

## 전압원인버터를 이용한 계통연계형 풍력발전의 출력제어 모의 및 해석

김슬기 · 김응상

한국전기연구원

E-mail : blksheep@keri.re.kr, eskim@keri.re.kr

### Modeling and Analysis of Control Scheme for Voltage Source Inverter Based Grid-connection of Wind Turbine

Seul-Ki Kim and Eung-Sang Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

#### 요 약

전력계통에 연계하기 위해서 풍력발전시스템은 계속해서 변하는 풍속에 응동하여 적절한 출력을 계통에 공급할 수 있을 뿐만 아니라, 연계되는 전력계통에서 허용될 수 있는 수준의 주파수와 전압크기를 갖는 출력을 제공할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 풍력발전의 적절한 출력제어가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 동기발전기가 전압원인버터로 구성된 AC-DC-AC 변환부를 거쳐 계통에 접속되는 계통연계형 풍력발전시스템의 출력제어 전략을 소개하며, 이를 전자기 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하고 해석하였다. 블레이드를 통해 입력되는 풍속에 대하여 최대 에너지를 공급할 수 있도록 전압원인버터의 유효전력 출력제어가 이루어지며, 출력단 전압을 일정하게 유지하기 위한 무효전력 출력제어가 행해진다. 또한 60 Hz의 주파수 출력 및 고조파 저감을 위해 SPWM 스위칭 방식을 채택하였다. 풍속의 변동 및 부하의 변동에 대한 풍력발전시스템의 응동특성 및 출력변화를 모의하고 해석한다.

**Abstract** — Grid connection essentially requires a wind energy conversion system (WECS) to not only supply adequate power responding to constantly varying wind speed but also provide a specified level of voltage magnitude and frequency that is acceptable in the electric power network. To satisfy such requirements, appropriate control schemes of a wind turbine to be connected to the power grid should be employed. This paper presents an output control strategy of a grid-connected wind power generation, which consists of a fixed-pitch wind turbine, a synchronous generator and a AC-DC-AC component with a voltage source inverter built in, and performs modelling and analysis of the strategy using PSCAD/EMTDC, an electromagnetic transient analysis software. Real power output control of the voltage source inverter is implemented to extract the maximum energy from wind speed inputted through wind blades and reactive power control, to keep the terminal voltage of WECS at a specific level. SPWM switching method is used to reduce the harmonics and maintain 60 Hz of the output frequency. The wind turbine performance and output corresponding to wind variation and the terminal load change is simulated and analysed.

#### 1. 서 론

산업발전과 경제성장으로 인한 에너지 소비량의 급격한 증가와 전력수요 증가 및 화석에너지 사용에 따른 환경문제의 심화로 인해 대체에너지 전원 개발 및 적용 기술이 현저히 발전해가고 있으며, 특히 풍력발전은 시스템 설치비와 발전단가가 기존의 다른 발전방식과 경쟁

이 가능한 수준이며, 지속적인 투자와 기술개발로 단가가 더욱 낮아지고 있다. 이미 전 세계적으로 총 시설용량이 24,000 MW에 이르고 있으며, 각국의 전력회사들은 풍력에너지의 청정성, 저비용 및 신뢰성으로 인해 풍력발전설비의 건설을 증대해 나가고 있다<sup>1)</sup>.

풍력발전시스템은 구성방식 및 전력망 접속여부에 따라 여러 종류로 분류하지만, 효율적인 운용을 위하여 계

통연계 방식이 필수적이거나, 풍력터빈을 직접 연계하는 방식은 풍력발전기의 운전범위가 협소하며, 풍속의 가변성으로 인한 출력의 불규칙성으로 주변 계통수용가와 부하의 전압 주파수 등의 전력품질에 악영향을 미칠 우려가 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 최근의 추세는 가장 발전효율이 높은 기어가 없는 가변속 운전방식으로 다극 동기발전기를 사용하며, 전력변환장치를 이용하여 생산된 전력을 계통으로 보내줌으로서 발전된 출력을 최대한으로 활용하기 위한 계통연계형으로 진행되고 있다. 특히, 대전력, 고속의 스위치 소자 개발 등에 의해 이러한 전력전자기술에 기반을 둔 계통연계기술의 적용이 확산되고 있다<sup>[3]</sup>. 전력전자 기반 연계기술 적용 시 풍력터빈 뿐만 아니라 전력계통운영에 미치는 영향을 충분히 고려해야 하며, 이를 고려한 적절한 출력제어 방식, 즉 적정 에너지의 변환, 무효전력 제어, 고조파 왜형의 최소화 등의 측면이 다양하게 고려되어야 한다.

본 논문에서는 고정 피치각을 갖는 블레이드와 가변속 운전방식의 다극 동기발전기, 정류기, IGBT 소자로 구성된 전압원인버터로 이루어진 풍력발전시스템의 계통연계 시 출력제어전략을 기술하고 그 특성을 모의한다. 가변 풍속에 대응하여, 특정 풍속에 대하여 최대 에너지를 끌어내는 최대 출력제어를 구현하며, 풍속의 변동 또는 부하의 변동에 의해 흔들릴 수 있는 출력단 전압을 일정하게 유지하도록 무효전력 출력을 조절한다. 이러한 출력제어는 전압원인버터의 전류제어를 통해 구현되며, 고조파 저감을 위해 효율적인 정현파 폭 변조방식(SPWM)을 통하여 스위칭이 이루어지도록 한다. 제시되는 제어전략은 전자기과도현상 해석을 위한 컴퓨터 모의 프로그램인 PSCAD/EMTDC<sup>[4]</sup>를 이용하여 모델링하며, 몇 가지 사례를 모의하여 계통연계형 풍력발전의 출력제어전략 및 특성을 해석한다.

