

## 유·무효 전력 제어를 통한 풍력발전단지의 효율적인 운전

장성일·김지원\*·김광호  
강원대학교 전기전자정보통신공학부

## A Study on Active and Reactive Power Control for Efficient Operations of Wind Farm

Sung-Il Jang · Ji-Won Kim\* · Kwang-Ho Kim

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Kangwon National University

**Abstract** - Wind farm which are composed with wind turbine generators can be a good alternatives to solve environmental problem and solutions to cope with energy crisis for using wind energy. Until now, these wind turbine generators have been being studied on the viewpoint of only active power control for reducing the burden of main grid. In this control scheme, we might demand a reactive power compensator in order to make reparation for the reactive power produced from wind turbine generator itself. Therefore, if the reactive power as well as active power of wind turbine generator were controlled according to the demand of reactive power, the installation of a additional reactive power compensator could be reduced. This paper presents the control method of a active and reactive power for wind turbine generators by means of SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) inverting method and describes a operational coordination of wind turbine generators. The proposed power control algorithm can simply produce the output power of wind turbine generator needed in wind farm, which can reduce the power of main grid more and exclude a supplementary reactive power compensator. We assumed that wind farm are composed with two kinds of wind turbine generators, AC/DC/AC and induction generator types.

## 1. 서 론

우리나라의 전력산업 구조개편으로 새로운 발전사업자들이 나타나고 있으며, 새로운 발전사업자들은 환경 문제가 심각해짐에 따라 대규모 발전설비에 대한 투자보다는 대체에너지 형태의 소규모 분산전원에 더 큰 관심을 보이고 있다. 특히, 친환경적이며 무한정의 바람에너지를 이용하는 풍력발전기들에 대한 연구와 건설이 급속도로 진행되고 있다. 풍력발전기들이 배전계통에 연계되었을 경우에는 계통의 안정성 및 효율성의 증대를 위하여, 유틸리티에서 단방향으로 전력을 부하에 공급하는 기존의 계통운전 전략들은 상당부분 변화될 것으로 예상된다.[1]

일반적으로 풍력발전기는 출력특성에 따라 많은 무효전력을 필요로 하는데, 이를 보상하기 위하여 풍력발전기 전단에 커패시터 뱅크를 연결하여 조정한다. 만약 풍력발전기에서 발생하는 무효전력이 일정 범위를 벗어나면 단계적으로 커패시터 뱅크를 투입 혹은 절체하여 무효전력의 증가로 인한 연계 배전계통의 전압강하 등의 영향을 최소화시키고 있다.[2] 그러나 이러한 큰 용량의 커패시터 뱅크 동작은 계통에 과도현상을 일으킬 수 있으며 무효전력의 정확한 제어가 곤란하다. 또한 무효전력 보상기의 설치비용도 적지 않다. 이에 새롭게 등장하는 풍력 발전사업자들이 단지 큰 유효전력을 생산하여 계통에 공급하는 기존 발전 운전전략을 유지한다면 풍력발전기 자체에서 발생하는 무효전력을 보상하기 위하여 추가적인 무효전력 보상기들이 필요하게 될 것이다. 따

라서 미래의 풍력발전기들은 주 전원의 부담을 줄이고, 타 풍력발전기에 의해 발생하는 무효전력을 보상할 수 있는 능력이 요구되어진다. 이를 위하여 풍력발전기의 출력특성은 타 풍력발전기와 계통 조건에 맞도록 제어되는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 풍력발전기의 유·무효전력을 조절하여, 추가적인 무효전력 보상기의 설치와 운전 부담을 줄일 수 있는 효율적인 풍력발전단지 운전기법에 대하여 기술하였다. 먼저, 풍력발전기를 유도형과 인버터 형태의 풍력발전기로 각각 모델링하였다. 인버터 형태의 풍력발전기의 출력전압과 위상제어를 통하여 유도형 풍력발전기에서 소비되는 무효전력을 공급할 수 있도록 유·무효전력을 제어한다. 여기서 이용된 유·무효전력 제어기법으로는 전압이용률이 타 인버팅 기법에 비하여 크고 고조파 발생이 적은 SVPWM을 이용하였다. 유도형 풍력발전기에서 필요한 무효전력을 인버터 형태의 풍력발전기에서 효과적으로 공급할 수 있었으며, 불필요한 커패시터의 용량과 동작을 줄일 수 있어 계통에서 발생할 수 있는 과도현상과 비용을 현저히 감소시킬 수 있음을 모의를 통하여 확인하였다.

