碩士學位論文

제주 행원 풍력발전 시스템의 역률개선에 관한 연구

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 大學院
電氣電子工學科

金 正 雄

2003年 6月

제주 행원 풍력발전 시스템의 역률개선에 관한 연구

指導敎授 金 一 煥

金 正 雄

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2003年 6月

金正雄의 工學 碩士學位 論文을 **認准**함

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 印

委 員 印

委 員 印

濟州大學校 大學院

2003年 6月

A study on the power factor improvement of the wind turbine generation system at Haeng-Won wind farm in Jeju

Jeong-Woong Kim

(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2003. 6.

목 차

LIST OF FIGURES ····· ii

LIST OF TABLES ····· iii

SUMMARY ····· iv

Ⅰ. 서 론 ····· 1

Ⅱ. 제어 이론 ····· 3

1. 진상용 콘덴서에 의한 무효전력 보상 ····· 3
2. 정지형 무효전력 보상 시스템에 의한 보상 ····· 5

Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션 모델링 ····· 8

1. 터빈 시스템 ····· 8
2. 발전 출력 제어 시스템 ····· 13
3. 전체 제어 시스템 ····· 16

Ⅳ. 결과 및 고찰 ····· 20

Ⅳ. 결 론 ····· 24

참 고 문 헌 ····· 25

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Phasor diagram of reactive power compensation ····· 3

Fig. 2 Basic principle schematic diagram of static var compensator ····· 5

Fig. 3 Block diagram of calculating the current compensation ····· 7

Fig. 4 Generating power versus wind speed ····· 9

Fig. 5 Output torque curve ····· 10

Fig. 6 Torque simulator ····· 11

Fig. 7 Output power versus rotor speed ····· 12

Fig. 8 Equivalent circuit of model machine per phase ····· 14

Fig. 9 Simulation flowchart ····· 18

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10 Schematic diagram of proposed control system using Psim ····· 19

Fig. 11 Measured power factor using power analyzer ····· 21

Fig. 12 Simulation results of wind, rotor and blade speed ····· 22

Fig. 13 Simulation results of power factor and current waveform with soft starting ····· 22

Fig. 14 Simulation results without static var compensator ····· 23

Fig. 15 Simulation results with static var compensator ····· 23

Fig. 16 Zoom of Fig. 14 ····· 24

Fig. 17 Zoom of Fig. 15 ····· 24

LIST OF TABLES

Table 1 Parameters of Vestas V47-660kW ····· 10

Table 2 Generator data ····· 14

Table 3 Parameters of equivalent circuit ····· 15

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

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, 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.

Actually, model system at Haeng-Won wind farm has very low power factor in the area of low wind speed, which is almost 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 devices. Finally, to verify the proposed method, the results of computer simulation using Psim program are presented to support the discussions.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서 론

세계 기후협약이 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(풍력발전 Q&A, 2002). 우리나라에서도 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력발전 단지를 조성하여 상업운전이 이루어지고 있어 풍력에 대한 관심을 크게 증대시켰다. 그러나 이 시스템은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템에 대한 정확한 설계 및 운전정보를 얻지 못하는 실정이다(김용현, 2000). 또한 발전기에 연결된 터빈 시스템에 대한 해석이 아직도 이루어지지 못하고 있어 이러한 문제점으로 인하여 여태까지 제주도 행원 풍력발전 시스템의 출력특성에 대한 연구가 제대로 이루어지지 않았다(허종철, 2001).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

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 시 제대로 이루어지지 않고 있음을 확인하였다(전영진, 2002). 실제로 행원에 설치되어 운전하고 있는 Vestas V47 시스템은 저 풍속 시 (4 ~ 6 [m/s]) 역률이 급속히 저하되고 있다. 이것은 전 운전 영역을 진상용 콘덴서로 무효전력을 보상하고 있기 때문에 발전기의 무효전력에 대해 정확하게 보상하고 있지 못하기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 새로운 역률 보상 대책이 요구된다. 이러한 요구에 부응할 수 있는 것이 정지형 무효전력 보상 시스템이다. 이 시스템은 최근 전력용 반도체 소자의 개발과 전력 변환 장치를 제어하는 새로운 기술들의 개발로 인하여 전원 주파수 및 부하 변동 시에도 실시간으로 무효전력을 보상할 수 있는 방법이다(Choi 등 1989). 시스템은 전압형과 전

류형으로 구분되며 보통 전원측 전류가 주어진 기준 파형을 추종하도록 하는 전압형 PWM 방식이 널리 이용된다. 여기서는 계통상에서 부하에 따라 발생하는 무효전력을 IGBT 스위칭 소자를 이용한 전류 제어형 PWM 전력 컨버터 시스템으로 보상하는 방법을 통하여 역률을 제어하도록 하고 있다(고지호, 2000).