EMTDC와 PSCAD는 일종의 소프트웨어 패키지로서 매우 유연한 전력계통 전자기과도현상 모의 해석도구를 제공한다. EMTDC는 실제로 사용자가 정의한 전력계통에 대한 전자기과도 해석을 수행하며, PSCAD는 다양한 소프트웨어 모듈을 함유하여 EMTDC에 그래픽한 인터페이스를 제공하는 역할을 한다. 이 프로그램에서는 사

용자가 정의한 모델 또는 프로그램에서 지원하는 기능으로 전기회로 또는 제어시스템을 구성하여, 외란 및 파라미터 변동에 대한 모델의 운전특성을 시험하고 응답의 안정성을 검토하기 용이하며, 전력계통의 과도현상 및 정상상태 해석에 대한 광범위한 연구 분야를 다룰 수 있다<sup>[5]</sup>.

## 2. 계통연계형 풍력발전시스템

Fig. 1은 본 연구에서 고려하는 계통연계형 풍력발전시스템의 전체 구성을 나타낸다. 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 직류단의 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 변환되어 구내 수용가 부하를 담당하며 잉여 출력은 연계된 전력계통에 공급된다.

### 2-1. 풍력터빈

풍속에 대한 풍력터빈 출력은 풍속, 시스템의 출력계수에 좌우되며 이는 식 (1)과 같이 주어진다<sup>[6]</sup>.

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

여기서,  $P_M$ 는 풍속에 의한 풍력터빈을 통해 풍력발전기에 전달되는 출력,  $\rho$ 는 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $R$ 은 블레이드 반지름[m],  $V$ 는 풍속[m/s] 그리고  $C_p$ 는 운전점에서의 블레이드의 효율을 나타내는 출력계수이다. 따라서 특정 풍속에서의 풍력터빈 출력은 출력계수에 전적으로 의존한다. 출력계수는 일반적으로 풍력발전기의 출력능성시험에 의해 얻은 실측 데이터를 수식화하여 얻

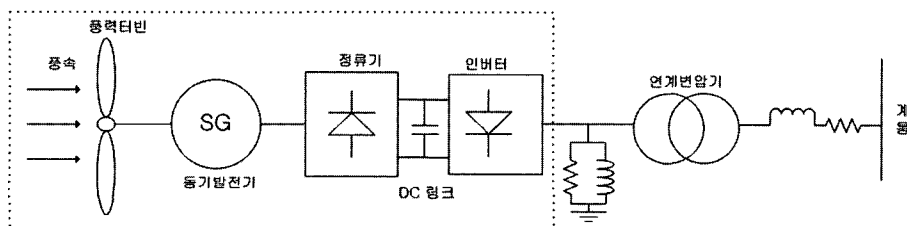


Fig. 1. Grid connection of wind turbine.

는 것으로 여기서는 식 (2)와 같은 출력계수식을 사용하였다<sup>17)</sup>.

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

여기서  $\beta$ 는 블레이드 피치각이며, 본 풍력발전은 고정 피치각을 가지므로 피치각  $\beta$ 는 0°이다.  $\lambda$ 는 Tip Speed Ratio로서 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

$\omega$ 는 풍력터빈의 회전각속도[rad/s]이다.

**2-2. 풍력발전기**

풍력발전기로 이용되는 동기발전기의 모델과 인버터의 DC link 전압을 적절한 수준으로 하기위한 여자기의 모델은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 IEEE 모델을 사용하였으며<sup>18)</sup>, 모델링에 사용된 풍력발전기는 정격용량 1 MW의 84극 동기발전기이고 정격속도는 분당 회전수 26.82로서, 식 (3)을 적용하여 정격주파수를 구하면 18.77 [Hz]이다.

$$f[\text{Hz}] = \frac{P n[\text{rpm}]}{2 \cdot 60} \quad (4)$$

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

**2-3. AC-DC-AC**

DC 단에서 전력을 받아 전력망에 공급하는 방식의 적용 사례에 대하여 다양한 종류의 인버터가 거론되어 왔

다. 기존의 선전류(線電流) SCR 사이리스터 컨버터의 경우 개발이 잘되어 있고 비용이 적게 드는 반면에 무효 전력을 소모하고 고조파 전류를 발생하는 단점이 있다. 이는 현재의 기준에 비추어 합당하지 않으므로 선전류(線電流) 피드백 제어를 갖는 펄스폭변조방식(PWM)의 전압원인버터를 바탕으로 한 정교한 방식의 보상이 필요하다<sup>19)</sup>.

여기서는 SCR 사이리스터 대신 온오프 제어가 가능한 IGBT 스위치를 사용하여 교류측의 전압이나 전류의 크기와 주파수를 임의로 제어할 수 있으며, 평형 3상의 제어 출력전압을 얻으려는 경우 가장 널리 이용되는 정현파펄스폭변조방식(SPWM)의 3상 전압원인버터<sup>19)</sup>를 사용한다. 6개의 다이오드를 사용한 수동 3상 정류기를 구성하고, 인버터는 6개의 IGBT 소자로 구성하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 3상 다이오우드 정류기와 6 펄스 3상 전압원인버터를 나타낸다.

**2-4. 필터, 부하 및 전력계통**

전압원인버터는 교류계통 측면에서 보면 전압 고조파 원이므로 출력전압의 종합 고조파 왜형률(THD : Total Harmonic Distortion) 사양을 만족시키기 위하여 인버터 출력과 부하 사이에 2차 LC 필터를 두어 고조파를 제거한다.

