

## 제주 행원 풍력 발전 시스템의 역률 개선에 관한 연구

박성기\*, 김정용\*, 강경보\*, 김일환\*  
\*제주대학교 전기전자공학부

### A study on the power factor improvement of Wind Turbine Generation System at Haeng-Won in Jeju

S.G. Park, J.W. Kim\*, G.B. Kang, and E.H. Kim\*  
\*Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l University

#### ABSTRACT

This paper presents a study on the power factor improvement of the Wind Turbine Generation System (WTGS) at Haeng-won wind farm in Jeju island. Vestas WTGS named V47 as a model system is selected in this paper, and has 660 kW power ratings. In this system, power factor correction is controlled by the conventional method with power condensor bank. So, model system at Haeng-won wind farm has very low power factor in the area of low wind speed, which is from 4 m/s to 6 m/s. This is caused by the power factor correction using power condensor bank. To improve the power factor in the area of low wind speed, we used the static var compensator(SVC) using current controlled PWM power converter by IGBT switching device. Finally, to verify the proposed method, the results of computer simulation using Psim program are presented to support the discussion.

#### 1. 서 론

오늘날 세계 기후 협약이 체결되어 앞으로 나라마다 이산화탄소를 일정량 이상 발생시키지 못하도록 규제하고 있고, 이로 인해 화석연료를 대체할 수 있는 청정에너지에 대한 관심과 연구가 국내뿐 아니라 해외에서도 활발히 이루어지고 있다.<sup>[1][2]</sup> 우리나라에서도 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력발전 단지를 조성하여 상업운전이 이루어지도록 하고 있어 풍력에 대한 관심을 크게 증대 시켰다. 그러나 이 시스템은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템에 대한 정확한 설계 및 운전정보를 얻지 못하는 실정이다.<sup>[3][4]</sup> 또한 발전기에 연결된 터빈 시스템에 대한 해석이 아직 이루어지지 못하고 있어 이러한 문제점으로 인하여 여태까지 제주도 행원 풍력 발전 시스템의 출력 특성에 대한 연구가 제대로 이루어지지 않았다.<sup>[5]</sup>

그래서 행원단지 내 계통선에 연계되는 시스템을

Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 구현하여 기동시와 정상상태에서의 문제점과 영향을 분석하였고 그 결과 진상용 콘덴서에 의한 역률 보상이 저속 풍속 시 제대로 이루어지지 않고 있음을 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 행원에서 운전되고 있는 Vestas V47 시스템을 모델링하여 저속 풍속 시 나타나는 역률 저하 문제점을 해결하기 위해 전원 주파수 및 부하의 변동 시에도 실시간으로 보상할 수 있는 큰 이점을 지닌 정지형 무효전력 시스템을 도입하여 역률을 효율적으로 보상하도록 제어 시스템을 구현하고, 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 이를 입증하고자 한다.

#### 2. 제어 이론

##### 2.1 진상용 콘덴서에 의한 무효전력 보상

일반적으로 유도성 부하는 전류가 전압보다 위상이 뒤지는 지상 역률이 된다. 유도성 부하에 병렬로 전력용 콘덴서를 접속하면 지상 전류와 상쇄되는 진상전류가 콘덴서에 흐르므로 부하 전류와 전압의 위상차가 줄어들어 역률이 개선된다.

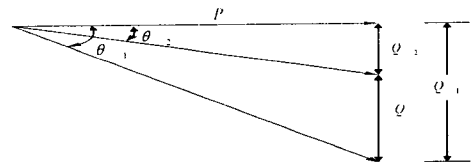


Fig. 1 Phasor diagram of power factor compensation

Fig. 1은 유도성 부하에 병렬용 전력용 콘덴서를 병렬로 연결하여 역률을 개선하는데 필요한 용량을 계산하기 위한 그림이다. 이 그림에서  $P$ 는 유효전력,  $\cos \theta_1$ 는 개선전의 역률,  $\cos \theta_2$ 는 개선후의 역률,  $Q$ 는  $\cos \theta_1$ 에서  $\cos \theta_2$ 로 역률을 개선하는데 필요한 콘덴서 용량이