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

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅱ. 제어 이론

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 전압 하에서 큰 전류를 흘려주어야 하며, 또한 선로 전력 손실은 부하 역률의 제곱에 반비례하므로 부하 역률을 개선해야 한다. 따라서 유도성 부하에 병렬로 진상용 콘덴서를 접속하면 지상 전류와 상쇄되는 진상전류가 콘덴서에 흐르므로 부하 전류와 전압의 위상차가 줄어들어 역률이 개선된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

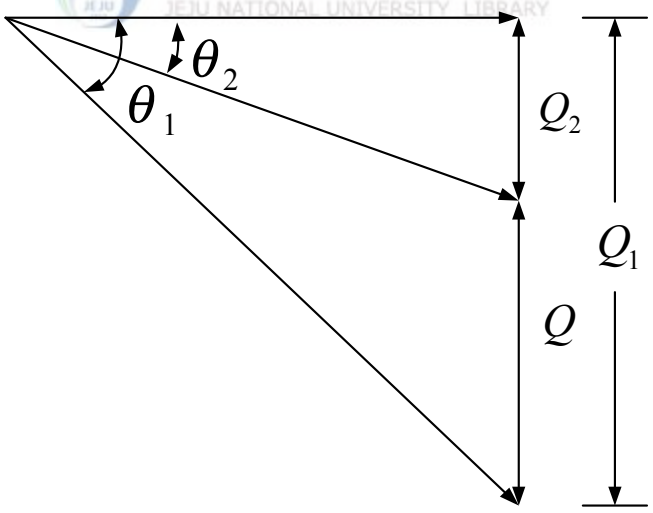


Fig. 1 Phasor diagram of reactive power compensation

Fig. 1은 유도성 부하에 병렬용 전력용 콘덴서를 병렬로 연결하여 역률을 개선하는데 필요한 용량을 계산하기 위한 벡터도이다. 이 벡터도에서 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.

$$Q = Q_1 - Q_2 = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)$$
$$= P\left\{\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_2} - 1}\right\} \text{ [kVA]} \qquad (1)$$

여기서 Q_1 은 보상 전 무효전력이고 Q_2는 보상 후 무효전력량이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 정지형 무효전력 보상 시스템에 의한 보상

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

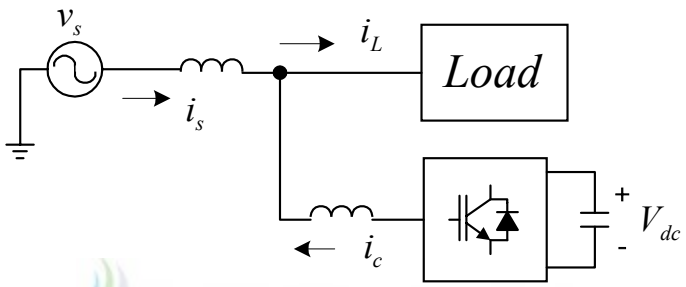


Fig. 2 Basic principle schematic diagram of static var compensator

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

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

$$
\begin{aligned}
v_a &= V_m cos\theta_e \\
v_b &= V_m cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\
v_c &= V_m cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned}
\tag{2}
$$

여기서 V_m 은 상전압의 최대치이다.

부하에 나타나는 역률각을 ϕ라 하면 부하전류의 표현식은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
i_{La} &= I_m \cos(\theta_e - \phi) \\
i_{Lb} &= I_m \cos\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi - \phi\right) \\
i_{Lc} &= I_m \cos\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi - \phi\right)
\end{aligned}
\tag{3}
$$

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

$$
\begin{aligned}
i^e_{Ld} &= I_m \sin\phi \\
i^e_{Lq} &= I_m \cos\phi
\end{aligned}
\tag{4}
$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식 (4)에서 위 첨자 e는 동기 좌표축 상의 변수이고 I_m은 전류의 크기를 나타내며 d축과 q축 전류는 각각 무효성분과 유효성분의 크기를 나타낸다.

무효전류의 성분은 i^e_{Ld}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^e_{cd}를 동기좌표축에서 연산 과정을 나타내고 있다.

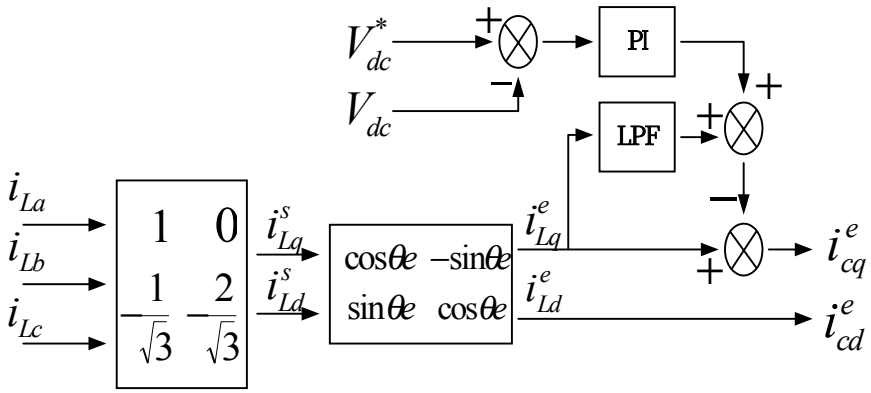


Fig. 3 Block diagram of calculating the current compensation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션 모델링

1. 터빈 시스템

풍력발전 시스템에서 풍차터빈은 크게 블레이드와 넛셀부로 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 넛셀부는 기어 시스템, 유압 시스템, 요잉 시스템, 피치 제어 시스템, 발전 시스템 등 복잡한 시스템이 복합되어 구성되어 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

기어 시스템은 블레이드에 의해서 발생된 회전수를 증속하여 발전기에 입력시키며, 유압시스템은 피치 제어 시 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 터빈 시스템을 수학적으로 간단히 모델링하는 방법이 실제 운전하여 얻은 출력 특성 데이터를 가지고 구현하는 것이다(전영진, 2002). 따라서 본 논문에서는 Table 1과 같은 제원을 갖는 Vestas V47-660kW 풍력발전 시스템을 1999년 3월 ~ 2000년 2월까지의 1년간 실제 운전하여 얻은 출력 데이터를 가지고 모델링을 구현하였다.