풍력발전시스템 출력단의 부하는 저항과 인덕턴스 성분으로 구성하며, 부하저항  $R_{LOAD}$ 와 부하 인덕턴스  $L_{LOAD}$ 의 값은 식 (5)로부터 얻는다.

$$P_{LOAD} + jQ_{LOAD} = \frac{|V_{LINE}|^2}{R_{LOAD}} + j \frac{|V_{LINE}|^2}{\omega L_{LOAD}} \quad (5)$$

단,  $P_{LOAD}$ ,  $Q_{LOAD}$ 는 유효전력 및 무효전력 부하,  $V_{LINE}$ 은 부하단의 선간전압,  $\omega$ 는 계통의 각주파수이다.

전력계통의 용량이 접속되는 풍력발전시스템의 용량

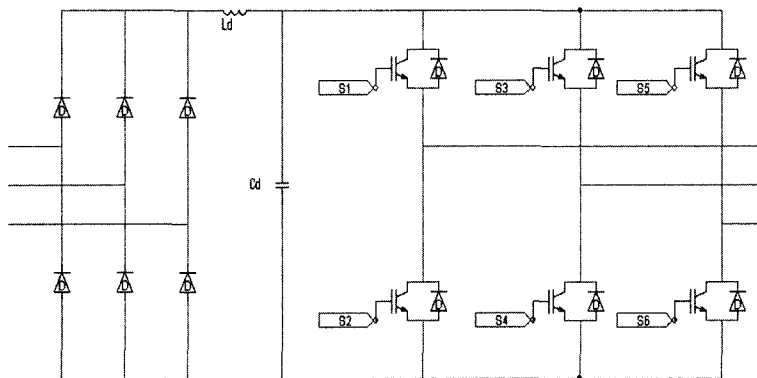


Fig. 2. Rectifier and 6 pulse voltage source inverter.

을 무시할 수 있을 만큼 크다고 가정하여 풍력발전 측에서 바라본 계통 측의 전압의 크기와 위상각이 일정한 무한모션으로 계통을 표현한다.

### 3. AC-DC-AC 제어 전략

Fig. 1에서와 같이 풍력발전기는 정류기와 전압원인버터로 구성된 AC-DC-AC 변환부에 의해 전력망에 연계된다. AC-DC-AC 변환부에서는 풍속의 가변성에 의해 일정하지 못한 동기발전기의 출력을 정류기를 거쳐 직류로 변환하고 다시 인버터를 통해 일정 전압 및 일정 주파수를 가지며, 풍속입력 및 출력단 전압 크기에 대하여 적정한 크기를 갖는 교류출력으로 변환한다. 본 장에서는 풍력발전 출력제어를 위한 인버터 제어전략, 인버터의 전류제어에 대하여 언급한다.

#### 3-1. 인버터 제어 전략

풍력발전시스템의 계통연계 시 출력제어를 위하여 전압원인버터는 다음과 같은 제어전략을 가진다.

① 유효전력 제어 - 어떤 풍속에 대하여 최대의 유효 전력 출력을 이끌어 내도록 한다. 인버터는 로터의 회전속도를 감지하여 적절한 기준 유효전력 출력을 정한다. 적절하게 설계된 풍력발전시스템의 운전 전략은 풍력발전기의 부하를 담당하여 로터가 연속적으로 최대출력을 낼 수 있는 점에 가장 가까운 속도로 회전되게 하는 것이다. 최대 출력점은 풍속에 따라서 변하기 때문에 로터의 회전속도도 풍속에 따라 조정되어 로터가 연속적으로 최대 출력점에서 동작하여야 한다.

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

#### 3-2. 인버터 제어전략 수행을 위한 전류제어

전압원 인버터의 전류제어를 통하여 앞 절에서 제시된 출력제어전략을 실현 할 수 있다. 널리 쓰이는 전류 제어 방식으로는 히스테리시스형 전류제어와 SPWM 전류제어가 있다. 두 종류 모두 매 순간 실제전류가 기준

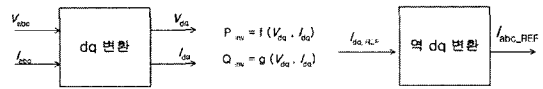


Fig. 3. Specification of Reference current based on DQ and inverse DQ transformation.

전류를 추종하도록 되어 있으나, 히스테리시스형의 경우, 스위칭 주파수가 고정되지 않고 전류의 증감에 따라 변하는 반면에 SPWM형은 스위칭 주파수가 삼각반송파의 주파수에 의해 결정되므로 고정된 주파수를 갖는 이점이 있다<sup>[10]</sup>.

본 연구에서는 SPWM 전류제어 방식을 적용한다. 이 방식을 위해서는 원하는 유효 및 무효전력 출력을 낼 수 있는 기준전류가 지정되어야 하며, 기준전류는 기준 크기와 기준 위상각으로 구성된다. 따라서 기준 크기와 기준 위상각을 계산되면 매 순간 원하는 출력제어를 위한 기준전류가 결정된다. 그러나 유효/무효전력 제어를 위한 유효/무효전력의 설정값으로부터 직접 필요한 기준전류의 크기와 위상각을 계산하는 것은 복잡하고 적용하기 곤란한 점이 있으므로 Fig. 3에서와 같이 일단 abc 상의 전압 및 전류를 dq 변환<sup>[11]</sup>을 이용하여 dq축의 전압과 전류로 변환하고 원하는 출력제어를 위한 dq축에서의 기준전류를 구한 후, 이를 다시 역 dq 변환하여 abc 상의 기준전류로 나타낸다.