다. 이에 대한 수식은 다음 식과 같다.

$$Q = Q_1 - Q_2 = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$= P \left\{ \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_2} - 1} \right\} \quad (1)$$

### 2.2 정지형 무효전력 보상 시스템에 의한 보상

Fig. 2 는 정지형 무효전력 보상장치의 기본 구성도를 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 부하의 무효전류  $i_L$ 이 발생하면 그 무효전류 만큼의 무효전류  $i_c$ 를 보상기에서 부하에 공급하여 전원측에서는 유효성분의 전류만 부하에 공급하여 전원측에서의 역률이 거의 1이 되게끔 하는 것이 기본원리이다.

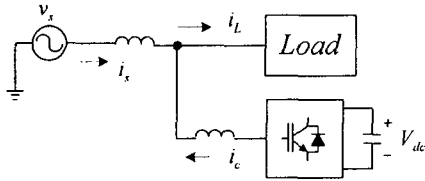


Fig. 2 Basic principal of static var compensator

부하측에 발생하는 무효전류분의 보상전류를 발생하기 위해서 전원측으로 부터의 전압과 전류를 알아야 한다. 3상 전원의 각 상전압과 전류는 평형이라고 가정하여 Park 변환식을 이용하면 정현파 3상 부하전류는 동기좌표축상의,  $d, q$ 축으로 2상으로 변환이 가능하고 전류값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Ld}^e = I_m \sin \phi$$

$$i_{Lq}^e = I_m \cos \phi \quad (2)$$

여기서 위 첨자  $e$ 는 동기 좌표축 상의 변수를 나타내고  $I_m$ 은 전류의 크기를 나타낸다. 그리고  $\phi$ 는 부하각이다. 식(2)에서  $d$ 과  $q$ 축 전류는 각각 무효성분과 유효성분의 크기를 나타낸다. 이 식에서 무효전류의 성분은  $i_{Ld}^e$ 이기 때문에 이 성분을 부하에 정지형 무효전력 보상 시스템으로부터 공급하면 무효전력을 보상할 수가 있게 된다. Fig. 3 은 정지형 무효전력 보상기로 전원 계통에 주입해 주어야 할 보상기준 전류  $i_{Ld}^e$ 를 동기좌표축에서 연산 과정을 나타내고 있다.

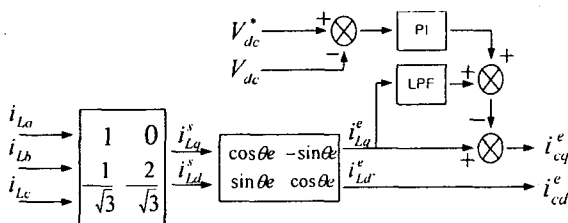


Fig. 3 Block diagram of calculating the current compensation

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 제주 행원 풍력발전 단지에 설치되어 있는 덴마크 Vestas사 V47 660 kw 풍력 발전 시스템을 모델로 하여 제어 시스템을 구성하고, Psim 프로그램으로 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 수행을 위해 시스템을 수학적으로 모델링 하는 것은 굉장히 어렵다. 이러한 이유 때문에 풍력 터빈 시스템을 컴퓨터로 해석하기 위해 간단히 모델링하는 방법이 실제 운전하여 얻은 출력 특성 데이터를 가지고 구현하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 행원 풍력발전단지에 설치되어 운전되고 있는 Vestas V47 660kW 발전시스템을 1999년 3월~2000년 2월까지의 1년간 실제 운전하여 얻은 출력 데이터를 가지고 모델링을 구현하였다. 풍차의 터빈은 회전익에 의해서 바람의 에너지를 기계적 에너지로 다시 기어시스템에 연결된 발전기에 의해서 전기적 에너지로 변환하는 곳이다.

$$T_e = \frac{P_w}{\omega_m} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3)$$

여기서  $P_w$  : 전기적 출력 [kW]

$\omega_m$  : 기계적 회전 각속도 [ $\text{rad/s}$ ]