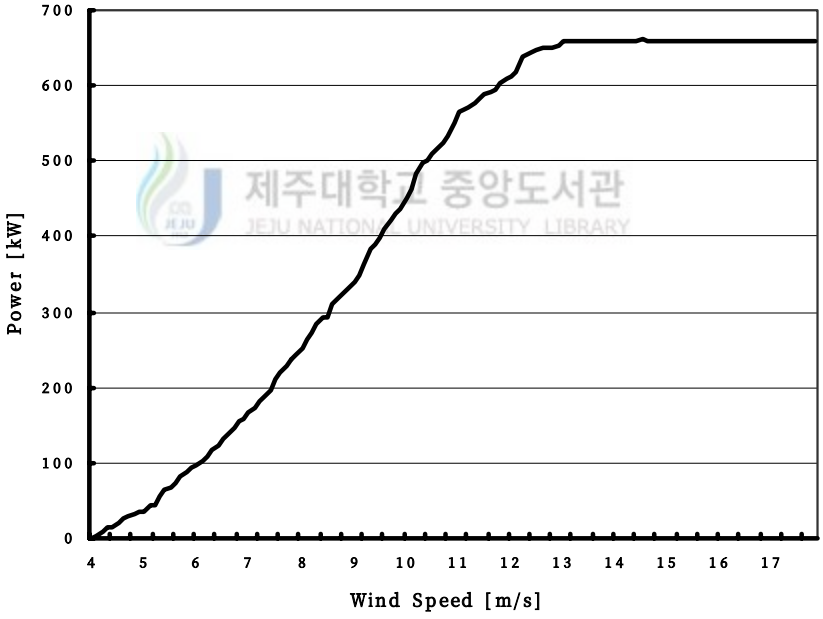
Fig. 4은 실제 시스템에서 얻어진 데이터를 가지고 얻은 풍속의 변화에 따른 전기적 출력의 그래프이다. 보는 바와 같이 풍속이 4~18 [m/s] 사이에서

풍속에 대한 출력 특성을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4에서 식 (5)을 이용하면 풍속에 대한 풍차터빈의 출력 발생 토크 T_e를 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{P_w}{w_m} \quad [\mathrm{N \cdot m}] \tag{5}$$

여기서 P_w : 전기적 출력 [W]

w_m : 기계적 회전 각속도 [rad/s]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4 Generating power versus wind speed

Table 1 Parameters of Vestas V47-660kW

정격출력 [kW]		660
발전기	형식	3상 권선형 유도기
	회전속도 [RPM]	1800 ~ 1980
	냉각방식	공냉식
설계풍속	시동풍속 [m/s]	4.0
	정격풍속 [m/s]	13.0
	종단풍속 [m/s]	25.0
	최대 내풍속 [m/s]	70.0
블레이드	직경 [m]	47.0
	회전속도 [RPM]	28.5
	회전면적 [m^2]	1735.0
허브높이 [m]		41.0
출력제어 방식		Opti Slip Opti Tip Pitch control

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

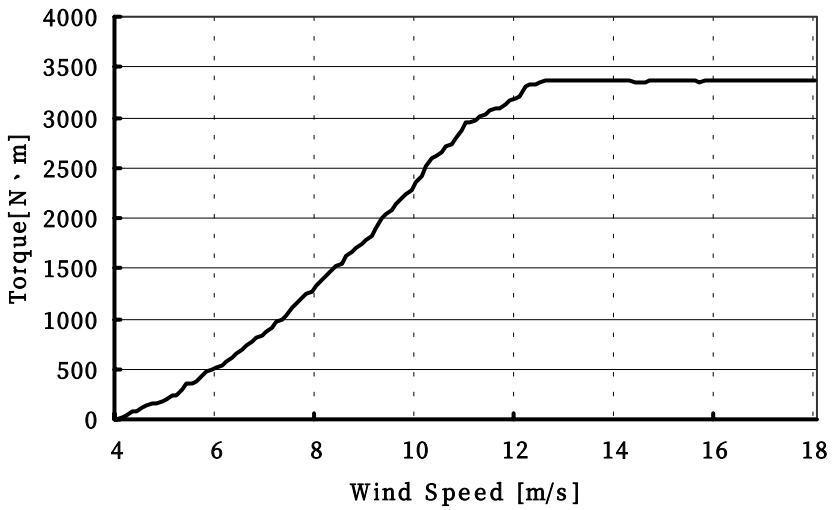
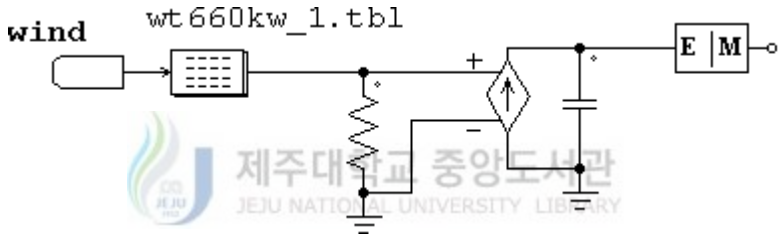