3상 평형시스템에서 인버터의 순시 유효전력 P와 순시 무효전력 Q를 dq 평면에서 나타내면 다음 식 (6)과 같다.

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

여기서,  $V_d$ 와  $V_q$ 는 인버터 출력의 순시 교류전압  $V_a$ 와  $V_b$ ,  $V_c$ 를 dq 변환한 값이고,  $I_d$ 와  $I_q$ 는 순시 교류전류  $I_a$ 와  $I_b$ ,  $I_c$ 를 변환한 값이다.

$V_q$ 는 인버터출력의 순시전압 크기와 동일하고  $V_d$ 는 0 이므로 식 (6)으로부터 다음 식 (7)과 (8)을 얻을 수 있다.

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

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

단,  $V_d$ 는 인버터 출력단 전압의 크기이다. 인버터의 출력단은 선로 임피던스를 통해 계통으로 연결되어 있고, 계통은 전압의 크기가 일정하다고 간주할 만큼 대용량이며, 부하와 인버터 출력전류의 크기의 변화에 의한  $V_d$ 의 변화는  $I_d$ 와  $I_q$ 의 변화에 비하면 아주 작으므로 P와 Q는  $I_d$ 와  $I_q$ 에 의해 결정된다고 할 수 있다. 따라서,  $I_q$

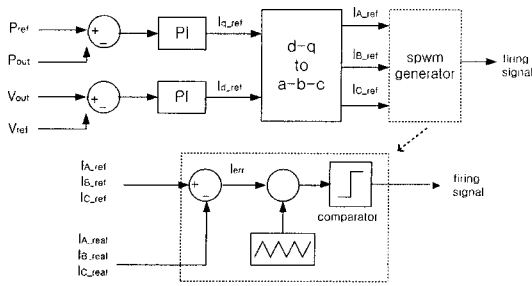


Fig. 4. Switching control for the current controlled voltage source inverter.

와  $I_d$ 를 직접 조정하여 인버터에서 계통으로 주입되는 유효/무효전력을 쉽게 제어할 수 있으며 이러한 관계를 나타내면 식 (9)와 같다.

$$P \propto I_q, Q \propto -I_d \tag{9}$$

Fig. 4는 계통연계형 풍력발전의 출력제어를 위한 전류제어 전압원인버터의 스위칭 제어 개념도이다. 오차신호  $I_{err}$ 를 이용하여 기준전류를 추종하도록 하기 위하여 페루프와 PI 제어를 사용한다. 인버터의 유효전력출력  $P_{out}$ 와 유효전력 설정치  $P_{ref}$ 의 오차신호에 적절한 게인을 갖는 PI 제어를 이용하여 q축 전류의 기준값  $I_{q,ref}$ 를 설정하고, 마찬가지로 인버터의 순시전압  $V_{out}$ 와 전압 설정치  $V_{ref}$ 의 오차신호로부터 d축 전류의 기준값  $I_{d,ref}$ 를 설정한다. q축 전류의 기준값 변화에 의해 인버터에서 공급되는 유효전력 출력이 조절되고 d축 전류의 기준값의 변화에 의해 인버터는 부하단의 전압의 크기가 설정치  $V_{ref}$ 로 유지되도록 무효전력을 공급하거나 소모하게 된다. 이렇게 결정된 q축과 d축의 기준값은 역 dq 변환에 의해 원래 abc 평면에서의 각 a, b, c 상에 대한 기준전류로 변환된다. SPWM 스위칭 기법을 기반으로 설정된 기준전류와 실제전류와의 오차신호  $I_{err}$ 를 지정된 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 IGBT에 스위칭 신호를 전달하게 된다.

3-3. 유효/무효전력의 기준값 지정

앞에서 제시된 전류제어를 위한 기준전류를 정하기 위해서는 유효전력의 기준값  $P_{ref}$ 와 부하단 전압크기의 기준값  $V_{ref}$ 를 결정해야 한다. 풍력발전시스템은 계통전압과 동일한 수준의 전압을 계통에 공급해야 하므로  $V_{ref}$ 는 교류계통전압의 크기와 동일해야 한다.  $P_{ref}$ 는 주어진 풍속으로부터 이용가능한 에너지를 최대한 끌어내도록 지정되어야 한다.

풍력으로부터 얻을 수 있는 최대 출력은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[2]</sup>.

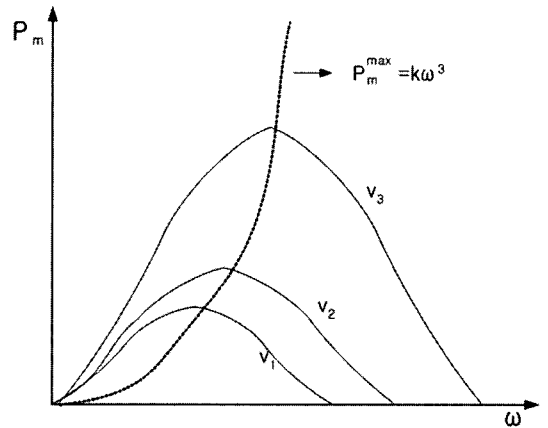


Fig. 5. Maximum output of wind turbine at given speeds.

$$P_m^{max} = 0.5\pi R^5 \frac{C_p^{max}}{\lambda_{opt}^3} \omega_r^3 = K\omega_r^3 \tag{10}$$

- 단, K는 특정 풍력시스템에 따라 결정되는 상수
- $\rho$ 는 공기밀도
- R은 블레이드의 반지름
- $C_p^{max}$ 는 최대출력계수
- $\lambda_{opt}$ 는  $C_p$ 가 최대가 되도록 하는  $\lambda$
- $\omega_r$ 은 로터의 회전 각속도

식 (10)을 이용하여 특정 풍속에서의 풍력터빈의 최대 출력을 나타내면 Fig. 5와 같다. 따라서 가변 풍속에 대하여 풍력터빈이 최대 출력을 낼 수 있도록 인버터의 유효전력 출력 기준값  $P_{ref}$ 는  $P_m^{max}$ 에 손실계수  $\eta$ 를 곱한  $\eta P_m^{max}$ 로 둔다.  $\eta$ 는 풍력터빈 말단에서 AC-DC-AC 변환부 출력단까지의 손실을 고려한 손실계수이어야 한다.