Fig. 4 는 식 (3)에 의해서 얻어진 풍속에 대한 풍차터빈의 출력 발생 토크를 나타내고 있다. Fig. 4를 이용하면 풍속에 대한 출력 토크 시뮬레이터를 구현할 수가 있다. 4~18 m/s 사이를 0.1 m/s 단위로 하여 출력 토크 데이터를 만들어 Look-up table화하고 풍속에 따른 토크를 발생하도록 프로그램을 구현한다. Fig.5는 Psim 프로그램에서 사용된 V47 660kW 풍력발전 시뮬레이션 구조도를 있다. 여기서 풍차터빈은 입력 데이터에 대한 기계적 토크를 발생시키는 라이브러리가 있어 이를 이용하여 쉽게 구현이 가능하게 되어진다. 바람이 불기 시작하여 10분 평균 풍속이 4 m/s 이상이면 풍차터빈의 회전익을 정지시켰던 브레이크 시스템이 해지되면서 바람에 의해 최대의 토크를 발생시킬 수 있도록 피치 제어를 시작한다.

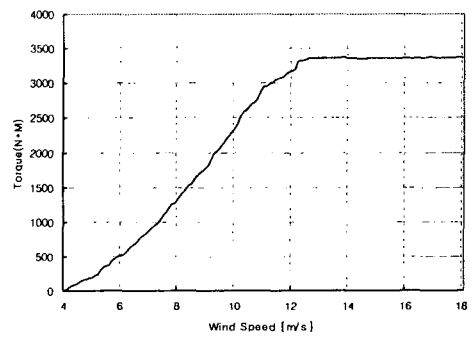


Fig. 4 Output torque curve

그러면 풍차의 날개는 회전하기 시작하여 발전기의 회전자 속도가 동기속도인 1800 RPM 에 이르면 출력 제어가 이루어진다. Vestas V47 풍차 발전 시스템은 1872 RPM 즉, 슬립이 4% 일 때 정격출력 660 kW 가 발생하도록 되어 있다.

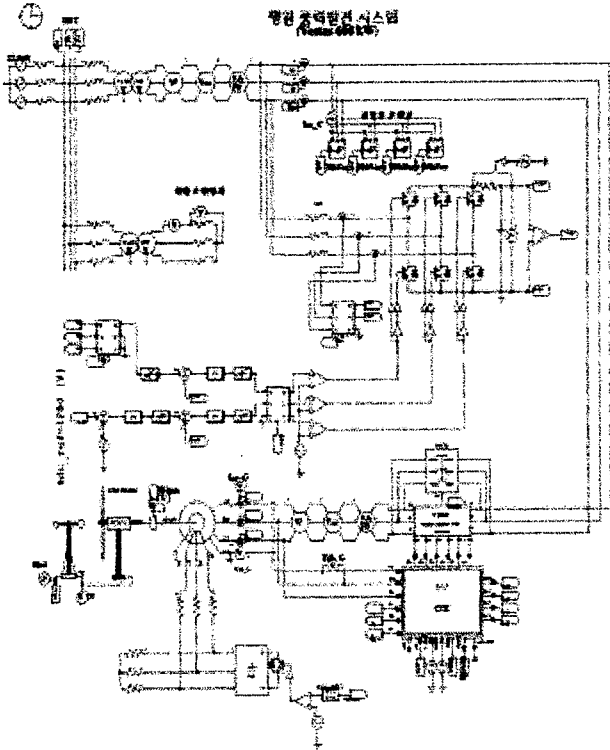


Fig. 5 Schematic diagram of V47-660kW wind turbine generation system with SVC

그러나 기존 시스템은 역률을 일정한 값을 갖는 진상용 콘덴서로 보상하기 때문에 발전기의 출력에 따른 무효전력 보상을 정확하게 보상 할 수가 없다. 이러한 이유 때문에 저 풍속 영역에서 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 역률이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 IGBT를 채용한 PWM 컨버터를 가지고 실시간으로 무효전력을 보상하여 기존 시스템에서의 역률저하 문제를 해결한다. 제안한 시스템을 채용한 결과 시뮬레이션 결과 Fig. 7에서 보면 저 풍속영역에서 획기적으로 역률이 개선되고 있음을 알 수 있다. 채용한 저 풍속 영역에서는 역률이 저하되고 있음을 알 수 있다. 제안 시스템이 기존 시스템에 채용하여 운전했을 때 역률이 획기적으로 개선될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 진상용 콘덴서에 의한 경우 상전압과 전류의 위상이 4 m/s 로 갈수록 크게 벌어짐을 알 수 있다. 이것은 역률이 현저히 떨어짐을 의미한다. Fig. 7에서는 정지형 무효전력 보상 시스템에 의해 무효전력을 보상하는 경우로 풍속이 4 m/s로 떨어져도 상전압과 전

