.4	10.5

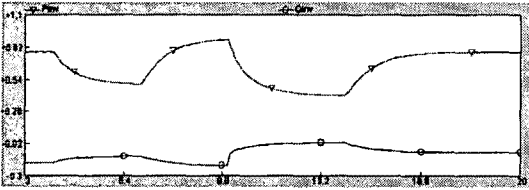
√ 10(sec)에 풍력발전의 구내부하에 126kVar의 무효전력 부하를 연결시킨다.

그림 5(a)의 풍속의 변화에 대하여 (b)에서는 유효전력 및 무효전력 출력을 보여준다. 급격한 풍속의 변동에 대하여 출력이 잘 따라가고 있으며, (c)에서 이에 따른 터빈의 회전속도의 변화를 볼 수 있다. 회전속도의 변화에 의해 (d)의 tip speed ratio가 변화하고 결국 최대 유효전

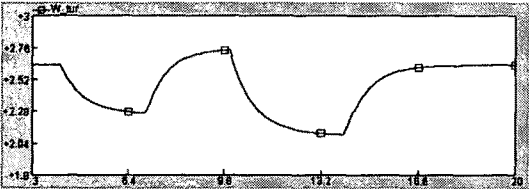
력 출력을 이끌어 낼 수 있도록 출력계수 C_p 가 최대값 0.44에 수렴해가는 과정을 (e)에서 확인할 수 있다. (f)는 무효전력 제어가 이루어지지 않은 상태에서의 출력단의 전압크기의 실효치의 변동을 보여주며, 무효전력 제어에 의해 (g)에서와 같이 출력단 전압이 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 그림 (h)는 출력단의 각 3상 전압의 파형과 전압왜형을 및 전류왜형을 나타낸다.



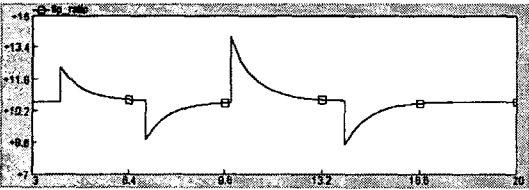
(a) 풍속입력 [m/s]



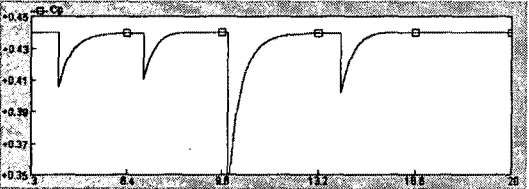
(b) 유효전력 P_{inv} 및 무효전력 Q_{inv} 출력 [pu]



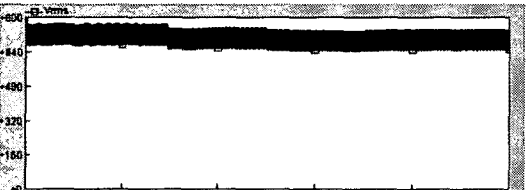
(c) 풍력터빈 회전 각속도 [rad/sec]



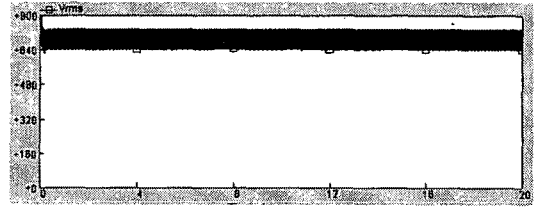
(d) tip speed ratio



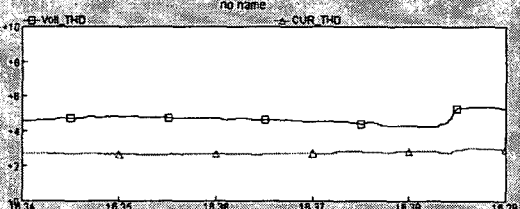
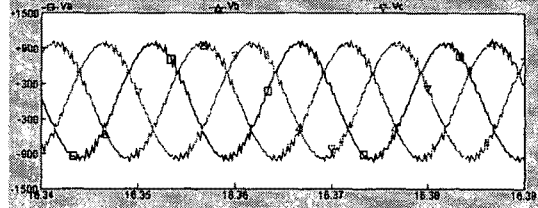
(e) 출력계수 C_p



(f) 무효전력 제어 전의 단자전압 실효치 [V]



(g) 무효전력 제어 후의 단자전압 실효치 [V]



(h) 출력전압 파형[V]과 전압왜형을 및 전류왜형율[%]
그림 5 풍속변동에 대한 응답성능

3. 결 론

본 연구에서는 계통연계형 풍력발전시스템의 컴퓨터 해석 및 계통연계 모의를 위한 전기시스템 모델을 제시하고 이를 PSCAD/EMTDC에서 구현하였다. 풍력발전 각 구성요소에 대한 모델과 전체 출력 제어를 위한 인버터 제어전략을 적용하였다. 풍속의 급격한 변동에 대해 최대 유효전력 출력을 내고 출력 전압을 일정하게 유지하기 위한 유효 및 무효전력 제어를 전압원인버터의 전류제어를 이용하여 구현하였다. 출력성능모의를 통해 모델링 시스템이 제어전략을 적절하게 실행함을 확인할 수 있었다. 추후 축관성을 고려한 역학적 특성을 추가하여 풍력발전시스템 자체 및 계통연계 모의를 위한 보다 정확한 모델을 개발할 예정이며, 이를 통한 보호협조체제 및 전력품질 개선을 위한 연구 및 모의가 계속 되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Z. Chen, E. Spooner, "Grid Power Quality With Variable Speed Wind Turbines, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 16, NO. 2, JUNE 2001, pp.148-154.
- [2] Z. Chen, E. Spooner, "GRID INTERFACE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES", IPEMC'97 Hangzhou, China, pp.256-261, 1997
- [3] A. Murdoch, R. S. Barton, J. R. Winkelman, S.H. Javid, "Control Design and Performance Analysis of a 6 MW wind Turbine Generator", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983, pp.1340-1347
- [4] A.S.Neris, N.A. Vovos, G.B Giannakopoulos, "A VARIABLE SPEED WIND ENERGY CONVERSION SCHEME FOR CONNECTION TO WEAK AC SYSTEMS", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, March 1999, pp. 122-127