3-4. PSCAD/EMTDC에서의 풍력발전 출력제어 적용

3-1, 2, 3절에서 기술된 출력제어전략을 바탕으로 계통연계형 풍력발전시스템의 출력제어를 PSCAD/EMTDC 프로그램에서 구현 시 전체 제어 단계는 다음과 같다.

- 단계 1. 시스템 각 노드의 상태변수를 계산한다.
- 단계 2. 앞 3-3절에서 기술된 방식으로 최대 유효전력 출력 및 출력단 전압의 기준값을 지정한다.
- 단계 3. 상태변수 또는 상태변수로부터 계산된 값을 단계 2에서 지정된 기준값과 비교한다.
- 단계 4. PI 제어를 통하여 전류제어를 위한 d, q 축의 기준전류를 발생한다.
- 단계 5. d, q 축의 기준전류를 역 dq 변환을 이용하

여 a, b, c 상의 기준전류로 변환한다.

단계 6. 기준전류와 삼각파와 비교를 통한 SPWM에 의해 인버터의 스위치소자에 스위칭 신호를 전달하고 다시 단계 1로 이동한다.

설정된 모의 시간 동안 각 시간스텝(time step)에 대하여 위의 단계를 반복한다.

#### 4. 모의 결과

본 논문에서 제시한 풍력발전의 계통연계 시 출력제어 전략을 PSCAD/EMTDC에서 모델링하고 그 유용성을 검증하기 위하여 세 가지의 사례에 대하여 모의를 실시하였다. 모의 시스템 구성은 Fig. 1과 동일하다. 세 가

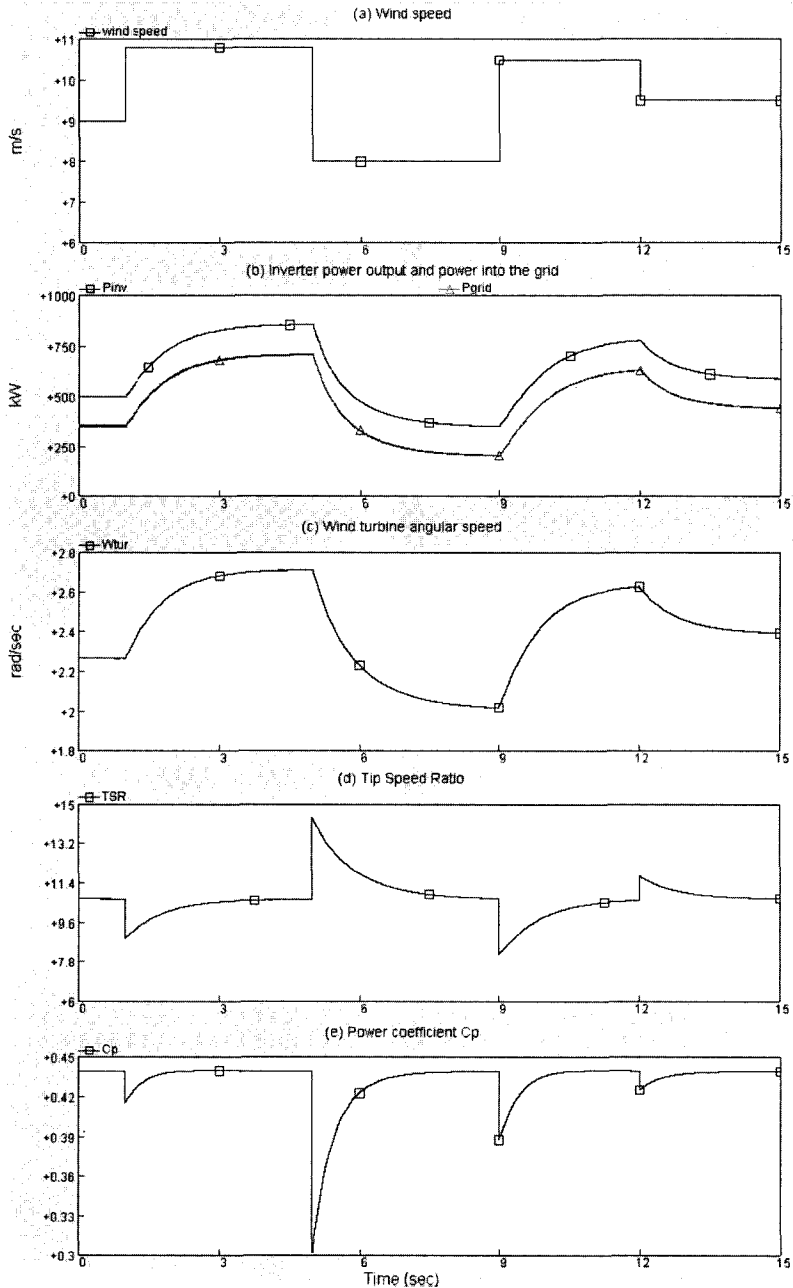


Fig. 6. Results of Case 1.

