

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 23, No. 3, 2003

제주 풍력발전 단지의 V47-660 kW 시스템의 역률개선에 관한 연구

김일환*, 전영진**, 김정웅**, 강경보**, 허종철***, 김건훈****

* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술 연구소(ehkim@cheju.ac.kr), ** 제주대학교 대학원 전기전자공학부,
*** 제주대학교 기계공학과, **** 한국에너지기술연구원

A Study on the Power Factor Improvement of V47-660 kW Wind Turbine Generation System in Jeju Wind Farm

Kim, Eel-Hwan*, Jeon, Young-Jin**, Kim, Jeong-Woong**,
Kang, Geong-Bo**, Huh, Jong-Chul***, Kim, Gun-Hoon****

* Faculty of Electrical & Electronic Eng., Res. Insti. Adv. Tech., Cheju Nat'l Univ.

** Faculty of Electrical & Electronic Eng., Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

*** Faculty of Mechanical & Energy and Production Eng., Cheju Nat'l Univ., **** KIER

Abstract

This paper presents a study on the power factor improvement of V47- 660 [kW] Wind Turbine Generation System (WTGS) in Jeju wind farm, as a model system in this paper. In this system, the power factor correction is controlled by the conventional method with power condensor banks. Also, this system has only four bank steps, and each one capacitor bank step is cut in every one second when the generator has been cut in. This means that it is difficult to compensate the reactive power exactly according to the variation of them. Actually, model system has very low power factor in the area of low wind speed, which is almost from 4 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 using IGBT switching device. Finally, to verify the proposed method, the results of computer simulation using Psim program are presented to support the discussions.

Keywords : 역률(Power factor), 풍력발전 시스템(Wind turbine generation system),
전력용 콘덴서(Power condensor)

기 호 설 명

- v_m : 상전압의 최대치 [V]
- P_w : 전기적 출력[kW]
- w_m : 기계적 회전 각속도 [rad/s]
- P : 유효전력 [W]
- Q : 콘덴서 용량
- ϕ : 역률각
- e : 동기 좌표축상의 변수
- $\cos \theta_1$: 개선전의 역률
- $\cos \theta_2$: 개선후의 역률

1. 서 론

오늘날 세계 기후협약이 체결되어 앞으로 나라마다 이산화탄소를 일정량 이상 발생시키지 못하도록 규제하고 있고, 이로 인해 화석 연료를 대체할 수 있는 청정에너지에 대한 관심과 연구가 국내뿐 아니라 해외에서도 활발히 이루어지고 있다.¹⁾ 우리나라에서도 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력 발전 단지를 조성하여 상업 운전을 성공시키므로써 풍력발전에 대한 관심을 크게 증대시켰다. 그러나 이 시스템은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템에 대한 정확한 설계 및 운전정보를 얻지 못하는 실정이다.²⁾ 이러한 문제점으로 인하여 여태까지 제주도 행원 풍력 발전 시스템의 출력 특성에 대한 연구가 제대로 이루어지지 않았다.³⁾ 그래서 행원단지 내 계통선에 연계되는 시스템을 Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 구현하여 기동 시와 정상상태에서의 문제점과 영향을 분석하였고 그 결과 진상용 콘덴서에 의한 역률 보상이 저 풍속 운전시 제대로

로 이루어지지 않고 있음을 확인하였다.⁴⁾ 실제로 행원에 설치되어 운전하고 있는 Vestas V47-660 [kW] 시스템은 저 풍속 운전시(4 ~ 6 [m/s]) 역률이 급속히 저하되고 있다. 이것은 전 운전 영역을 일정한 진상용 콘덴서로 무효전력을 보상하고 있기 때문에 발전기의 무효전력에 대해 정확하게 보상하고 있지 못하기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 새로운 역률 보상 대책이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 행원에서 운전되고 있는 Vestas V47-660 [kW] 시스템을 모델링하여 저 풍속 운전시 나타나는 역률저하 문제점을 해결하기 위하여 무효전력을 실시간으로 보상하는 알고리즘을 구현함으로써 저풍속에서 나타나는 역률저하문제를 개선하고자 한다. 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. 이 때 부하에 흐르는 전류는 역률에 반비례하므로 역률이 낮으면 어떤 부하에 전력을 공급할 때 동일 전압하에서 큰 전류를 흘려주어야 하며, 또한 선로 전력 손실은 부하 역률의 제곱에 반비례하므로 부하 역률을 개선해야 한다. 따라서 유도성 부하에 병렬로 전력용 콘덴서를 접속하면 지상 전류와 상쇄되는 진상전류가 콘덴서에 흐르므로 부하 전류와 전압의 위상차가 줄어들어 역률이 개선된다.

1) 풍력 발전 Q&A, 2000. 2, 日本 Ohm社.
 2) 김용현, 김일환, 2000, 풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451-458.
 3) 허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서.

4) 전영진, 2002. 12, 제주행원 풍력 발전 시스템의 모델링 및 해석, 제주대학교 석사학위 논문.

