

계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석

論 文
52B-8-8

PSCAD/EMTDC BASED MODELING AND ANALYSIS OF A GRID-CONNECTED VARIABLE SPEED WIND ENERGY CONVERSION SCHEME

金 슬 기* · 金 應 相**
(Kim Seul Ki · Kim Eung Sang)

Abstract - The paper presents a simulation model and analysis of a grid-connected variable speed wind energy conversion scheme (VSWECS) using the PSCAD/EMTDC software. The modeled system uses a variable speed drive, a fixed pitch angle, a synchronous generator as a wind generator and an AC-DC-AC conversion scheme, which facilitates the wind generation to efficiently operate under varying wind speed while connected to the distribution network. The power 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 magnitude of the terminal bus at a specific level. Aerodynamic models are applied for a wind turbine model. An simulation analysis of the scheme in terms of its responding to wind variations is also presented.

Key Words : Wind energy conversion scheme, Grid connection, Current controlled voltage source inverter

1. 서 론

풍력발전시스템은 전력망 접속운전 여부에 따라 독립운전 방식과 계통연계방식으로 구분된다. 독립운전 방식은 송배전 선을 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 있는 것은 아니다. 따라서 안정적인 전력공급 측면이나 풍력자원의 포괄적인 활용측면에서 상용계통과 연계되어 초과하거나 부족한 전력을 계통으로 보내거나 계통으로부터 공급받을 수 있는 계통연계방식이 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]. 따라서, 실제 특정용량을 가지는 풍력발전을 계통연계하기에 앞서, 투입되는 풍력발전시스템으로 인한 주변 계통의 전기품질 및 보호체계에 미치는 영향에 대한 과도현상 및 정상상태 해석이 필수적으로 선행되어야 하며, 이러한 적용 예비단계 해석을 위하여 컴퓨터 해석 프로그램을 이용한 풍력발전시스템의 모델링이 이루어져

한다.

본 논문에서는 가변속 드라이브, 고정 피치각 풍력터빈 및 동기발전기로 구성되며, AC-DC-AC 변환장치를 통해 계통과 연계되는 풍력발전시스템에 대한 모델을 제시한다. 가변속 풍력발전의 구성과 각 구성요소에 대한 모델을 제시하며, 풍속변동에 대응하여 출력을 조정하는 AC-DC-AC 변환이 소개된다. AC-DC-AC 변환에서는 전압원인버터의 전류제어를 적용하여 풍속에 따른 최대 출력을 내기 위한 유효전력 제어와 일정수준의 단자전압을 유지하기 위한 무효전력 제어가 이루어진다. 모델링 및 해석은 유용한 컴퓨터 시뮬레이션 소프트웨어 PSCAD/EMTDC를 이용하였다[3].

2. 본 론

2.1 전체 시스템 구성

계통연계형 풍력발전시스템의 전체 구성은 그림 1과 같다. 고정 피치각을 갖는 풍력터빈, 동기발전기, 정류기, 인버터 및 구내부하로 구성되며, 이는 연계변압기를 통하여 배전망에 연계되어 있다. 풍력발전기는 일반 유도발전기가 아닌 다극형 동기발전기로서, 발전기 측은 기어박스 없이 로터와 직접 물려 있다. 풍력터빈이 동기발전기를 회전시키며 동기발전기에 설치된 여자기는 DC link의 전압이 일정 수준 이상이 되도록 한다. 끊임없이 변하는 풍속에 의한 동기발전기 고르지 못한 출력은 다이오우드 정류기를 통하여 직류로 변환되고, 이 직류 출력은 IGBT 스위치를 사용한 전압원인버터에 의해 일정한 전압크기와 주파수를 갖는 교류출력으로 변환된다. 이 전압원인버터는 변동하는 풍속 또는 구내 접속부하의 변동에 대하여 전체 풍력발전시스템의 유효전력출력 및 무효전력출력을 제어한다. 교류출력의 고조파를 저감하기 위해

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員
** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
接受日字 : 2003年 3月 10日
最終完了 : 2003年 6月 4日

인버터 후단의 필터가 사용된다. 이렇게 변환된 풍력발전의 교류출력은 일부 구내부하를 담당하고 일부는 연계변압기를 통해 승압되어 배전망으로 공급된다. 본 논문에서는 풍력발전이 접속된 계통은 그 용량이 풍력발전 정격용량에 비해 매우 커서 풍력발전 출력의 변동에 의해 전압 및 주파수가 중요되지 않는 무한모선으로 고려한다.