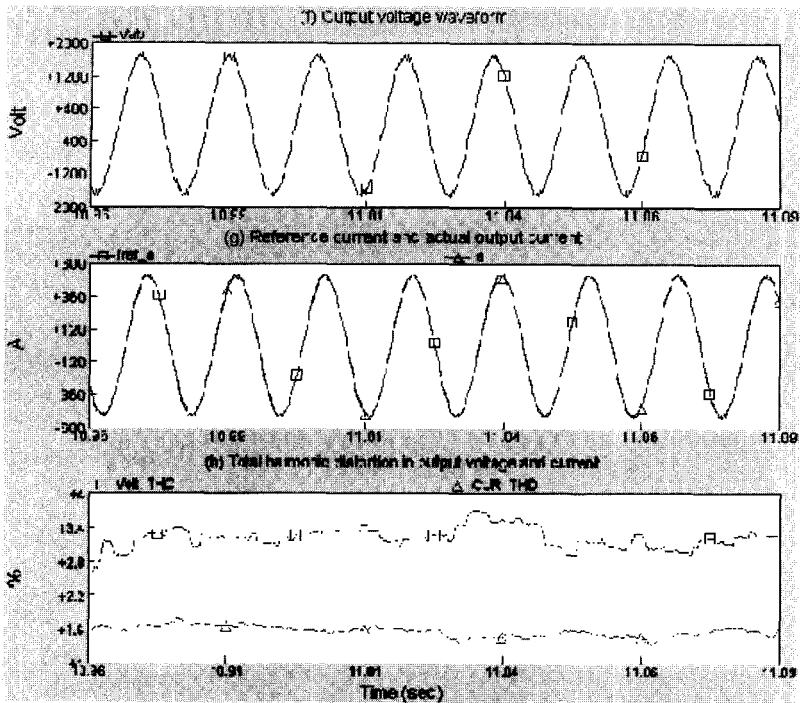


Fig. 6. Continued.

지 사례의 개요는 다음과 같다.

- 풍속변동에 대한 시스템의 응답
- 무효전력부하 증가에 대한 무효전력제어
- 출력단 부하 증가 및 풍속변동에 대한 시스템과 계통간의 전력교환

4-1. 사례연구 1

사례연구 1에서는 가변풍속에 대하여 인버터가 적절한 출력특성을 갖는지를 평가하고 동시에 풍력터빈의 회전수 및 출력계수 Cp의 값의 변화를 분석하여 최대 출력제어가 수행되는지를 검토한다. 모의된 풍력발전시스템의 시스템용량은 1MVA 인버터 출력단에 145kW의 유효전력부하와 63kVAR의 무효전력부하가 접속되어 있다.

Fig. 6(a)-(h)는 사례연구 1에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 6에서는 (a)의 풍속변동에 대하여 Fig. 6(b) 인버터의 유효전력 출력  $P_{inv}$ 와 계통으로 유입되는 출력  $P_{grid}$ , Fig. 6(c)에서는 풍력터빈의 각 회전속도, Fig. 6(d) tip speed ratio, Fig. 6(e) 풍력발전의 출력계수를 각각 보여 준다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 블레이드로 유입되는 풍속의 변동에 대하여 인버터 유효전력 출력 곡선이 최대 출력점으로 수렴해가고 있으며, 인버터 출력에서 출력단 부하에 공급하고 남은 잉여 출력을 연계된 전력계통으

로 공급하고 있다. 부하의 변동이 없으므로  $P_{inv}$  곡선과  $P_{grid}$  곡선은 각 시간대에 대하여 동일한 크기차이를 가지며 동일한 패턴을 그리고 있다. 풍속이 증가함에 따라 풍력터빈의 회전속도는 같은 축에 물려있는 풍력터빈과 발전기의 회전관성에 의해 서서히 증가하고, 이에 의해 tip speed ratio도 식 (3)에 맞게 변하여 식 (10)의  $\lambda_{opt}$ 에 이르러 결국 출력계수가 결국 최대값인 0.44가 되어 해당 풍속에 대하여 최대 출력제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(f)는 인버터 출력단 선간전압의 출력파형을 나타내며, Fig. 6(g)에서는 인버터의 a상 실제 출력전류  $I_a$ 가 출력제어를 위한 a상의 기준전류  $I_{ref,a}$ 를 잘 추종하여 원활한 전류제어가 이루어지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 6(h)에서 인버터의 출력전압과 출력전류는 약 3.5%와 1.6%의 고조파 종합왜형률을 가지며 이는 계통연계 시 허용할만한 수준(약 5% 이내)으로 고려된다.

Table 1. Scenario for case 2.

변동 시간	변동 전	변동 후
t=2 [sec]	출력단 부하 P=145 [kW] Q=63 [kVar]	126 [kVar] 추가
	풍속 일정 9 [m/sec]	

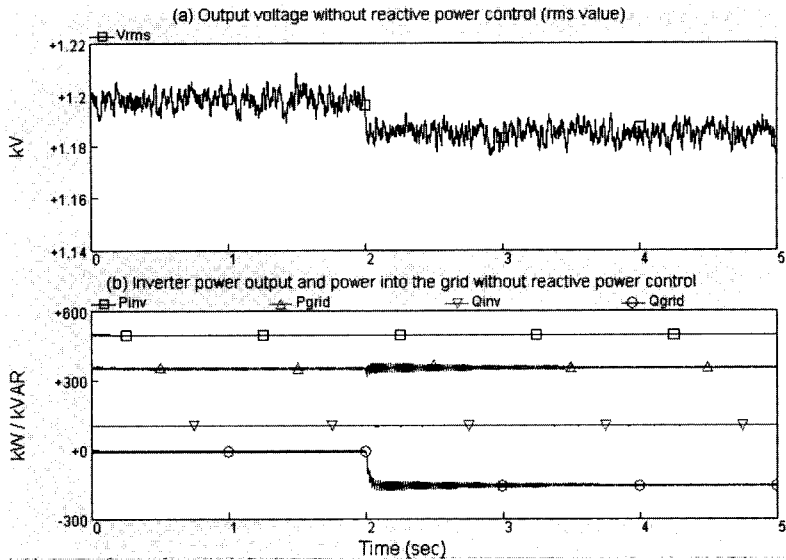


Fig. 7. Results of Case 2 without reactive power control.