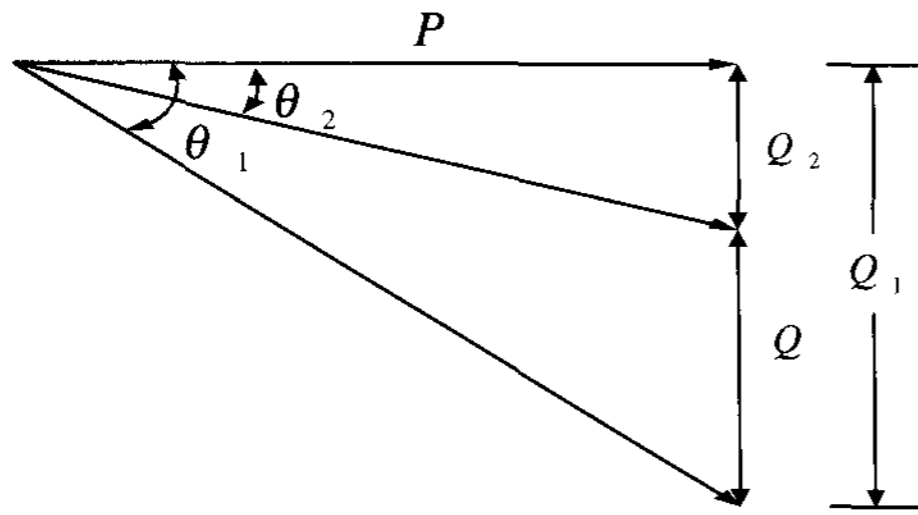


그림 1. 역률보상을 위한 페이저도

그림 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 용량이다. 이에 대한 수식은 다음 식과 같다.

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

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

2.2 정지형 무효전력 보상 시스템에 의한 보상

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

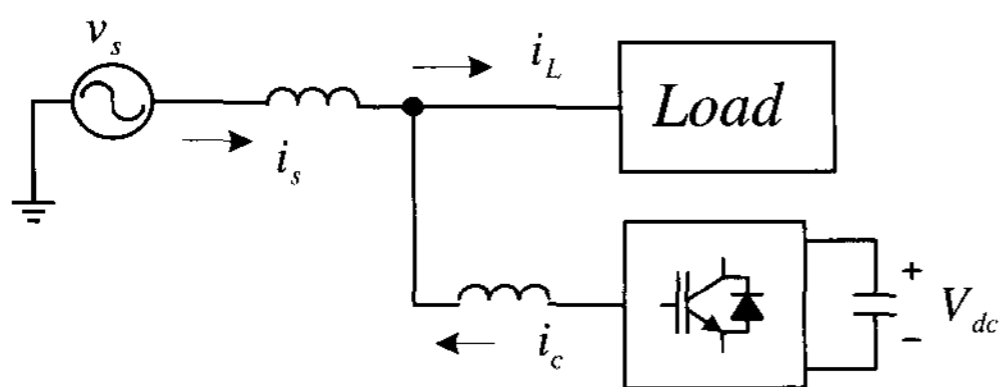


그림 2. 정지형 무효전력 보상기의 원리

부하측에 발생하는 무효전류분의 보상전류를 발생하기 위해서는 전원측으로부터의 전압과 전류를 알아야 한다. 3상 전원의 각 상전압을 다음과 같이 가정한다.

$$v_{sa} = V_m \cos \theta_e$$

$$v_{sb} = V_m \cos \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2)$$

$$v_{sc} = V_m \cos \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right)$$

부하에 나타나는 역률각을 ϕ 라 하면 부하전류의 표현식은 다음과 같다.

$$i_{La} = I_m \cos (\theta_e - \phi)$$

$$i_{Lb} = I_m \cos \left(\theta_e - \frac{2}{3} \pi - \phi \right) \quad (3)$$

$$i_{Lc} = I_m \cos \left(\theta_e + \frac{2}{3} \pi - \phi \right)$$

여기서 Park 변환식을 이용하여 정현파 3상 부하전류를 동기좌표축상의 d , q 축으로 2상 변환하면 다음 수식과 같은 직류값으로 표현할 수 있다.

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

$$i_{Lq}^e = I_m \cos \phi \quad (4)$$

여기서 위 첨자 e 는 동기 좌표축 상의 변수를 나타내고 I_m 은 전류의 크기를 나타내고 d 축과 q 축 전류는 각각 무효성분과 유효성분의 크기를 나타낸다. 식 (4)에서 무효전류의 성분은 i_{Ld}^e 이 기 때문에 이 성분을 부하에 정지형 무효전력 보상 시스템으로부터 공급하면 무효전력을 보상할 수가 있게 된다. 그림 3은 정지형 무효전력 보상기로 전원 계통에 주입해 주어야 할 보상기 전류 i_{cd}^e 를 동기좌표축에서 연산 과정을 나

타내고 있다.