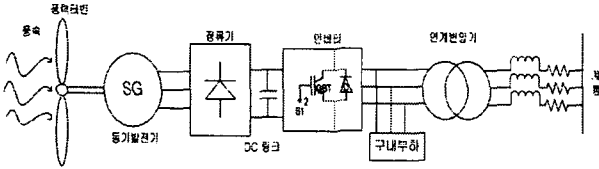


그림 1 전체 시스템 구성
Fig. 1 The studied VSWECS

2.2 풍력터빈

풍속에 대한 풍력터빈 출력은 풍속, 시스템의 출력계수에 좌우되며 이는 식 (1)과 같이 주어진다[4].

$$P_M = \frac{1}{2} \pi \rho V^3 R^2 C_p \tag{1}$$

여기서, P_M 는 풍속에 의한 풍력터빈을 통해 풍력발전기에 전달되는 출력, ρ 는 공기밀도 [kg/m^3], R 는 블레이드 반지름 [m], V 는 풍속 [m/s] 그리고 C_p 는 운전점에서 블레이드의 효율을 나타내는 출력계수이다. 따라서 특정 풍속에서의 풍력터빈 출력은 출력계수에 전적으로 의존한다. 출력계수는 일반적으로 풍력발전기의 출력성능시험에 의해 얻은 실측 데이터를 수식화하여 얻는 것으로 여기서는 식 (2)와 같은 출력계수식을 사용하였다[5].

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

여기서 β 는 블레이드 피치각이며, 본 풍력발전은 고정 피치각을 가지므로 피치각 β 는 0° 이다. λ 는 Tip Speed Ratio로서 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \tag{3}$$

ω 는 풍력터빈의 회전각속도 [rad/s]이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이, 출력계수 C_p 는 tip speed ratio λ 에 의해 결정되고, λ 는 주어진 풍속에서 풍력터빈의 회전 각속도 ω 에 의해 좌우되므로, 특정 풍속에서 풍력터빈의 출력은 ω 에 따라 결정된다. 따라서 최대 출력을 얻기 위해서는 ω 이 최대 출력점에서 동작하도록 하여야 한다.

2.3 풍력발전기

PSCAD/EMTDC에서 제공하는 동기발전기 모델과 IEEE SCRX 여자기 모델[3]을 사용하였다. 이 모델에서 동기발전기의 로터는 세 권선으로 구성되어 있으며, 과도현상과 차과

도 현상을 d축 상에서 표현할 수 있도록 계자권선 및 감쇄권선은 d 축에서 고려되며, Q축에서는 차과도 시정수를 갖는 감쇄권선이 고려된다. 모델링에 사용된 풍력발전기는 풍력터빈과 직접 연결되어 있고, 정격용량은 1MW, 극수는 84극인 동기발전기이고 정격속도는 분당 회전수 26.82로서, 식 (4)를 적용하여 정격주파수를 구하면 18.77[Hz]이다. 단, f 는 정격주파수, P 는 발전기 극수, n 은 발전기의 정격 회전속도이다.

$$f [Hz] = \frac{P}{2} \frac{n [rpm]}{60} \tag{4}$$

2.4 풍력발전기와 터빈의 동요방정식

풍력발전기의 터빈, 발전기 즉 각 질량체 간의 비틀림 진동이 발생하는 SSR(Sub-Synchronous Resonance)현상을 분석하는 경우에는 터빈, 발전기의 다중 질량체로 표현하여 분석할 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 풍속의 변동에 따른 풍력발전시스템 출력제어에 중점을 둔 전기적인 모델의 적용에 관점을 두고 있으므로, 터빈과 발전기를 단일한 회전 질량체로 표현하며, 그림 1에서와 같이 풍력터빈은 기어박스 없이 발전기에 직접 연결되어 있으므로 이는 식(5)와 같은 동요방정식으로 나타낼 수 있다.

$$J_M \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{\omega_r} (P_M - P_G) - D \tag{5}$$

여기서, J_M 은 단일 질량체 inertia [$kg \cdot m^2$], ω_r 는 발전기 회전자의 각속도 [rad/s], P_M 은 풍력터빈 출력 [kW], P_G 는 발전기 출력 [kW]이고 D 는 발전기 감쇄계수 [$N \cdot m$]이다.

2.5 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. 이 변환부는 6개의 다이오드를 사용한 일반적인 수동 3상 정류기와, 6개의 IGBT 스위치를 이용한 전압원인버터로 구성된다. 끊임없이 변하는 풍속 입력에 대응하여 최대의 유효전력 출력을 이끌어 내고 동시에 단자전압 수준이 계통전압의 크기와 동일하게 유지하도록 무효전력 출력을 제어하기 위하여 전압원인버터의 전류제어방식이 적용된다. 다음 절에서 인버터의 구체적인 제어전략에 대하여 설명한다.

2.6 인버터 제어전략

계통연계형 풍력발전시스템의 출력제어를 위하여 인버터는 다음과 같은 제어전략을 가진다.