4-2. 사례연구 2

본 절에서는 무효전력제어를 통해 인버터 출력단의 출력전압이 일정하게 유지되는가를 확인한다. 이를 위해 Table 1의 시나리오가 적용된다.

Fig. 7은 인버터의 무효전력제어가 이루어지고 있지 않는 상태에서 시나리오가 적용되었을 때의 결과를 보여 준다. Fig. 7(a)에서 출력선간전압은 무효전력이 증가되는 2초 순간에 하락하며, Fig. 7(b)에서 무효전력 부하

가 증가하기 전에는 인버터의 무효전력 출력  $Q_{grid}$ 가 출력단 부하를 담당하고 있으며, 계통으로 유입되는 무효전력  $Q_{grid}$ 는 0인 상태이다. 출력단 무효전력부하가 증가하는 순간에 인버터는 무효전력 출력제어가 되고 있지 않으므로 인버터 출력  $Q_{inv}$ 의 변동이 없고  $Q_{grid}$ 가 음의 값을 가지는데, 이는 인버터 출력단에서 증가한 무효전력 부하만큼 계통에서 공급받고 있는 것을 의미한다.  $P_{inv}$ 와  $P_{grid}$ 는 인버터의 유효전력 출력과 계통으로 유입되는

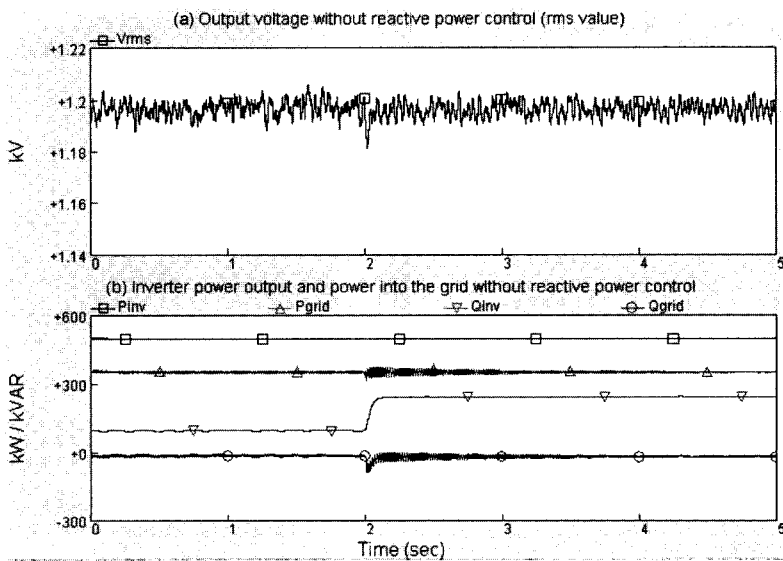


Fig. 8. Results of case 2 with reactive power control.



Table 2. Scenario for case 3.

변동 시각	변동 전	변동 후
t=1 [sec]	출력단 부하 P=290 [kW] Q=126 [kVar]	360 [kW] 추가
t=3 [sec]	풍속 9 [m/sec]	풍속 10.5 [m/sec]

유효전력이다.

Fig. 8은 무효전력 제어가 이루어질 때 적용된 결과에 대한 것으로서, Fig. 8(a)에서 보듯이 출력단 전압의 크기가 일정하게 유지된다. Fig. 8(b)에서는 Fig. 7(b)의 경우와 달리 출력단의 무효전력 부하가 증가하는 순간에 계통으로 유입되는 무효전력을 끌어오려고 하나, 곧 인버터의 무효전력 출력제어에 의해 증가된 부하를 인버터( $Q_{inv}$ )에서 추가로 공급하고  $Q_{grid}$ 는 0을 유지하게 된다.  $P_{inv}$ 와  $P_{grid}$ 는 인버터의 유효전력 출력과 계통으로 유입되는 유효전력이다.

4.3. 사례연구 3

본 절의 사례연구에서는 풍력발전시스템 구내 부하의 갑작스런 유효전력 부하 변동과 풍속변동에 따른 풍력발전과 계통간의 전력교환 특성을 검토한다.

Table 2의 출력단 부하 및 풍속 변동 시나리오가 적

용된다.

Fig. 9(a)는 풍속입력의 변화를 나타내고 Fig. 9(b)는 인버터의 유효전력 출력  $P_{inv}$ 와 계통으로 유입되는 출력  $P_{grid}$ 를 보여준다. 1초 순간에 풍력발전시스템 출력단의 유효출력부하가 증가하더라도 풍속입력의 변화가 없으므로 인버터 출력  $P_{inv}$ 의 변화는 없다. 인버터의 유효전력 제어는 풍속의 입력에 대한 출력제어임에 유의한다. 증가된 부하가 현재 풍력발전의 출력을 초과하므로 부족한 전력이 계통으로부터 공급되고 있다. 3초 순간에 풍속이 증가함에 따라 인버터의 출력이 증가되고 다시 부하에 공급하고 남은 잉여 전력을 계통으로 공급한다.