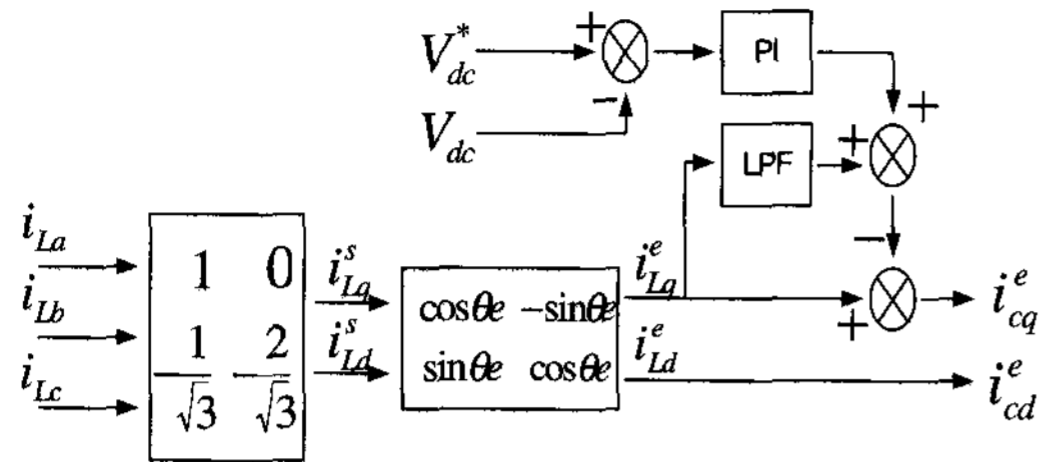


그림 3. 보상전류 계산을 위한 블록선도

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 터빈 시스템 모델링

풍력발전 시스템에서 풍차터빈은 크게 블레이드와 풍력발전 시스템 상부에 설치되어 있는 동력 전달장치, 발전기, 제어장치등이 보관되는 케이스인 너트셀부로 나누어진다. 블레이드는 바람의 에너지를 기계적 에너지로 만들어 주는 역할을 하는 것으로 보통 수평축 풍차에서는 3개의 블레이드를 갖는 것이 가장 보편화되어 있다. 이 블레이드들은 바람에 대해 최대의 기계적 에너지를 출력하기 위해 블레이드 단면의 형상, 크기, 단면 변화에 대한 출력 변화 등을 고려하여 설계될 뿐만 아니라 노이즈, 수명, 낙뢰사고 등 다양한 형태의 요소에 대해 고려하여 설계되어 제작된다. 또한 너트셀부는 기어 시스템, 유압 시스템, 풍차의 회전면이 풍향방향에 따라가도록 제어하는 요잉 시스템, 피치 제어 시스템, 발전 시스템 등 복잡한 시스템이 복합적으로 구성되어 있다. 기어 시스템은 블레이드에 의해서 발생된 회전수를 증속하여 발전기에 입력시키며, 유압시스템은 피치 제어시 블레이드의 피치각을 조절하는데 사용된다. 피치 제어 시스템은 블레이드의 출력 토크를 제어하기 위해 블레이드와 바람과의 방향을 조절하도록 제어하는 것이다. 이러한 모든 시스템을 고려하여 풍차 터빈 시스템을 수학적으로 모델링하는 것은 굉장히 어렵다. 이러한 이유 때문에 터

빈 시스템을 수학적으로 간단히 모델링하는 방법이 실제 운전하여 얻은 출력 특성 데이터를 가지고 구현하는 것이다. 본 논문에서는 표 1과 같은 제원을 갖는 모델 시스템을 2000년 3월 ~ 2001년 2월 까지의 1년간 실제 운전하여 얻은 출력 데이터를 가지고 모델링을 구현하였다. 그림 4는 실제 시스템에서 얻어진 데이터를 가지고 얻은 풍속의 변화에 따른 전기적 출력의 그래프이다. 보는 바와 같이 풍속이 4 ~ 18 [m/s] 사이에서 풍속에 대한 출력 특성을 알 수 있다. 그리고 그림 4에서 식 (5)을 이용하면 풍속에 대한 풍차터빈의 출력 발생 토크 T_e 를 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (5)$$

그림 5는 그림 4와 식(5)에 의해서 얻어진 풍속에 대한 풍차터빈의 출력 발생 토크를 나타내고 있다. 그림 5를 이용하면 풍속에 대한 출력 토크 시뮬레이터를 구현할 수가 있다. 4 ~ 18 [m/s] 사이를 0.1 [m/s] 단위로 하여 출력 토크 데이터를 만들어 룩업 테이블화 하고 풍속에 따른 토크를 발생하도록 프로그램을 구현한다. 그림 6은

표 1. 모델 시스템의 파라메타

	정격출력 [kW]	660
발전기	형식	3상 권선형 유도기
	회전속도 [RPM]	1800 ~ 1980
	냉각방식	공냉식
설계 풍속	시동풍속 [m/s]	4.0
	정격풍속 [m/s]	14.0
	중단풍속 [m/s]	25.0
	최대 내풍속 [m/s]	70.0
회전자	직경 [m]	47.0
	회전속도 [RPM]	28.5
	회전면적 [m ²]	1735
	허브높이 [m]	41
	출력제어 방식	Opti Slip Opti Tip Pitch control

Psim 프로그램에서 사용된 출력 토크 발생 시뮬레이터를 나타내고 있다. 이 프로그램에는 입력 데이터에 대한 기계적 토크를 발생시키는 라이브러리가 있어 이를 이용하여 쉽게 구현이 가능하게 되어진다.