- ① 유효전력 제어 - 특정 풍속에서 얻을 수 있는 유효전력 출력은 로터의 회전속도에 따라 달라진다. 풍속의 변동에 따라 최대의 유효전력을 얻기 위해 로터가 연속적으로 최대 출력점에서 동작하도록 제어한다.
- ② 무효전력 제어 - 풍력발전시스템의 부하가 갑자기 증가하면, 부하단의 전압의 크기는 떨어지기 시작한다. 또한 풍속이 급격히 증가하면, 인버터의 유효전력제어에 의해 더

많은 전력조류가 계통으로 흐르게 되고 이로 인해 계통의 전압과 부하단의 전압의 차이가 커지게 되어 부하단의 전압의 크기가 허용한도를 벗어날 수 있다. 이를 막기 위해 인버터는 부하단의 전압의 크기를 감지하고 허용한도에서 벗어나지 않도록 무효전력의 공급을 제어한다.

- ③ 인버터 출력단에서의 실제 전류가 위의 유/무효전력 제어 전략에 의해 설정된 기준전류를 추종하도록 SPWM 스위칭 기법을 사용한다.

2.6.1. 인버터 제어전략 수행을 위한 전류제어

풍력발전시스템으로부터 계통으로 투입되는 유효전력 및 무효전력 출력은 임의의 제어를 위해 설정된 기준전류를 출력전류가 추종하게 하는 전류제어 알고리즘을 적용한 전압원 인버터에 의해 제어될 수 있다. 이 기준전류는 전류의 기준 크기와 기준 위상각으로 이루어진 벡터로서, 기준 크기와 기준 위상각을 풍력발전시스템과 계통 간의 유/무효전력 교환을 제어하기 위한 유/무효전력의 설정치로부터 직접 계산하여 설정할 수 있으나, 본 연구에서는 보다 적용하기 용이하고 일반적인 dq 좌표 변환을 이용하여 기준전류의 크기와 위상각을 설정한다.

3상 평형시스템에서 인버터의 순시 유효전력의 크기 P와 순시 무효전력의 크기 Q를 dq 평면에서 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q), \quad Q = \frac{3}{2} (V_d I_q - V_q I_d) \quad (6)$$

V_d 와 V_q 는 인버터 출력 각 상의 순시 교류전압 V_a 와 V_b , V_c 를 dq 평면으로 변환한 값이고, I_d 와 I_q 는 각 상의 순시 교류전류 I_a 와 I_b , I_c 를 변환한 값이다. 여기서, V_q 는 인버터출력 모션 전압의 순시치와 일치하므로 V_d 는 항상 0이 된다. 따라서 식 (7)을 얻고 식 (6)과 (7)부터 식(8)을 얻을 수 있다.

$$V_q = |V_o|, \quad V_d = 0 \quad (7)$$

$$P = \frac{3}{2} |V_o| I_q, \quad Q = -\frac{3}{2} |V_o| I_d \quad (8)$$

단, $|V_o|$ 는 인버터 출력전압의 크기이다. 식 (8)에서 순시 유효전력의 크기는 인버터 출력전압의 크기와 출력전압과 동상인 선로전류의 크기에 비례하고, 순시 무효전력의 크기는 출력전압의 크기와 출력전압과 90°의 위상차를 이루는 선로전류의 크기에 비례함을 알 수 있다. 인버터의 출력단은 선로 임피던스를 통해 계통으로 연결되어 있고, 계통은 전압의 크기가 상수로 취급될 수 있을 만큼 대용량이라고 하면, 부하와 인버터 출력전류의 크기의 변화에 의한 $|V_o|$ 의 변화는 I_d 와 I_q 의 변화에 비하면 아주 작으므로 P와 Q는 각각 I_d 와 I_q 에 좌우된다고 볼 수 있다. 이를 식(9)와 같이 표현한다.

$$P \propto I_q, \quad Q \propto -I_d \quad (9)$$

따라서, I_q 와 I_d 를 직접 조정하여 인버터에서 계통으로 투입되는 유/무효전력을 쉽게 제어할 수 있다.

그림 2는 전압원인버터의 전류제어를 통한 풍력발전시스템의 유효 및 무효전력 제어 개념도이다.