Fig. 5 Output torque curve

Fig. 5는 Fig. 4와 식 (5)에 의해서 얻어진 풍속에 대한 풍차터빈의 출력 발생 토크를 나타내고 있다. Fig. 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 Look-up table화하고 풍속에 따른 토크를 발생하도록 프로그램을 구현한다. Fig. 6은 Psim 프로그램에서 사용된 출력 토크 발생 시뮬레이터를 나타내고 있다. 이 프로그램에서 입력 데이터에 대한 기계적 토크를 발생시키는 라이브러리가 있어 이를 이용하여 쉽게 구현이 가능하게 되어진다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 6 Torque simulator

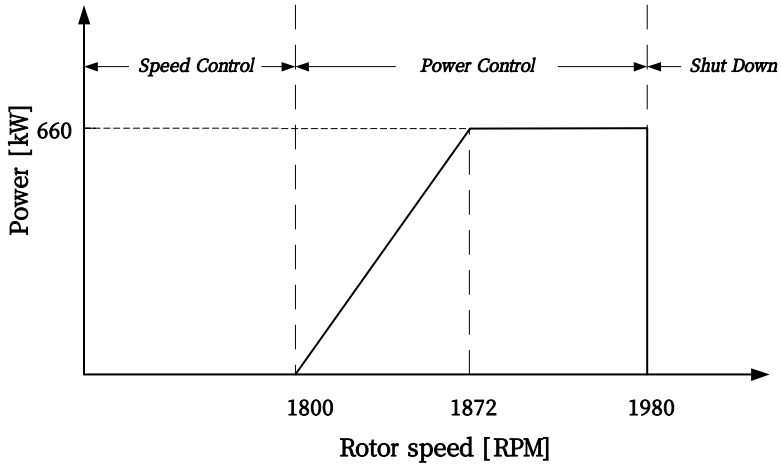


Fig. 7 Output power versus rotor speed

Fig. 7은 발전기 회전자 속도에 대한 발전기 출력을 나타낸 것이다. 바람이 불기 시작하여 10분 평균 풍속이 4 [m/s] 이상이면 풍차터빈의 블레이드를 정지시켰던 브레이크 시스템이 해지되면서 바람에 의해 최대의 토크를 발생할 수 있도록 피치 제어를 시작한다. 그러면 풍차의 블레이드는 회전하기 시작하여 발전기의 회전자 속도가 동기속도인 1800 [RPM] 에 이르면 출력 제어가 이루어진다. Vestas V47 풍력발전 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. 풍속이 정격풍속 이상에서는 발전기의 회전자에 연결된 슬립 저항을 통하여 항상 정격 출력이 출력되도록 제어가 이루어지며 동시에 블레이드의 피치각을 조절하도록 되어 진다. 이 때 회전자의 속도는 10 [%]인 1980 [RPM] 이 최대 속도로 정해져 운전되고 있으며 이 이상의 속도가 되면 시스템을 정지시키고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 발전 출력 제어 시스템

Vestas V47 모델에 채용된 발전기는 독일 ABB사의 제품으로 회전자에 3상 슬립링을 갖는 유도기이다. 이 발전기에 대한 전기적인 출력 데이터는 Table 2에 나타나 있으며, 고정자 기준 상당 등가회로와 등가회로에 대한 제정수는 Fig. 8과 Table 3에 나타나 있다. 권선형 유도기를 발전기로 운전하기 위해서는 여자전류를 필요로 하는데 계통선 연계형 시스템에서는 여자전류가 계통선에서 공급되기 때문에 따로 공급해줄 필요가 없다.

이때 계통선에서 발전기로 흐르는 여자전류는 무효성분이기 때문에 이 성분의 크기가 유효성분의 전류에 비해서 커지면 커질수록 역률이 떨어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 보편적으로 진상용 콘덴서를 부하와 병렬로 연결하여 유효성분의 전류비에 대한 무효성분의 전류비를 감소시켜 역률을 개선시킨다. 행원에 설치된 V47 시스템은 시동 풍속에서 계통선과 연계된 후 1초 간격으로 4 단계의 진상용 콘덴서를 연결하여 역률을 보정하여 사용되고 있다. 이것은 무효전류의 크기에 따라서 역률 보정을 할 수 없다는 것을 내포하고 있다.