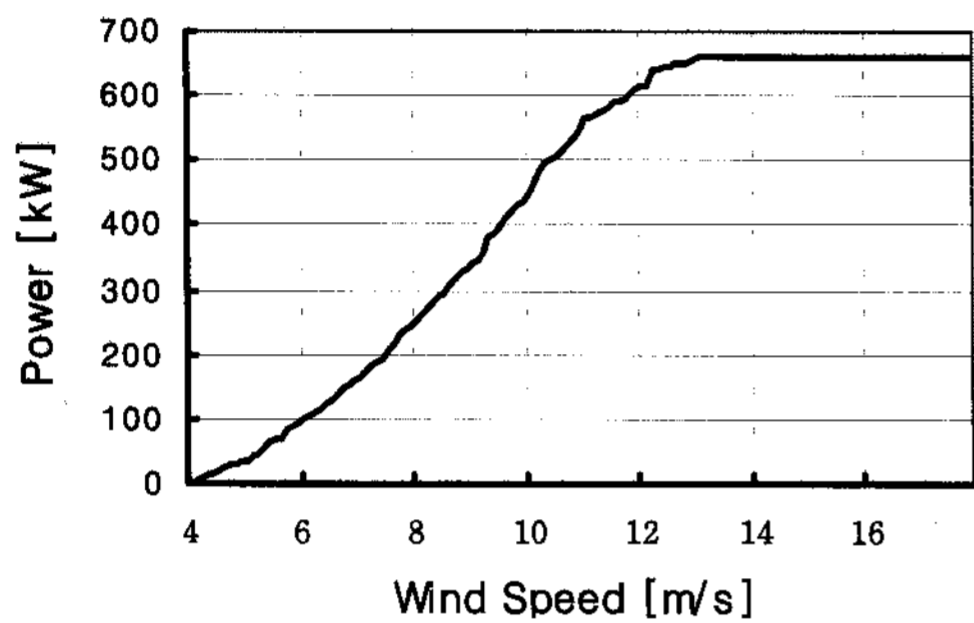


그림 4. 풍속에 대한 발전 출력

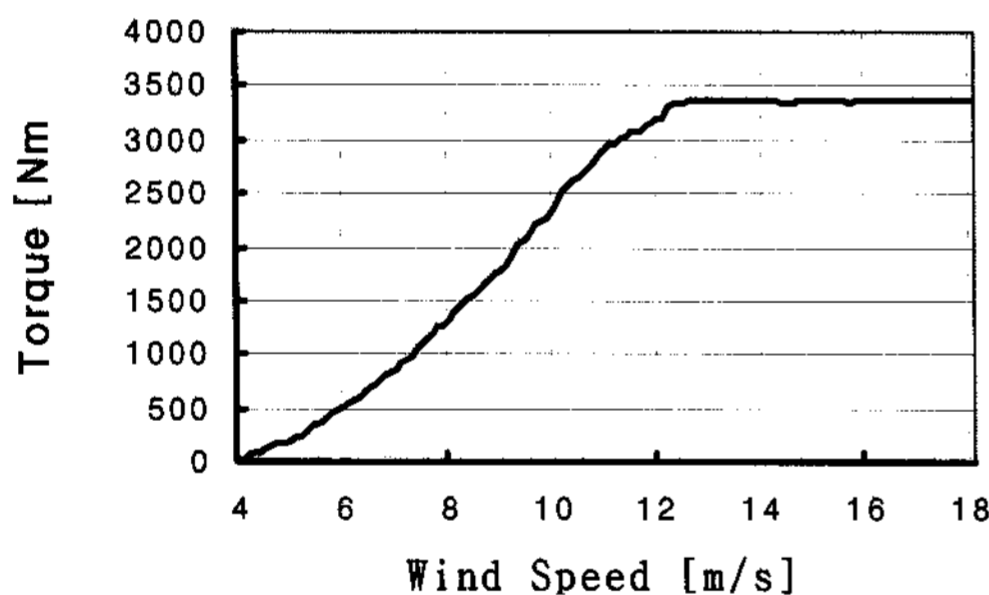


그림 5. 출력 토크 곡선

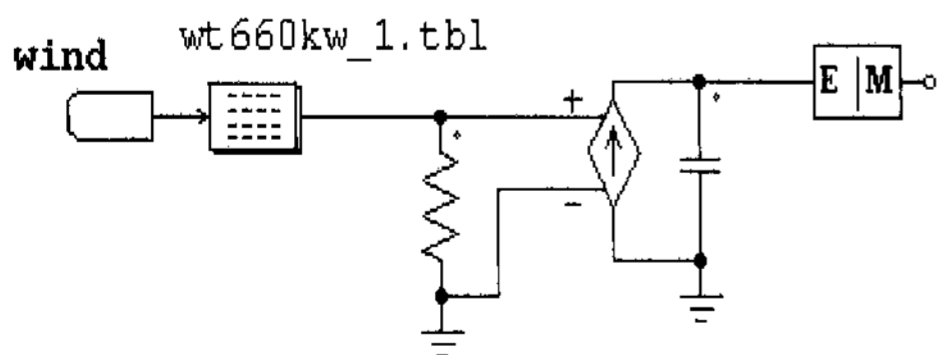


그림 6. 토크 시뮬레이터

3.2 발전 출력제어 시스템

모델 시스템은 1872 [rpm] 즉, 슬립이 4% 일 때 정격출력 660 [kW] 가 발생하도록 되어

있다. 따라서 회전자의 속도가 1800 ~ 1872 [rpm] 사이에서는 최대출력이 이루어지도록 제어가 이루어진다. 1872 [rpm] 이상에서는 발전기의 회전자에 연결된 슬립저항을 통하여 항상 정격 출력이 출력되도록 제어가 이루어지며 동시에 날개의 피치각을 조절하도록 되어진다. 이 때 회전자의 속도는 슬립이 10%인 1980 [rpm]이 최대 속도로 정해져 운전되고 있으며 이 이상의 속도가 되면 시스템을 정지시킨다. 이러한 제어 알고리즘을 바탕으로 발전기부에서는 발전기와 회전자 슬립링에 연결된 외부 저항과 이 저항을 가변 시키는 제어 시스템으로 구성된다. 발전기의 고정자측은 계통선에 연결시키고 회전자측은 회전자 제어 시스템에 연결된다. 