## 2. SVPWM의 설계

현재 전력전자 소자를 이용하여 직류전원으로부터 교류 전원을 생성하는 인버팅 기법으로는 PWM(Pulse Width Modulation)이 가장 일반적으로 이용되고 있다. PWM 기법 중 전압 이용률이 크고, 적은 고조파 특성 등의 많은 장점을 지닌 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)이 가장 우수한 기법으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 인버터 형태의 풍력발전기와 유·무효전력제어기의 설계에 있어서 SVPWM기법을 이용하였다. [3]

## 2.1 SVPWM의 동작 원리

3상 전압원 인버터에서 각상의 스위치를 동작시키면 인버터는 이들 스위칭 상태에 따라 그림 1과 같은 6가지의 전압 벡터를 출력할 수 있다. 여기서 스위치의 1과 0은 각각 turn-on 과 turn-off 된 것을 의미하며, 각상이 모두 1이거나 0이면 출력전압이 0인 것을 의미한다. 인버터의 8가지 동작모드에서의 출력전압을 벡터도로 나타내면 그림 1의 정육면체를 이루고 있다. 따라서 계통의 3상전압  $V_a, V_b, V_c$ 를 얻은 후, 고정좌변 d-q 변환식 (1)을 이용하여 2개의 독립변수인 직축과 횡축의 전압  $V_d-V_q$ 로 변환되고,  $V_d-V_q$ 로 이루어진 기준벡터는 정육면체의 내부의 한 지점으로 표시될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

6각형 내부의 임의의 출력전압 벡터는 인접한 두 개의 전압벡터와 0벡터를 적절히 조합해서 원하는 기준전압을

합성할 수 있다. 그림 2는 기준 벡터전압  $V_1$ 를 만들어 내기 위하여 인접한 벡터의 도통시간을 설명해주는 그림으로서 샘플링 주기  $T_s$ 를 기준으로  $T_1$  동안  $V_1$ 을 도통시키고 이후  $T_2$  동안  $V_2$ 를 도통시킨다.  $T_1$ 과  $T_2$ 시간외에는 영 벡터를 인가하면 된다.[4]

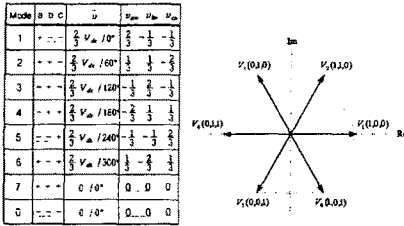


그림 1 전압 공간벡터의 스위칭 방법

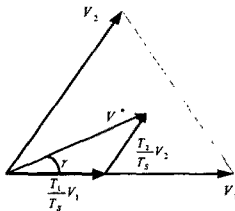


그림 2 스위칭 시간 결정

### 2.2 EMTDC를 이용한 SVPWM 기법의 모델링

그림 3은 전력계통 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 SVPWM를 구현한 모듈이다. 먼저 계통 전압을 얻은 후 기준 벡터를 생성하고 기준 벡터를 얻기 위한 인버터 스위칭 시간  $T_{a1}$ ,  $T_{b1}$ ,  $T_{c1}$ 을 출력한다. 여기서  $T_{a1}$ ,  $T_{b1}$ ,  $T_{c1}$ 은 인버터의 gating 신호의 스위칭 시간으로 이용된다. 본 연구에서는 인버터 형태의 풍력발전기의 유·무효전력을 제어하기 위하여 위상과 전압을 조절할 수 있도록 모델링하였다.

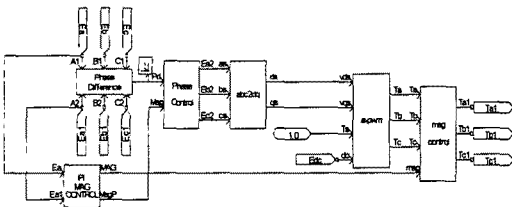


그림 3 SVPWM Module의 구조

## 3. 풍력발전기의 연계 계통 모델링

풍력발전기는 일반적으로 동기기를 이용한 풍력발전기와 유도기를 이용한 풍력발전기 등의 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 동기발전기의 경우 일정 주파수와 크기를 갖는 전력을 생산하기 위하여 풍황 변동에 따라 섬세한 제어가 필요하다. 반면 유도발전기는 슬립을 가지고 있어 일정영역의 회전기 속도에서 안정된 전력을 생산할 수 있다.