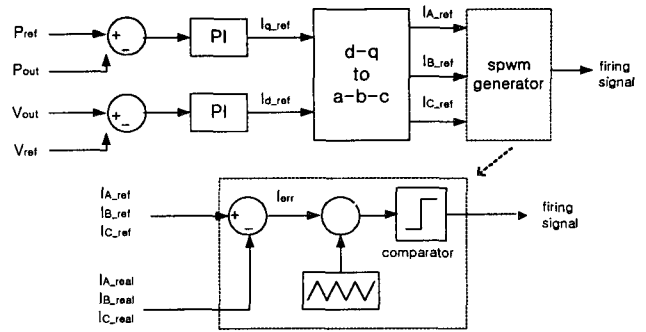


그림 2 인버터의 유효 및 무효전력 제어 개념도
Fig. 2 Real and reactive power control of a VSI

오차신호 I_{err} 를 이용하여 기준전류를 추종하도록 하기 위하여 페루프와 PI제어를 사용한다. 인버터의 유효전력출력 P_{out} 와 유효전력 설정치 P_{ref} 의 오차신호에 적절한 계인을 갖는 PI제어를 이용하여 q축 전류의 기준값 I_{q_ref} 를 설정하고, 마찬가지로 풍력발전시스템 출력단의 전압의 크기 V_{out} 와 일정하게 유지하려는 출력단 전압의 설정치 V_{ref} 의 오차신호로부터 d축 전류의 기준값 I_{d_ref} 를 설정한다. d축 전류의 기준값의 변화에 의해 인버터는 부하단의 전압의 실효치가 설정치 V_{ref} 로 유지되도록 무효전력을 공급하거나 소모하게 된다. 이렇게 결정된 q축과 d축의 기준값 I_{q_ref} 와 I_{d_ref} 는 dq-abc 변환에 의해 원래 abc 평면에서의 각 a, b, c 상에 대한 기준전류 I_{A_ref} 와 I_{B_ref} , I_{C_ref} 로 변환된다. SPWM 스위칭 기법을 기반으로 이렇게 설정된 a, b, c상의 기준전류와 실제전류 I_{A_real} , I_{B_real} , I_{C_real} 와의 오차신호 I_{err} 를 임의의 스위칭 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 IGBT에 스위칭 신호를 전달하게 된다.

2.6.2. 유/무효전력의 기준값 지정

앞에서 제시된 전류제어를 위한 기준전류를 정하기 위해서는 유효전력의 기준값 P_{ref} 와 부하단 전압크기의 기준값 V_{ref} 를 결정해야 한다. 계통연계형 풍력발전에서는 출력전압이 계통전압과 동일한 출력을 계통에 공급해야 하므로 V_{ref} 는 교류계통전압의 크기와 동일해야 한다. P_{ref} 는 주어진 풍속에서 얻을 수 있는 풍력발전시스템의 최대 출력이어야 한다. 식 (1)에 식 (3)을 대입하여 풍속 V를 소거하면 풍력터빈으로부터 얻을 수 있는 최대 출력점은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$P_{max} = 0.5 \rho \pi R^5 \frac{C_p^{max}}{\lambda_{opt}^3} = K \omega^3 \quad (10)$$

- 단, K는 특정 풍력터빈에 따라 결정되는 상수
- ρ 는 공기밀도
- R은 블레이드의 반지름
- C_p^{max} 는 최대출력계수(=0.44, 식(2)참조)
- λ_{opt} 는 C_p 가 최대가 되도록 하는 λ (=10.5, 식(2) 참조)
- ω 은 풍력터빈의 회전 각속도

공기밀도, 블레이드 반지름, 최대출력계수, 출력계수가 최

대일 때의 λ 은 모두 상수로 취급할 수 있으므로 풍력터빈의 출력은 터빈의 회전속도 ω 에 따라 결정된다. 식 (10)을 이용하여 특정 풍속에서의 풍력터빈의 최대 출력을 나타내면 다음 그림 3과 같다. 따라서, 가변 풍속에 대하여 풍력터빈이 최대 출력을 낼 수 있도록 인버터의 유효전력 출력 기준값 P_{ref} 는 P_m^{max} 에 손실계수 η 를 곱한 ηP_m^{max} 로 둔다. η 는 풍력터빈 말단에서 AC-DC-AC 변환부 출력단까지의 손실을 고려한 손실계수이어야 한다.