류의 위상이 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 역률이 거의 1 제어되고 있음을 알 수 있다.

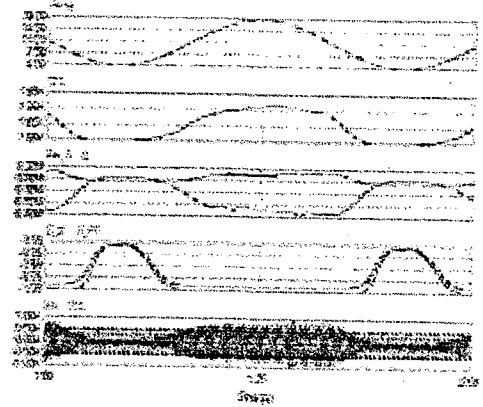


Fig. 6 Waveform of simulation results without static var compensator

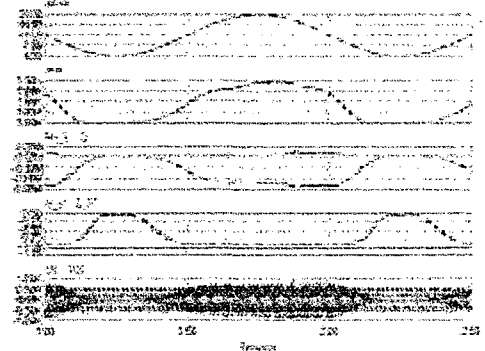


Fig. 7 Waveform of simulation results with static var compensator

## 5. 결 론

시뮬레이션 결과에서 본 것과 같이 정지형 무효전력 보상시스템을 이용했을 때의 역률이 진상용 콘덴서에서 역률을 보정했을 때 보다 저 풍속영역 (4 ~ 6 m/s) 에서 보다 효과적으로 역률을 개선되고 있음을 알 수 있다. 이것은 전 동작영역에서 기존의 시스템에 정지형 무효전력 보상 시스템을 추가하였을 경우 전 운전 범위의 풍속영역에서 계통선에 연계된 전원 계통은 항상 역률이 거의 1로 운전 할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

이상의 결과를 토대로 풍력 발전 시스템을 효과적으로 모델링하는 방법을 얻을 수 있었고 또한 기존 시스템에서 나타나는 저 풍속 운전하에서 역률이 현저히 떨어지는 원인을 규명할 수 있었다. 따라서 제안한 시스템을 모델 시스템 상에 적용했을 때 보다 획기적으로 전원계통의 역률을 개선할 수 있음을 알 수 있어, 기존 행원

풍력 발전 시스템에 적용하여 역률을 개선할 수 있다는 것을 알 수 있고 또한 새로운 시스템을 개발할 때 풍력 발전 시스템의 설계 및 해석 시 크게 도움이 되리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 풍력 발전 Q&A, 2000. 2, 日本 Ohm社.
- [2] 김용현, 김일환, 2000, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451-458.
- [3] 허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서.
- [4] 전영진, 김일환, 2002. 12, 제주행원 풍력 발전 시스템의 모델링 및 해석, 제주대학교 석사학위논문.
- [5] J.H. Choi, 1989, Instantaneous Reactive Power Compensator using Current Controlled PWM Converter, Trans. KIEE, vol. 38. no.7, JUL.
- [6] H.Akagi, 1986, Control strategy of active power filter using multiple voltage source PWM converter, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22, no. 3, pp. 460-465.
- [7] G.H.Choe, 1986, Analysis an control of active power filter with optimized injection, in Conf. Rec. IEEE PESC, pp. 401-409.