회전자에 연결된 가변저항 제어시스템은 0.0596Ω을 갖는 저항을 회전자측에 연결하고 또한 이 저항과 병렬로 3상 브리지 다이오드와 IGBT를 이용하여 3 [kHz]의 삼각파로 PWM 파형을 만들어 출력에 따라 외부저항의 평균값을 제어한다. 이렇게 슬립전력을 제어함으로써 출력을 최적제어 할 수 있도록 구현한다. 제어 시스템부는 DSP부, 소프트 스타팅부, 주접점 MCB부, 진상용 콘덴서부, 무효전력 보상 시스템부로 구성된다. DSP부에서는 전체 시스템을 제어하기 위해 각 시스템에 알맞은 제어 신호를 입출력하여 전체 시스템이 원하는 대로 동작하게끔 한다. 소프트 스타팅부에서는 계통 연계시 과도한 시동전류를 제한하기 위하여 6개의 SCR로 구성되며 1.5초 동안만 SCR의 점호각을 116° 에서 0° 까지 위상 제어하여 과도한 시동전류를 제한하도록 한다. 이 과정이 끝남과 동시에 주접점 MCB부가 작동하여 계통선과 발전기를 연결한다. 이때 진상용 콘덴서부에서는 역률을 개선하기 위하여 1초 간격으로 75 [kVA]부터 50 [kVA], 50 [kVA], 50 [kVA]의 콘덴서를 발전기와 병렬로 연결한다. 이때 진상용 콘덴서는 발전기의 무효전력이 200 [kvar] 이하