### 3.1 인버터 형태의 풍력발전기의 모델링

동기발전기의 경우 일정전압을 유지하기 위하여 기계역학적인 제어는 물론 전기적인 제어도 이용되고 있다. 그러나 최근 전력전자의 발달로 인하여 풍력발전기에서 만들어지는 교류전압을 컨버터를 이용하여 직류전압으로 바꾸고 이를 인버터를 이용하여 계통 전압과 유사하도록

직류전압을 다시 일정 주파수와 크기를 갖는 교류 전압으로 변환시켜 계통으로 전력을 공급하는 인버터형 풍력발전기로 바뀌어져 가고 있다. 그림 4는 본 연구에서 모델링 된 풍력발전기 시스템의 회로도이다. 풍력발전기는 용량이 650 [kVA]의 중형 발전기로 가정하였다.

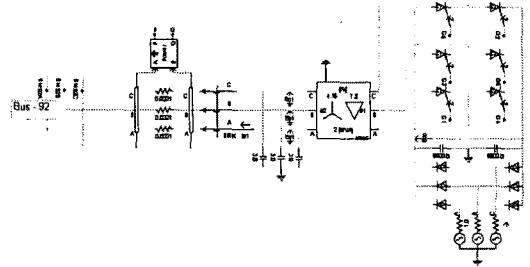


그림 4 AC/DC/AC 풍력발전기

### 3.2 농형 풍력 유도 발전기 모델링

PSCAD/EMTDC에서는 동기기 형태의 풍력발전기는 물론 유도 발전기 등 다양한 형태의 발전기를 제시하고 있다. EMTDC에서 제공하는 농형 유도 발전기[5]를 이용하여 풍력발전단지의 다양한 모의를 수행하였으며, 유도 발전기 모듈은 그림 5와 같다. 그림에서 A, B, C는 계통에 연결되는 3상 전원을 의미하며 좌측 W, S, T는 발전기의 출력을 조절하는 외부 제어 단자를 표현한다. W는 풍력 유도발전기의 회전속도를, S는 발전기 출력특성 제어 변수를, 그리고 T는 음의 값으로 유도발전기의 외부의 기계적 입력이 된다. 농형의 경우 내부 용량이 주어지면 일반적인 내부파라미터를 생성하므로 750 [kVA]의 전형적인 중형 풍력발전기로 가정하여 모델링하였다.

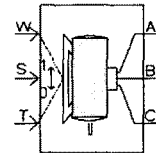


그림 5 EMTDC 농형 유도 발전기 모델

### 3.3 연계배전계통 모델링

풍력발전기가 연계 운전 될 배전 계통은 5000 [kVA]의 변압기 용량을 가지며 선간 전압이 4.169 [kV]인 IEEE 13-bus[6] 데이터를 이용하였다. 모델링 된 풍력발전단지는 용량 650 [kVA]의 인버터 형태의 발전기와 750 [kVA]의 유도 발전기로 구성되었으며 전용선 가설 없이 계통 말단 bus-75에 투입하였다.[7] 그림 6은 IEEE 13-bus 배전계통도를 나타내고 있다.

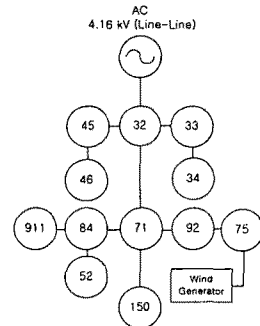


그림 6 IEEE 13-bus 계통 단선도

#### 4. 풍력발전기 유·무효전력 제어기 설계

인버터형의 풍력발전기는 농형 풍력 유도 발전기와는 달리 인버팅 기법을 이용하여 출력전압의 위상과 크기를 제어하여 유·무효전력의 출력을 간단히 조절할 수 있다.

##### 4.1 유·무효전력 제어

먼저, 풍력발전기가 연계될 계통지점의 전압을  $V_s$ 라 하고 발전기의 출력 전압을  $V_f$ 로 가정하면, 발전기에서 계통에 공급하는 유효전력  $P$ 와 무효전력  $Q$ 는 아래의 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다.[8]

$$P = \frac{|V_s||V_f|}{X} \sin \theta \quad (2)$$

$$Q = \frac{|V_f|^2}{X} - \frac{|V_s||V_f|}{X} \cos \theta \quad (3)$$

여기서,  $X$ 는 동기리액턴스,  $\theta$ 는 전력각이다

일반적으로 전력각은 작은 값으로 제어하여 발전기의 출력을 조절하므로 위상 변화를 통하여 더 큰  $P$ 의 출력이득을 볼 수 있다.  $Q$ 의 경우 전압을 조절하면서 그 값을 제어할 수 있다. 그러나 (2)와 (3)에서 보는 바와 같이 유효전력과 무효전력은 분산전원의 출력전압과 위상에 대해 서로 독립적이지 않으므로 본 논문에서는 그림 7과 같이 유·무효전력의 협제어에 의한 전력공급을 모의하였다.