회전자 슬립링에는 외부저항과 이 외부 저항값을 변경할 수 있는 제어시스템이 연결되어 있다. 이 시스템은 계통선에 연결된 고정자측의 출력 변화에 따라 회전자에 연결된 저항값을 변화시켜 슬립전력을 제어하므로써 고정자측 출력을 제어하고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2 Generator data

발전기 형태		3상 권선형 유도기
권선 결선(stator/rotor)		star/star
전압 [V]		3 x 690
극수		4
정격속도 [RPM]		1890
슬립조절 간격 [%]		0.6 - 10
정격슬립 [%]		5
정격출력 [kW]		660
발전기 출력 역률	1/1 부하	0.89
	3/4 부하	0.89
	1/2 부하	0.87
	1/4 부하	0.74
발전기 무부하 손실 [kW]		14
발전기 전류	정격부하 [A]	622
	무부하 [A]	110
발전기 무효전력	정격부하 [kvar]	342
	무부하 [kvar]	131
역률보정 [kvar]		125 - 225
정격부하전류 (계통선측)		560 A

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

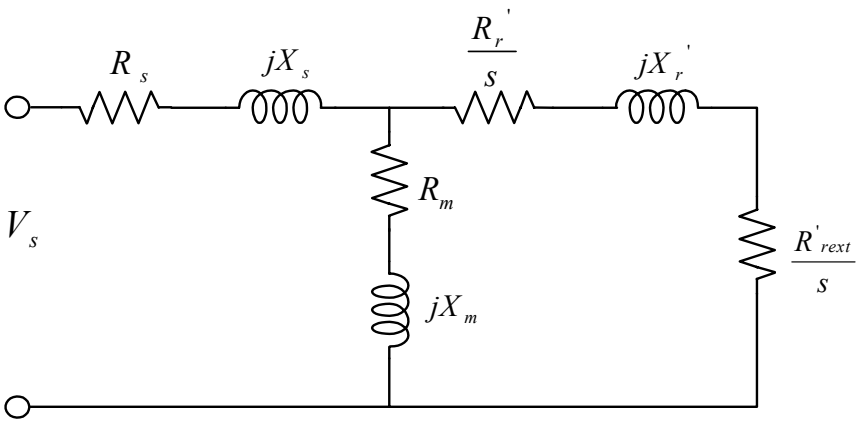


Fig. 8 Equivalent circuit of model machine per phase

Table 3 Parameters of equivalent circuit

고정자 저항	R_s [Ω]	0.0048
고정자 리액턴스	X_s [Ω]	0.0816
회전자 저항	R_r [Ω]	0.0040
회전자 리액턴스	X_r [Ω]	0.108
회전자 외부저항 (10%slip)	R_{rext} [Ω]	0.0596
자화 리액턴스	X_m [Ω]	3.72
전압	V_s [V]	$690/\sqrt{3}$
주파수	f [Hz]	60

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 전체 제어 시스템

제주 행원 풍력발전 단지에 설치되어 있는 덴마크 Vestas사 V47-660 kW 풍력발전 시스템을 모델로 하여 제어 시스템을 구성하고, Psim 프로그램으로 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 수행을 위해 V47 시스템의 모델링은 크게 블레이드부, 발전기부, 제어 시스템부로 구성된다. 블레이드부에서는 풍속에 따른 바람의 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 주는데 풍속에 따른 토오크는 식 (5)과 Fig. 5를 이용하여 시동 풍속인 4 [m/s] 에서 18 [m/s] 까지 풍속에 따른 토오크를 발생하도록 하는 토오크 시뮬레이타를 Psim 프로그램에서 제공하는 Fig. 6과 같은 라이브러리를 이용하여 블레이드부를 모델링하였다. 발전기부에서는 발전기와 회전자 슬립링 연결된 외부 저항과 이 저항을 가변 시키는 제어 시스템으로 구성된다. 발전기는 고정자측은 계통선에 연결시키고 회전자측은 회전자 제어 시스템에 연결된다. 회전자에 연결된 가변저항 제어시스템은 0.0596 [Ω]을 갖는 저항을 회전자측과 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 제어 할 수가 있도록 구현한다.

제어 시스템부에서는 DSP부, 소프트 스타팅부, 주접점 MCB부, 진상용 콘덴서부, 무효전력 보상 시스템부로 구성된다. DSP부에서는 전체 시스템을 제어하기 위해 각 시스템에 알맞은 제어 신호를 입출력하여 전제 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