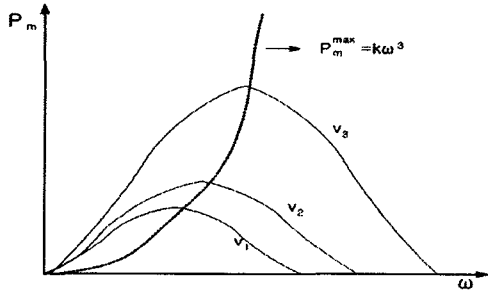


그림 3 풍속에 대한 풍력터빈 출력곡선
Fig. 3 Power output curve for a wind turbine

2.7 성능모의

본 연구에서 제시한 전압원인버터를 이용한 계통연계형 풍력발전시스템 모델의 성능을 모의한다. 전력계통의 전자기 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하며, 모의된 모델은 정격출력 1MVA, 출력전압 690V이다. 300kW의 구내부하가 출력단 모선에 접속되어 있으며 0.69/22.9 kV 연계변압기를 통해 22.9kV의 배전선로에 연계되어 있다. 가변 풍속에 대한 시스템의 최대 유효전력 출력 제어 성능 및 구내부하변동에 대한 무효전력제어 성능, 출력전압의 크기 및 주파수 성능을 모의하였다. 인버터의 스위칭 주파수는 7.2kHz이며, EMTDC의 모의시간 스텝은 5μ[sec]이다. 성능모의 시나리오는 다음과 같다.
√ 표 1과 같이 풍속의 변화를 주었을 때 출력 성능을 모의한다. - 풍속의 변동에 따른 유효전력 출력변동이 적절하게 이루어지고 있는 지를 검토하고, 동시에 풍력터빈의 회전속도 및 출력계수 C_p 의 값의 변화를 분석하여 최대 출력제어가 수행되는지를 검토한다.

표 1 시간에 대한 풍속입력 변화
Table 1 Wind speed input changes

시간 [sec]	1	5	9	13	
풍속 [m/s]	9.0	11.0	7.0	9.5	8.5

√ 10[sec]에 풍력발전시스템의 출력단 부하에 140kVar의 무효전력부하를 연결시킨다. - 무효전력부하를 출력단 모선에 접속시키고 이 때 적절한 무효전력 출력제어를 통해 부하전압이 일정하게 유지되는지를 검토한다. 또한 무효전력 제어를 하지 않은 경우의 출력전압 및 무효전력 출력을 무효전력 출력제어 한 경우와 비교한다. 무효전력 제어가 없는 경우는 무효전력 출력을 초기 운전 시 설정한 값으로 고정된 채 운

전되도록 모의한다.

위의 시나리오에 따라 다음 두 가지 사례에 대하여 모의를 수행한다.

사례 1 : 유효전력 및 무효전력 출력제어

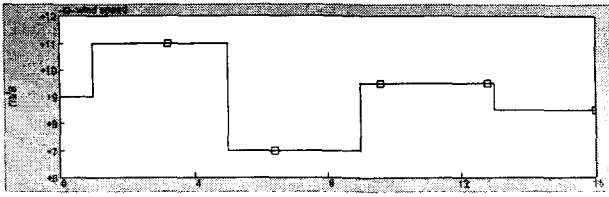
사례 2 : 유효전력 출력제어만 하고, 무효전력 출력은 일정한 값으로 고정

2.7.1. 사례 1

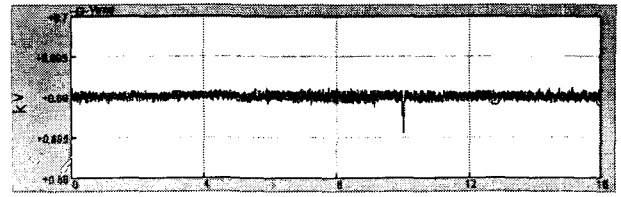
그림 4(a)는 풍력터빈에 입력되는 풍속을 나타낸다. 그림 4(b)는 풍력발전시스템의 유효전력 출력 및 계통으로 유입되는 유효전력 출력을 나타낸다. 출력이 풍속의 변화를 쫓아가고 있으며, 계통으로 유입되는 전력은 풍력발전의 유효전력 출력과 일정한 크기의 차이를 두며 동일한 추이의 곡선을 나타내는데, 이는 출력단에 연결된 300kW의 부하에 전력을 공급하고, 잉여 전력을 계통으로 전송하고 있음을 의미한다. 그림 4(c) - 4(e)는 각각 풍력터빈의 회전속도와 Tip speed ratio, 출력계수 C_p 를 나타낸다. 식 (1)에서 보듯이 특정 풍속에서 출력계수 C_p 가 최대값을 가질 때 최대출력이 발생된다. 식 (2)에 따르면 출력계수는 Tip speed ratio가 최적의 값, 즉 10.5에 이를 때, 최대값 0.44가 된다. 그림 4(d)와 4(e)에서 풍속이 변동할 때마다, Tip speed ratio 및 출력계수가 각각 10.5 및 0.44로 수렴하는 방향으로 이동하고 있으며, 이를 통해 현재의 풍력발전시스템이 해당 풍속에 대하여 최대출력을 내도록 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 요약하면, 풍속의 변화에 의해 풍력발전기에 입력되는 기계적인 토크와 출력되는 전기토크사이의 균형이 깨어져서 터빈의 회전속도는 변하게 되고, 인버터를 통해 최대 출력을 이끌어냄으로써 풍력발전기의 기계토크와 전기토크는 균형을 이루고 터빈 회전속도는 최적속도로 수렴하게 된다.