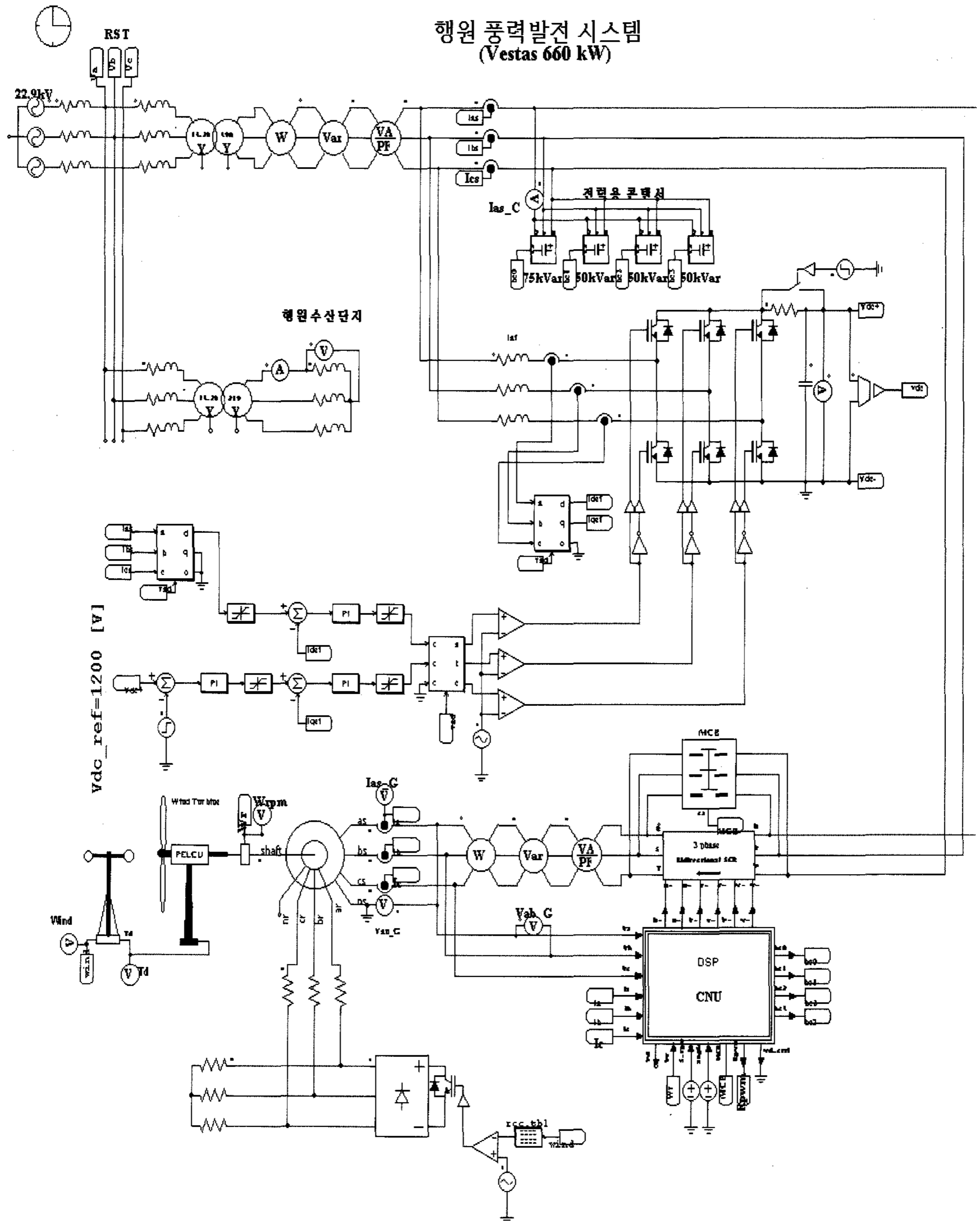


그림 7. 시뮬레이션을 위해 SVC를 갖는 제안한 모델 시스템

에서는 175 [kVA]가 되도록 하고 그 이상에서는 225 [kVA]가 되도록 한다. 본 논문에서 제안한 정지형 무효전력 보상 시스템은 IGBT를 이용한 전류제어형 PWM 컨버터로 구성되었다. 컨버터의 직류전압은 1300 [V]로 하였으며 IGBT를 스위칭하기 위한 주파수는 10 [kHz]로 하였다. 또한 컨버터 전압을 제어하기 위해 PI 제어를 도입하였으며 이 시스템에서 공급할 수 있는 최대전류를 100 [A]로 하였다. 컨버터에 걸리는 직류전압을 얻기 위해 사용된 리액터는 1 [mH]의 값을 가진다. 시뮬레이션은 우선 바람이 불기 시작하여 10분 평균 풍속이 4 [m/s] 이상이라고 가정하여 정지된 회전익을 구동시킨다. 이때 풍차 터빈은 회전익이 굉장히 크기 때문에 큰 관성을 갖는 시스템이다. 이것은 0에서 동기속도 1800 [rpm]까지 오로지 바람에 의해서만 도달하는 것은 많은 시간을 필요로 한다. 이것은 시뮬레이션 시 많은 시간이 필요하기 때문에 여기서는 1800 [rpm]까지는 외부에서 회전시켜 주고 1800 [rpm]일 때 계통선에 연계되도록 시뮬레이션을 수행하였다. 소프트 스타팅과 주점점 MCB의 동작이 끝남과 동시에 진상용 콘덴서가 발전기의 무효전력에 따라 3단계 혹은 4단계로 동작한다. 여기서 3단계는 75[kVA] + 50[kVA] + 50[kVA] 즉 175 [kVA]이고, 4단계는 3단계에서 50[kVA]가 추가된 225 [kVA]로 연결된다. 동시에 보상전류를 발생하기 위한 정지형 무효전력 보상 시스템이 동작하며 보상전류가 부하로 공급된다. 본 논문에서는 풍속이 4~18 [m/s]까지의 변화를 주어 그림 7과 같은 Psim 프로그램 구성으로 제안된 시스템이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 역률의 변화를 보여준다.

4. 결과 및 고찰

풍속이 4 ~ 18 [m/s] 사이에서 진상용 콘덴

서만으로 무효전력을 보상하는 기존 시스템과 이 시스템에 정지형 무효전력 보상 시스템을 추가한 시스템에 대해서 시뮬레이션을 수행하여 그림 9와 그림 10과 같은 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과를 비교 검토하기 위하여 그림 8은 Yokogawa사의 전력 측정기 WT1600을 이용한 V47 모델시스템의 2002년 12월부터 6개월 동안 측정된 결과와 시뮬레이션에서 나타난 결과를 가지고 역률을 나타낸 것이다. 이 두 결과