제주대학교 중앙도서관

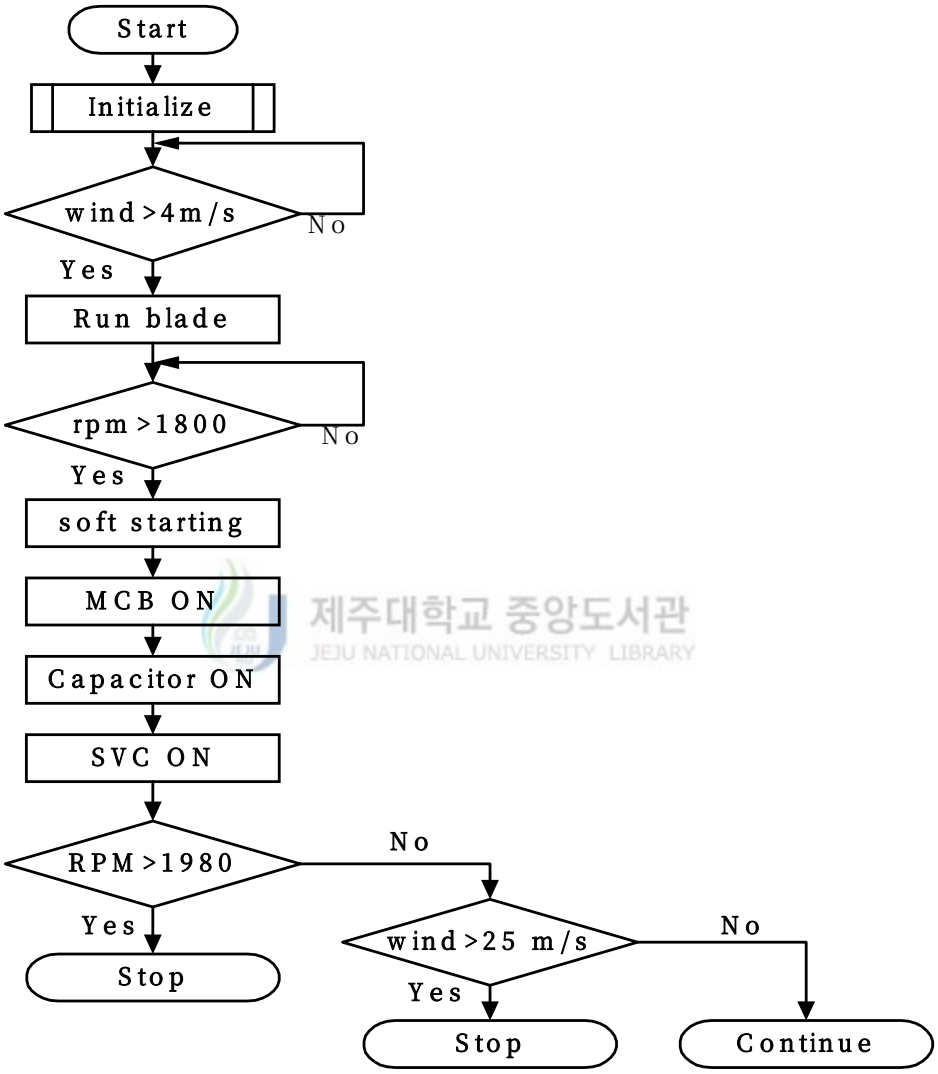
연결한다. 이때 진상용 콘덴서부에서는 역률을 개선하기 위하여 1초 간격으로 75 [kvar], 50 [kvar], 50 [kvar], 50 [kvar]의 순으로 4단계의 뱅크용량 콘덴서를 동작시키고 이 콘덴서는 발전기와 병렬로 연결한다.

본 논문에서 제안된 무효전력 보상 시스템은 IGBT를 이용하여 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 P 게인과 I 게인은 각각 10과 0.001로 하였다. 전류제어를 위한 P, I 게인은 각각 0.1과 0.001로 하였으며 이 시스템에서 공급할 수 있는 최대전류를 100 [A]로 하였다. 컨버터에 걸리는 직류전압을 얻기 위해 사용된 리액터는 1 [mH]의 값을 가진다. 이러한 시스템을 가지고 Fig. 9와 같은 제어 흐름도로 시뮬레이션을 수행한다.

우선 바람이 불기 시작하여 10분 평균 풍속이 4 [m/s] 이상이라고 가정하여 정지된 블레이드를 구동시킨다. 이때 풍차 터빈은 블레이드가 굉장히 크기 때문에 큰 관성을 갖는 시스템이다. 이것은 0 [RPM]에서 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 주접점 MCB의 동작이 끝남과 동시에 진상용 콘덴서가 4 단계로 1초마다 동작한다. 1단계는 75 [kvar] 2단계는 50 [kvar], 3단계는 50 [kvar], 4단계는 50 [kvar]로 연결된다. 이 때 발전기의 무효전력이 200 [kVA]이하에서는 175 [kVA]로 작동하고 이상에서는 225 [kVA]로 동작한다. 크게 2단계로 구분하여 콘덴서가 동작되고 있으며 이에 따른 보상전류가 부하로 공급되고 있다. 본 논문에서는 풍속이 4 [m/s]에서 18 [m/s] 까지의 변화를 주어 Fig. 9와 같은 순서대로 시뮬레이션을 수행하고 Fig. 10과 같은 Psim 프로그램 구성으로 제안된 무효전력 보상

제주대학교 중앙도서관

시스템이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 여러 가지 결과들을 보여준다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 9 Simulation flowchart