그림 4(f)는 정류기와 인버터 사이의 직류단의 전압 V_{dc} 로서 풍속 변동 시 약간의 동요를 보이고 있지만, 인버터의 유효출력제어에 의해 풍력터빈의 입출력관계가 균형을 이루게 되므로, 전체적으로 일정한 값을 유지하게 된다. 여기서, 5[sec]~9[sec] 구간엔 풍속이 7[m/s]로서 출력이 약 0.23 [pu]정도의 저속영역이나(그림 4(b)참고) 직류단 전압 수준은 거의 일정수준을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

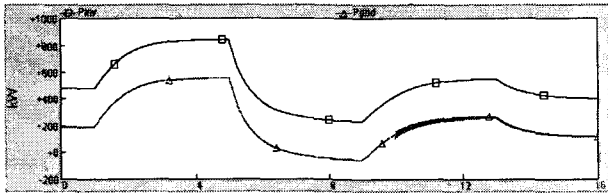
그림 4(g)는 출력단 부하전압의 실효치 V_{rms} 를 나타내며, 그림 4(h)는 풍력발전시스템의 무효전력 출력 및 계통으로 유입되는 무효전력을 나타낸다. 그림 10[sec]에 출력단 부하에 140kVar가 연결될 때, 출력단의 부하전압이 일시적으로 하락하나 곧 무효전력제어에 의해 일정한 값을 유지하게 됨을 볼 수 있고, 그림 4(h)에서 10[sec] 순간에 접속된 140kVar의 추가 무효전력부하를 담당하기 위해 계통으로부터 무효전력이 공급되려 하나, 인버터의 무효전력출력 Q_{inv} 이 증가함에 따라 풍력발전시스템과 계통간의 무효전력 수수는 무효전력부하가 접속되기 전과 동일한 수준을 유지하게 된다. 그림 4(i)는 전압원인버터의 전류제어를 위한 d축 기준전류와 q축 기준전류를 나타낸다. 여기서, 식 (9)와 그림 2에서 설명한 q축 기준전류와 인버터의 유효전력 출력과의 관계와 d축 기준전류와 인버터의 무효전력 출력성분과의 관계를 확인할 수 있다.



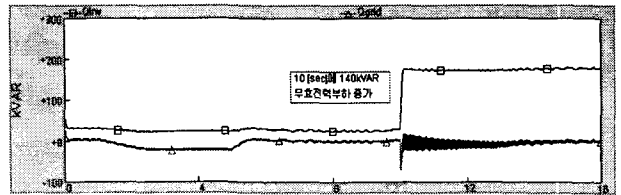
(a) 풍속변동
(a) Wind speed changes



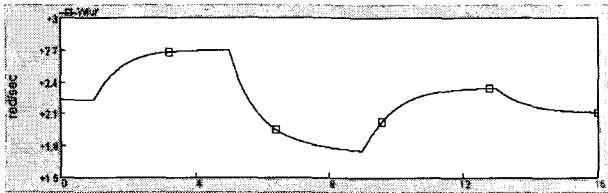
(g) 부하단 전압 (실효치)
(g) Load voltage magnitude (rms value)



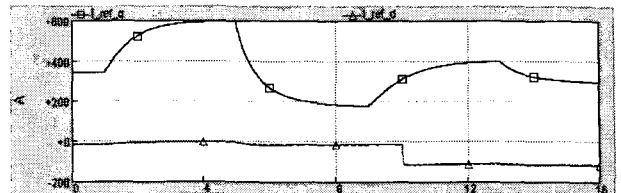
(b) 유효전력출력(P_{inv}) 및 계통에 유입되는 유효전력(P_{grid})
(b) Real power output(P_{inv}) & real power into the grid (P_{grid})



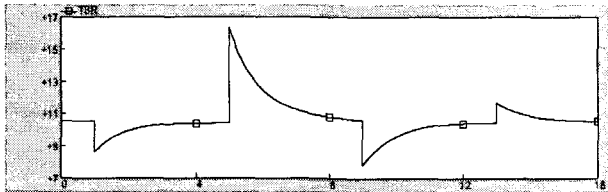
(h) 무효전력출력(Q_{inv}) 및 계통에 유입되는 무효전력(Q_{grid})
(h) Reactive power output(Q_{inv}) & reactive power into the grid (Q_{grid})