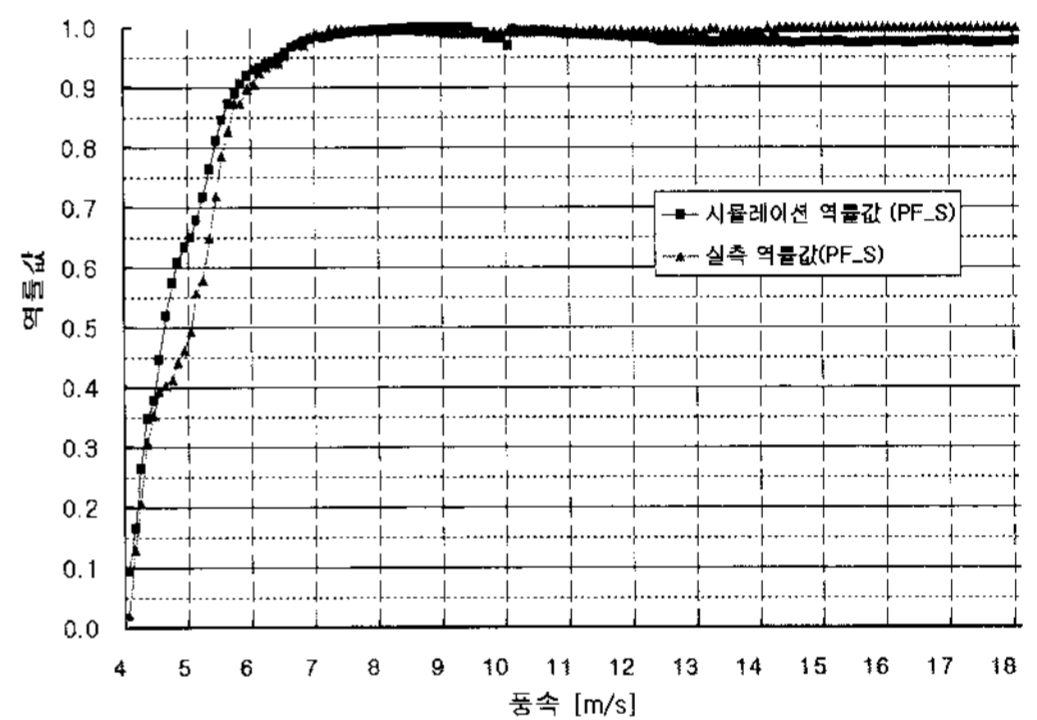


그림 8. 시뮬레이션과 실측에 의한 역률

에서 보면 풍속이 4 ~ 6 [m/s] 사이에서는 역률이 현저히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 9에서도 나타나듯이 풍속에 따라 발전기의 무효전력이 변화하는데 무효전력 보상을 위한 진상용 콘덴서의 값은 고정되어 있기 때문에 무효전력을 효과적으로 보상하지 못하고 있기 때문에 발전기에서 나타나는 역률(PF_G)과 계통선에서 나타나는 역률(PF_s)이 이를 증명하고 있다. 이 그림에서 풍속이 4 ~ 6 [m/s] 사이에서는 역률이 현저하게 떨어짐을 알 수 있다. 이는 그림 8에서 나타난 결과와 거의 같다. 전원계통에 출력되는 유효전력(Ps)와 무효전력(Qs)의 변화를 비교해 봐도 이를 뒷받침 하고 있다. 그리고 정격 풍속 이상에서는 정격 출력

인 660 [kW]가 출력되고 있음을 알 수 있고 또한 회전자에 연결된 가변저항 변화에 의한 슬립 전력제어가 이루어져 발전기의 속도가 1800 ~ 1872 [rpm] 사이에서 변하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 기존 시스템에 정지형 무효전력 보상 시스템을 채용하여 무효전력을 보상한 결과이다. 이 결과에서 보면 전원 계통에 출력되는 유효전력(P_s)은 그림 9에서와 같지만 무효전력(Q_s)은 크기와 변화가 매우 작다. 이것은 발전기의 역률(PF_G)과 정지형 무효전력 보상에 의한 보상후의 전원계통의 역률(PF_S)이 저풍속 영역 4 ~ 6 [m/s] 사이에서도 역률이 거의 1에 가까움을 알 수 있다.