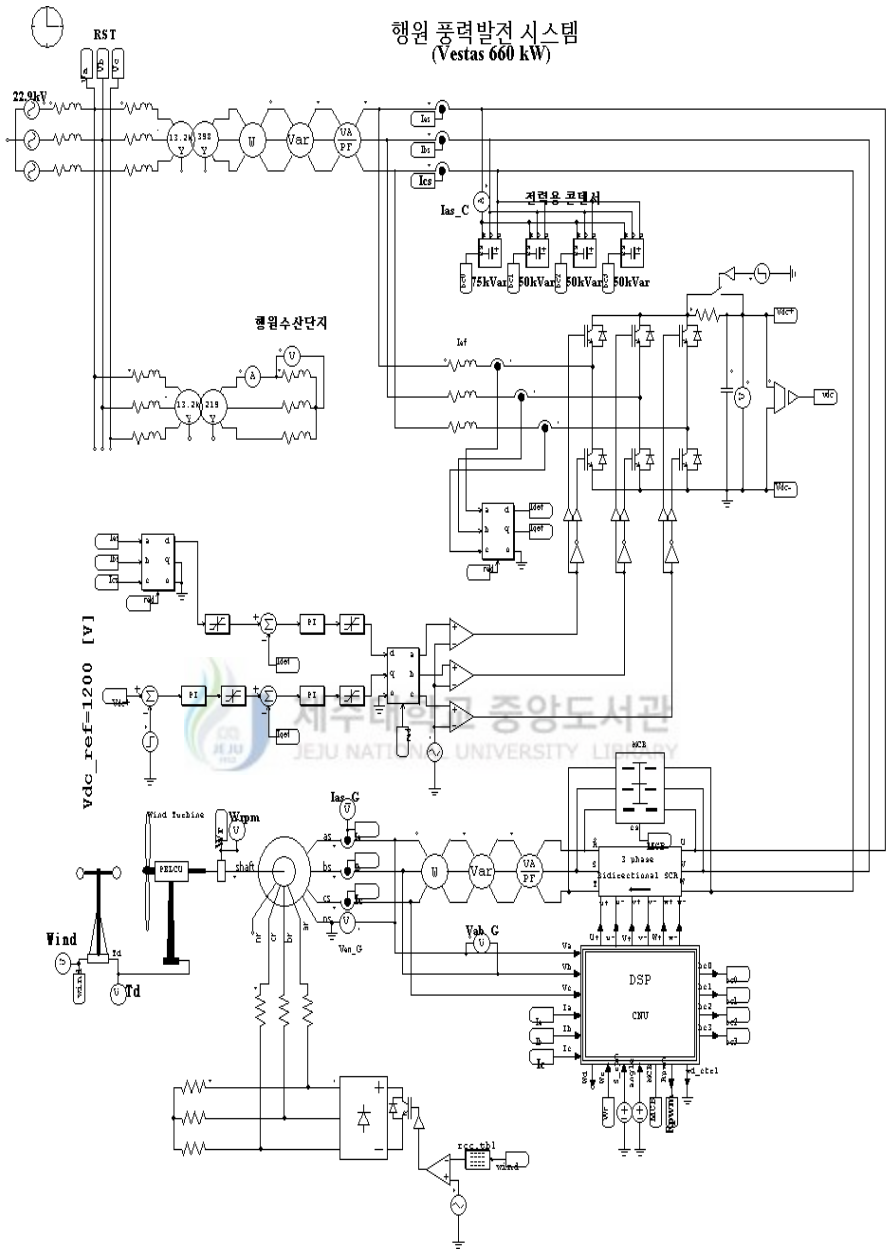


Fig. 10 Schematic diagram of proposed control system using Psim

Ⅳ. 결과 및 고찰

Vestas V47-660 kW 시스템을 모델링 하여 풍속이 4~18 [m/s]사이에서 진상용 콘덴서만으로 무효전력을 보상하는 기존 시스템과 이 시스템에 정지형 무효전력 보상 시스템을 추가하여 시뮬레이션을 수행하여 Fig. 12에서 Fig. 17과 같은 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과를 비교 검토하기 위하여 Fig. 11은 Yokogawa 사의 전력 측정기 WT1600 을 이용하여 V47 모델시스템에 2003년 3월 한달 동안 측정한 결과를 가지고 역률을 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보면 풍속이 4~6 [m/s]사이에서는 현저히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이유는 풍속에 따라 발전기에 보상해야 할 무효전력을 실시간으로 변하기 때문에 여기에 대응해서 실시간으로 무효전력을 보상해야 하는데 기존 시스템은 일단 시스템이 운전이 되면 진상용 콘덴서에 의해 무효전력 보상값이 175 [kvar]과 225 [kvar]로 2단계로 고정되어 있다. 이로 인해 저 풍속 시 보상해야할 무효전력보다 더 많은 무효전력이 공급되어 즉 진상역률이 되어 전원계통의 역률를 저하시키고 있는 것이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 12는 풍속이 4~18 [m/s]로 변했을 때 발전기의 회전속도(RPM)와 블레이드의 속도(Blade-RPM)를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 풍속이 정격풍속 14[m/s]이상에서는 발전기의 회전속도가 1872 [RPM]으로 나타내고 있다. Fig. 13은 평균풍속이 5 [m/s]로 발전기가 계통선에 투입될 때 과도한 돌입전류를 제한하기 위하여 소프트 스타팅을 하였을 때의 전류 파형을 나타내고 있다. 소프트 스타팅은 1.5초동안 이루어지고 있으며 진상용 콘덴서가 1초 간격마다 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이 결과에서 보면 소프트스타팅 시나 콘덴서 투입 시 과도한 돌입전류가 전혀 나타나고 있지 않고 있다. Fig. 14는 진상용 콘덴서로만 무효전력을 보상하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 풍속변화에 대한 계통선의 유효전력(Ps), 계

통선의 무효전력(Qs), 발전기의 무효전력(Qg), 계통선의 역률(PF_s), 발전기 역률(PF_G), 계통선의 실효치 전류(Ia_rms)를 나타내고 있다. 이 결과에서 풍속이 4~6 [m/s]사이에서는 계통선의 역률이 심하게 저하되고 있음을 알 수 있고 또한 계통선 a상의 실효치 전류는 0에서 약 560 [A] 정도까지 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 15는 정지형 무효전력 보상 시스템을 채용했을 때의 결과를 보여주고 있다. 여기서 보면 역률이 전 풍속영역에서 거의 1에 가까움을 볼 수 있다. Fig. 16과 Fig. 17은 Fig. 14와 Fig. 15를 부분 확대한 것으로 저풍속 구간(4~6[m/s])에서 역률이 정지형 무효전력 보상기를 도입한 시스템이 역률이 1로서 동작하고 이때의 전압과 전류의 위상차가 180[°]인 것을 확인할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