(c) 풍력터빈의 회전속도
(c) Rotational speed of the wind turbine



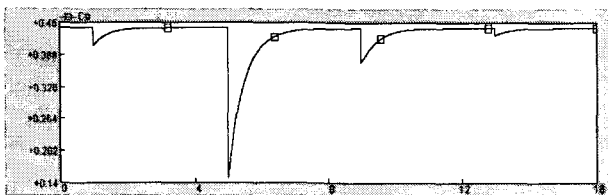
(i) q축 기준전류($I_{ref,q}$)와 d축 기준전류($I_{ref,d}$)
(i) Reference current of q-axis ($I_{ref,q}$) and d-axis ($I_{ref,d}$)



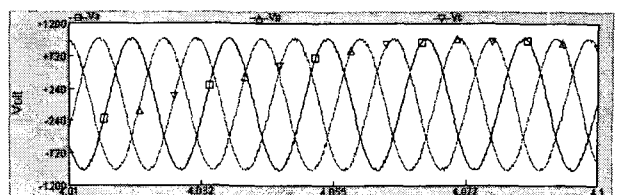
(d) Tip speed ratio
(d) Tip speed ratio



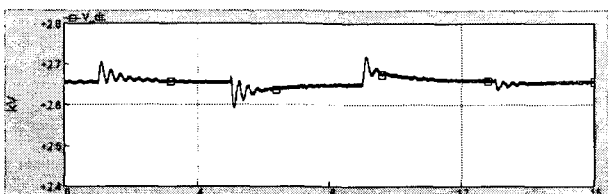
(j) 출력전류 및 출력전압의 종합왜형률(CUR_THD 및 Volt_THD)
(j) THD for output current & output voltage (CUR_THD & Volt_THD)



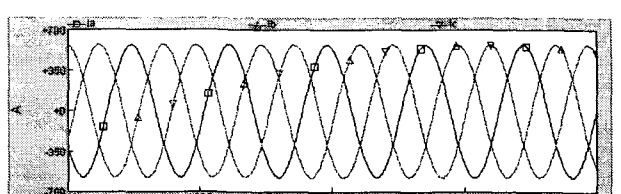
(e) 출력계수 C_p
(e) Power coefficient C_p



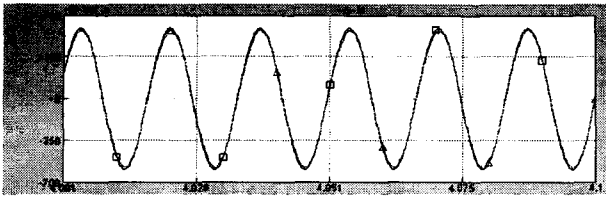
(k) 출력단 순시전압 파형
(k) Output voltage waveforms



(f) 인버터 직류단 전압
(f) DC link voltage



(l) 출력단 순시전류 파형
(l) Output current waveforms



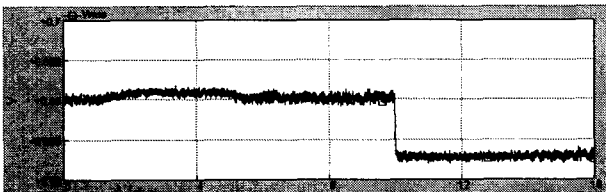
(m) A상 기준전류($I_{ref,a}$)와 인버터 A상의 출력전류(I_a)
 (m) Phase-A reference current ($I_{ref,a}$) & output current (I_a)

그림 4 사례 1의 결과
 Fig. 4 Results of case 1

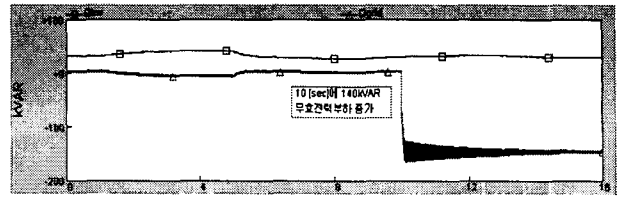
그림 4(j)는 모의되는 16초 동안의 출력단 부하모선의 전압의 종합왜형률과 출력전류의 종합왜형률을 나타낸 것으로서, 출력전압의 경우 약 2.5%, 출력전류의 경우, 풍력발전시스템의 출력에 따라 2~4 %를 보이고 있다. 10[sec] 순간에 출력전류의 종합왜형률이 순간적으로 급상승했다가 원래 수준으로 돌아오는 것이 관찰되는데 이는 급격한 무효전력부하가 접속됨에 따라 무효전력제어에 의해 무효전력보상 시 급격한 출력전류의 변동으로 인한 것으로서, 그림 4(i)의 d축의 기준전류가 급격히 변한 것에 의한 것으로 판단된다. 그림 4(k)와 4(l)은 출력단 모선에서의 순시 출력전압 및 순시 출력전류의 파형을 보여준다. 그림 4(m)은 3상 중 A상의 기준전류 $I_{ref,a}$ 와 인버터의 A상의 실제 출력전류 I_a 로서, 실제 전류가 기준전류를 잘 추종하고 있으며, SPWM 스위칭 제어가 원활히 수행되고 있다.