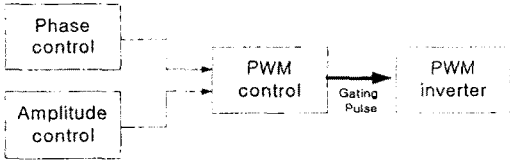


그림 7 인버터의 출력 제어 기법

##### 4.2 전압 제어 및 위상제어

먼저, 인버터의 출력 전압을 계통전압에 일치하여 배전계통에 연계시킨다. 이후 인버터의 스위칭 시간을 조절로 출력 전압을 변동시켜 발전기의 무효전력을 제어한다. 반면 계통에 공급하는 유효전력을 조절하기 위하여 인버터의 위상을 제어한다. 본 연구에서는 위상제어 시 변화가 커지면 계통 전압과의 동기를 상실하고 계통의 전압에 왜곡을 주며 고조파가 증가하는 현상을 가지게 되므로 위상을  $30^\circ$  이내에서 제어하였다. 유·무효전력 제어결과 분산전원 출력전압이 계통전압보다 크게 되면 계통으로 공급되는 무효전력은 커지며, 계통전압보다 풍력발전기의 출력전압을 진상으로 제어함에 따라 큰 유효전력을 계통에 공급할 수 있다.

#### 5. 분산전원의 유·무효전력 출력 제어 모의

풍력발전단지에서의 풍력발전기 유·무효전력 제어에 따른 운전 특성을 모의하기 위해 IEEE 13-bus에 유도형 풍력발전기와 인버터 형태의 풍력발전기를 설치하였다. 모의 결과, 유도형 풍력발전기 운전 시에 발생하는 무효전력을 인버터형 발전기에서 공급할 수 있어 불필요한 무효전력보상기의 설치와 동작을 감소시킬 수 있었다.

##### 5.1 풍력발전기의 출력특성

풍력 유도 발전기는 출력특성에 따라 유효전력과 무효전력이 동시에 변동하는 특성을 가지고 있어, 발생된 무효전력을 보상하기 위하여 인버터형의 풍력발전기 전압과 위상을 제어하여 운전하였다. 그림 8과 9는 풍황 조

건의 변화로 유도형 풍력발전기와 인버터 형태의 풍력발전기 유·무효전력의 변동을 나타낸 것이다. 아래 모의는 풍력발전기들이 정격 출력의 0.5 pu로 운전하고 있을 때, 0.5초에서 풍황이 변동하기 시작하여 1초에서 풍력발전기의 출력이 1 pu로 되었을 경우이다. 유도 발전기는 1초에서 750 [kVA] 피상전력을 기준으로 0.91 pu의 유효전력을 계통으로 공급하며, 0.48 pu의 무효전력을 소비한다. 반면 인버터 형태의 풍력발전기는 유도발전기에서 발생하는 무효전력을 보상하기 때문에 유효전력이 0.82 pu까지만 증가한다. 이때 무효전력은 0.58 pu까지 계통으로 공급할 수 있다. 그림 9에서 나타냈듯이 유·무효전력 제어 알고리즘은 유도발전기에서 발생하는 무효전력을 효과적으로 보상해 주는 것을 알 수 있다. 무효전력의 경우, 음의 값은 소비하는 것을, 양의 값은 계통으로 전력을 공급하는 것을 뜻한다.

그림 10은 전원측에서 공급하는 무효전력의 변동을 나타낸 것으로, 풍력 유도발전기의 무효전력 변동에도 불구하고 전원의 무효전력이 오히려 미소하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 인버터형의 풍력발전기 무효전력 출력량이 유도발전기 소비량에 비하여 다소 크기 때문으로 판단된다. 그림에서의 출력은 배전변압기 용량을 기준으로 계산된 값을 의미한다.