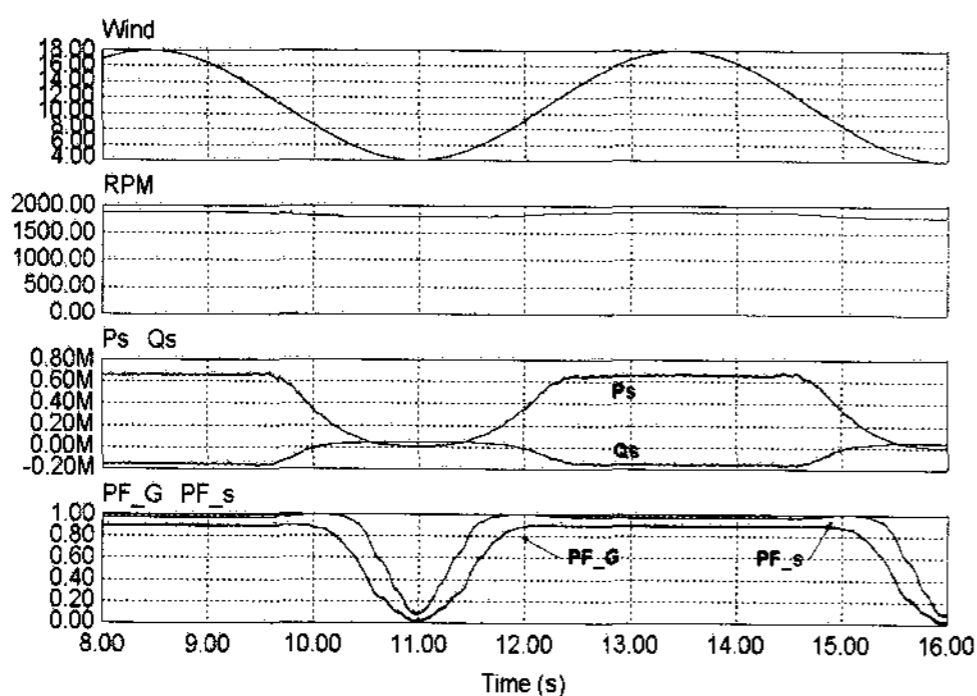


그림 9. SVC가 없는 시스템의 출력

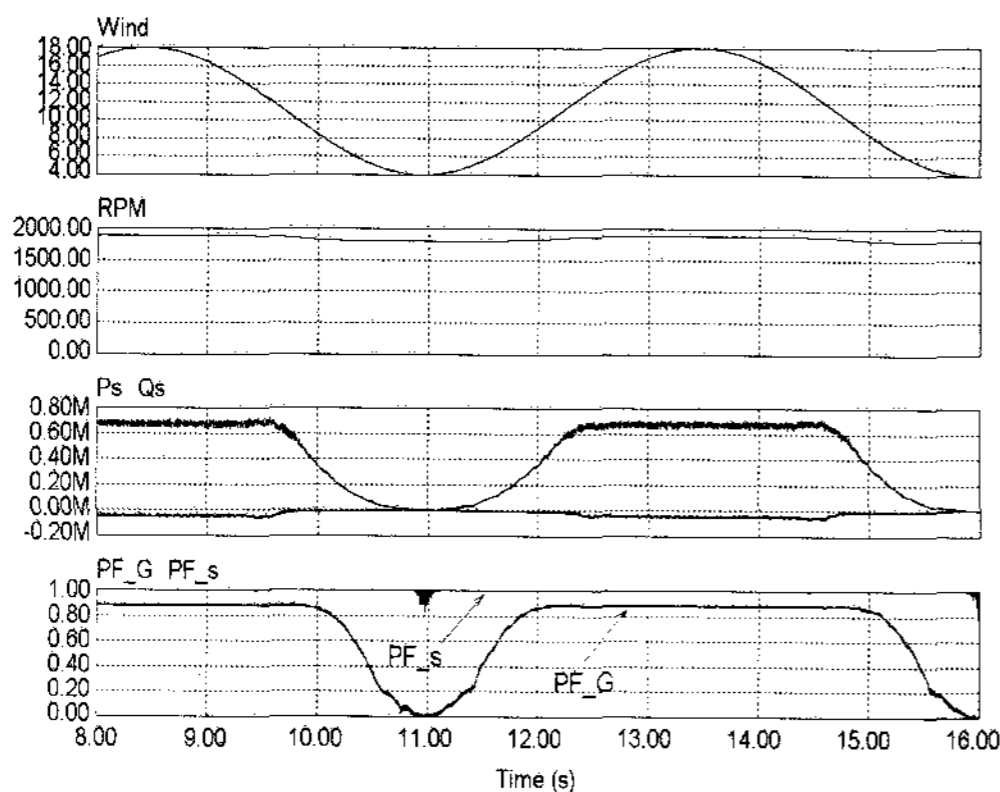


그림 10. SVC가 있는 시스템의 출력

5. 결 론

본 논문에서는 제주 풍력발전 단지에 설치된 덴마크 Vestas사의 V47-660 [kW] 풍력발전 시스템을 모델로 하여 실제 시스템 상에서 측정된 역률 특성과 무효전력 보상 시스템을 모델 시스템에 적용하였을 때의 역률 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 시뮬레이션 결과에서 본 것과 같이 정지형 무효전력 보상시스템을 이용했을 때의 역률이 진상용 콘덴서에서 역률을 보정했을 때보다 저 풍속영역 (4 ~ 6 [m/s]) 에서 보다 효과적으로 역률이 개선되고 있음을 알 수 있다.
- 2) 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 알 수 있었다.
- 3) 기존 시스템에서 나타나는 저 풍속 운전하에서 역률이 현저히 떨어지는 원인을 규명 할 수 있었다.

이상과 같은 결과를 토대로 기존 제주도 행원 풍력발전 단지에 설치된 시스템들에서 나타나는 저 풍속운전 시의 역률저하 문제를 효과적으로 개선할 수 있는 방안을 제시할 수 있었고 또한 새로운 풍력발전 시스템을 개발할 때 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 석사학위
논문.

5. J.H.Choi, 1989, Instantaneous Reactive Power Compensator using Current Controlled PWM Converter, Trans. KIEE, Vol. 38. No.7, JUL.
6. 고지호, 김일환, 2000. 6, PWM 전력 컨버터를

이용한 배전용 무효전력 보상기 제어, 제주대학교
석사학위 논문.

7. 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.