2.7.2 사례 2

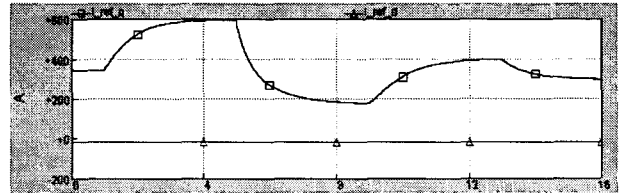
그림 5는 유효전력만 제어하고 무효전력 출력제어가 없는 경우를 모의한 결과로서, 그림 5(a)는 풍력발전시스템의 출력단 부하의 전압의 실효치 V_{rms} 와 그림 5(b)는 풍력발전시스템의 무효전력 출력 Q_{inv} 와 계통으로 유입되는 무효전력 Q_{grid} 를 나타낸 것이다. 사례 1의 경우와 달리 10 [sec]에 부하단 전압이 급격히 하락하고, 10[sec]이전에도 풍속의 변동에 따른 풍력발전의 출력전류의 변동에 의해 부하단 전압이 완만하게 변화하고 있음을 볼 수 있다. 10 [sec] 순간에 풍력발전의 무효전력 출력은 응동하지 않고 계통으로부터 풍력발전시스템 측으로 무효전력이 유입되고 있음을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 인버터 전류제어를 위한 q축 및 d축의 기준전류를 나타낸다. d축 기준전류를 일정한 값으로 유지시켜 무효전력 제어가 구동되지 않고 있다.



(a) 부하단 전압 (실효치)
 (a) Load voltage magnitude (rms value)



(b) 무효전력출력(Q_{inv}) 및 계통에 유입되는 무효전력(Q_{grid})
 (b) Reactive power output(Q_{inv}) & reactive output into the grid(Q_{grid})



(c) q축 기준전류($I_{ref,q}$)와 d축 기준전류($I_{ref,d}$)
 (c) Reference current of q-axis ($I_{ref,q}$) and d-axis ($I_{ref,d}$)

그림 5 사례 2의 결과
 Fig. 5 Results of case 2

3. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 가변속 풍력발전방식의 컴퓨터 해석 및 계통연계 모의를 위한 해석 모델을 제시하고 이를 전력계통 및 전력설비의 전자기 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC에서 구현하고 해석하였다. 풍력발전 각 구성요소에 대한 모델과 가변속 풍속발전시스템의 출력 제어를 위한 인버터 제어전략을 제시하였다. 끊임없이 변하는 풍속에 대하여 최대 출력을 이끌어 내기 위한 유효전력 출력제어와 풍속의 변동 및 부하의 변화에 대하여 출력 전압을 일정하게 유지하기 위한 무효전력 출력제어를 위하여 전압원인버터의 전류제어 알고리즘을 적용하였다.

성능모의 및 해석을 통해 풍속변동에 대하여 최대출력제어가 원활히 수행됨을 검토하였고, 무효전력 부하의 변동에 대하여 적절한 무효전력 제어를 통해 출력단 전압이 일정하게 유지됨을 확인하였다. 풍력발전 유효전력 및 무효전력 출력제어를 위한 SPWM 스위칭을 이용한 전압원인버터의 전류제어 동작을 검토하였다. 또한, 전압원 인버터를 포함한 계통연계형 풍력발전시스템 전체의 응답특성을 고찰하였다. 추후 계통연계 관련 연구의 일환으로서 풍력발전이 연계된 전력망의 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", IPENC'97

Hangzhou, China, pp.256-261, 1997

- [3] Manitoba HVDC Research Center. PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual, EMTDC version 3, 1998
- [4] Mukund R. Patel. Wind and Solar Power Systems, pp. 81-82. CRC Press, USA. 1999
- [5] 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
- [6] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bundy. Power System Dynamics and Stability, pp. 323-330. John Wiley & Sons, Great Britain. 1997
- [7] A. S. Neris, N.A. Vovos, G. B. Giannakopoulos. A Variable Speed Wind Energy Conversion Scheme for Connection to Weak AC System. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, March 1999, pp. 122-127.

저 자 소 개



김슬기(金슬기)

1972년 5월 7일 생. 1998년 고려대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력시스템 연구그룹 연구원
Tel : 055-280-1332
E-mail : blkssheep@keri.re.kr



김응상(金應相)

1962년 6월 21일 생. 1988년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재, 한국전기연구원 신전력시스템 연구그룹 책임연구원
Tel : 055-280-1330
E-mail : eskim@keri.re.kr