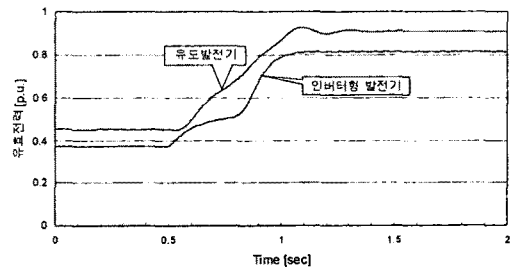


그림 8 인버터형 발전기와 유도발전기의 유효전력 변동

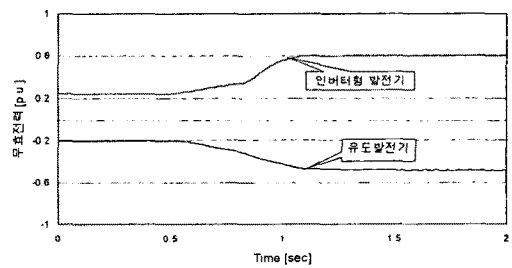


그림 9 인버터형 발전기와 유도발전기의 무효전력 변동

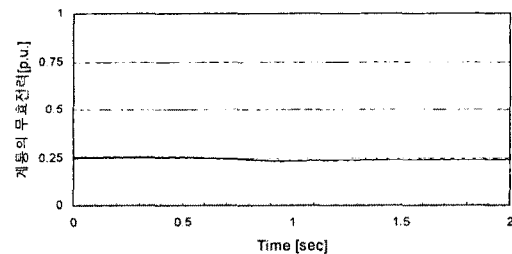


그림 10 전원측에서 공급하는 무효전력의 변동

### 5.2 계전점 전압, 전류의 변동

그림 11은 풍력발전기 출력변동에 따른 계전점 전압과 전류의 변화를 배전변압기 정격전압, 전류를 기준으로 나타낸 그림이다. 0.5초 이후로 풍력발전기의 출력이 증가하여 더 많은 계통부하를 풍력발전단지에서 담당하므로 계전점의 전류는 더욱 큰 값으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 계전점 전압의 경우 전원 임피던스가 작아 크게 변동하지 않지만 계통전류의 감소로 미소하지만 증가함을 알 수 있다.

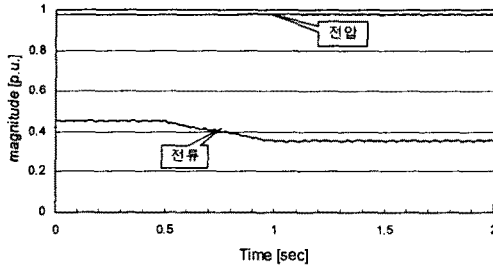


그림 11 분산전원 출력변동에 따른 계전점 전류, 전압변동

## 6. 결론

본 논문에서는 인버터 형태와 유도기 형태의 풍력발전기들로 구성된 풍력발전단지를 모델링하여 유도발전기의 무효전력 변동분을 인버터형의 풍력발전기에서 보상할 수 있도록 운전하는 유·무효전력 제어 기법에 대하여 연구하였다. 인버터 형태의 발전기 출력제어 기법으로는 SVPWM 기법을 이용하였으며, 전압과 위상을 제어하여 계통에서 요구되는 무효전력을 적절히 공급하였다. 시뮬레이션 결과, 풍황 조건의 변동에 따라 발생하는 유도발전기의 무효전력 변동을 인버터 형태의 풍력발전기 출력조절로서 이를 효과적으로 보상하였다. 이러한 풍력발전기 유·무효전력 제어기법을 이용하면 추가적인 무효전력 보상기 설치를 줄일 수 있으며, 무효전력 보상기의 운전에 따라 계통에 발생하는 과도현상을 현저히 감소시킬 수 있음을 알았다.

### 감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 풍력발전시스템의 실증연구 단지 조성 및 실증에 대한 연구사업을 통해 이루어 졌으며 이에 감사를 드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part1-Radial Distribution Systems." IEEE, No. 0-7803-6420-1/00, 2000
- [2] Mita-Teknik, "Technical Information - Calibration routine for WP4060 Connection Model" 1999. 9
- [3] Heinz Willi Van Der Broeck, Hans-Christoph Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors" IEEE, No. 0093-9994/88/0100-0142, 1988
- [4] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학" 문운당, 1998. 1
- [5] Manitoba HVDC Research Centre, "EMTDC V3 User's Manual"
- [6] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991
- [7] 한국전력공사 계통운영처, "타사 발전기 병렬운전 연계선로