5. 결 론

계통연계형 풍력발전시스템의 전압원인버터를 이용한 출력제어전략을 제시하고 이를 전력계통 및 설비의 전자기 과도현상 해석 도구인 PSCAD/EMTDC에서 구현하여 해당 풍력발전시스템의 제어전략에 따른 출력특성을 해석하였다.

풍력발전의 계통연계 시 출력제어에 있어서 수시로 입력하는 풍속에서 최대 에너지를 끌어내어 이를 접속된 전력계통에 심각한 영향을 미치지 않도록 적절한 품질을 갖는 전력으로 변환하여 계통에 공급할 수 있도록 하

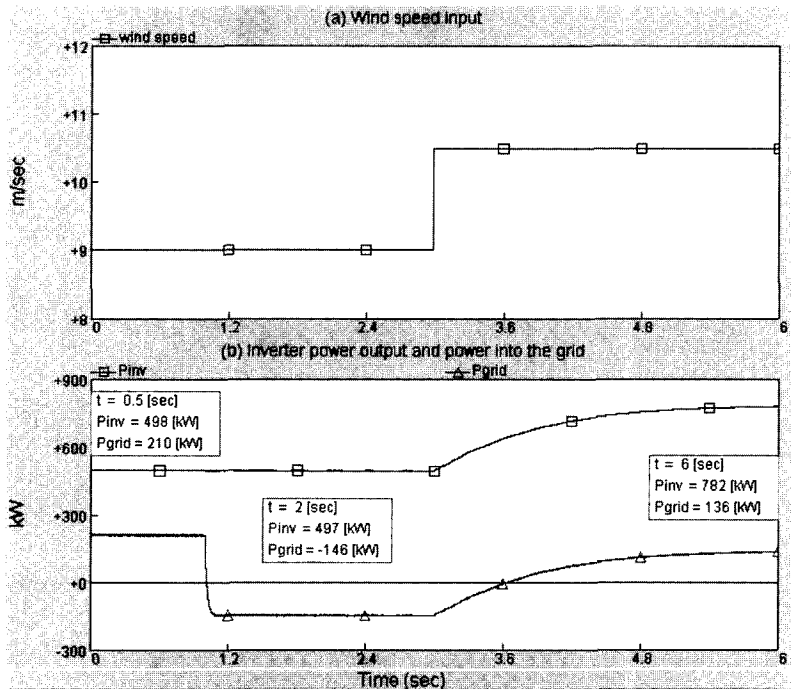


Fig. 9. Results of case 3.

는 것이 필수적이다. 이를 위해 최대 출력제어와 풍속 및 부하변동에 대하여 출력전압을 유지하게 하기 위한 무효전력 제어 방식을 취하였고, 유효 및 무효전력 제어를 위해 전압원인버터의 전류제어 전략을 적용하였다. 고조파 저감과 일정 주파수 유지를 위한 SPWM 스위칭 방식을 사용하였다. 풍력발전시스템의 각 구성요소에 대한 모델과 제시한 제어전략을 바탕으로 전체 시스템 회로와 제어부를 구성하여 모의하였다. 풍속 및 부하 변동에 대한 출력 및 전압 제어와 풍력발전시스템의 응답 특성을 사례연구를 통해 분석하였다.

사용되는 터빈 및 발전기, 계통연계 여부에 따라 다양한 형태의 풍력발전시스템이 있으며, 각각의 패턴에 따른 모델링 및 모의가 더욱더 진행되어 풍력발전의 실제 적용에 앞서 사전 연구 및 해석을 위한 도구가 확보되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. Dennis Elliot: Assessing the World's Wind Resources, IEEE Power Engineering Review, pp. 4-9, September (2002).
2. Chen, Z. and Spooner, E.: Grid Power Quality With Variable Speed Wind Turbines, IEEE Trans. on Energy Conversion, 16(2), 148-154 (2001).
3. Chen, Z. and Spooner, E.: GRID INTERFACE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, IPEMC '97 Hangzhou, China, 256-261 (1997).
4. Manitoba HVDC Research Center Inc.: Introduction to PSCAD/EMTDC V3 (2001).
5. Rajendiran, Kannan, Keerthipala, W.W.L. and Nayar, C.V.: PSCAD/EMTDC BASED SIMULATION OF A WIND-DIESEL CONVERSION SCHEME, Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1, 505-510 (2000).
6. Mukund R. Patel: Wind and Solar Power Systems, pp. 81-82. CRC Press, USA (1999).
7. Murdoch, A., Barton, R.S., Winkelman, J.R. and Javid, S.H.: Control Design and Performance Analysis of a 6 MW wind Turbine Generator, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(5), 1340-1347 (1983).
8. IEEE Committee Report: Computer representation of excitation system, IEEE Trans. PAS 87, no. 6 (1968).
9. 노의철, 정규범, 최남섭: 전력전자공학, pp. 314-315, 문운당 (1997).
10. Joseph Vithayathil: Power Electronics : Principle and Applications, McGraw-Hill, Inc (1997).
11. Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bundy: Power System Dynamics and Stability, pp. 323-330. John Wiley & Sons, Great Britain (1997).
12. Neris, A.S., Vovos, N.A. and Giannakopoulos, G.B.: A Variable Speed Wind Energy Conversion Scheme for Connection to Weak AC System. IEEE Trans. on Energy Conversion, 14(1), 122-127 (1999).