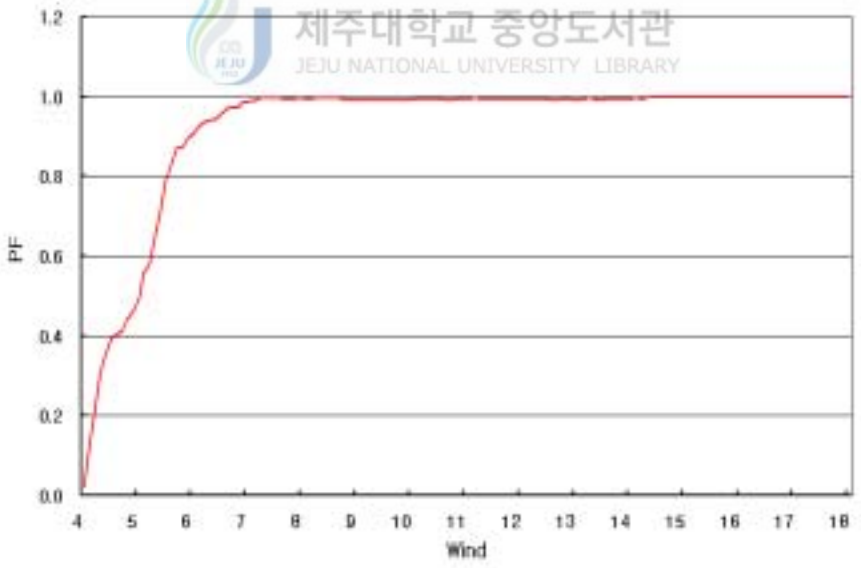


Fig. 11 Measured power factor using power analyzer

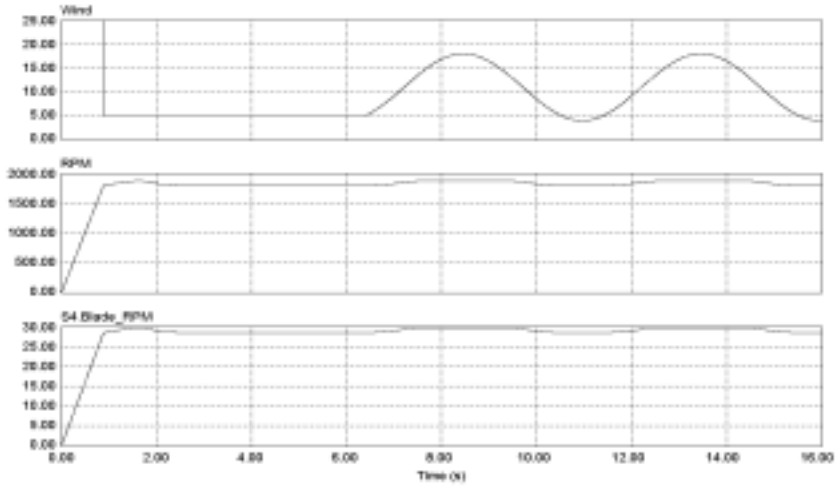


Fig. 12 Simulation results of wind, rotor and blade speed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

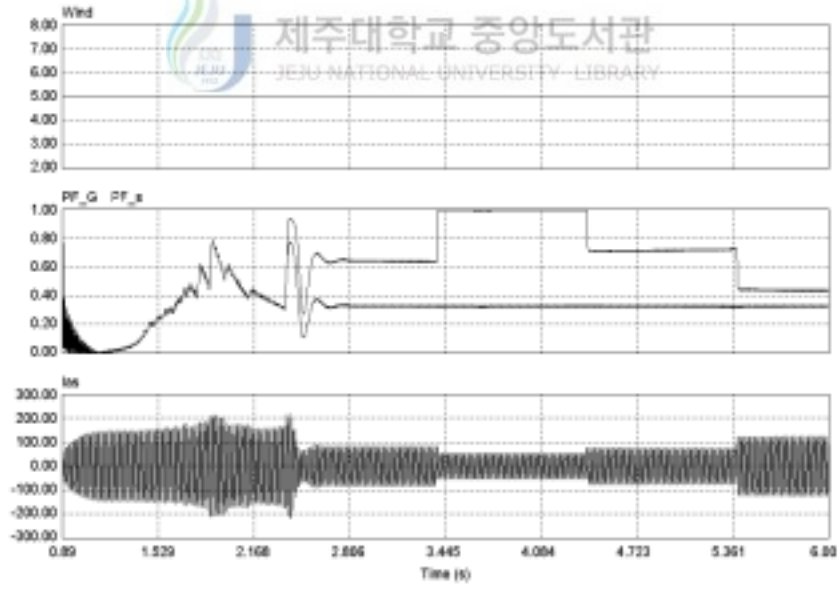


Fig. 13 Simulation results of power factor and current waveform with soft starting

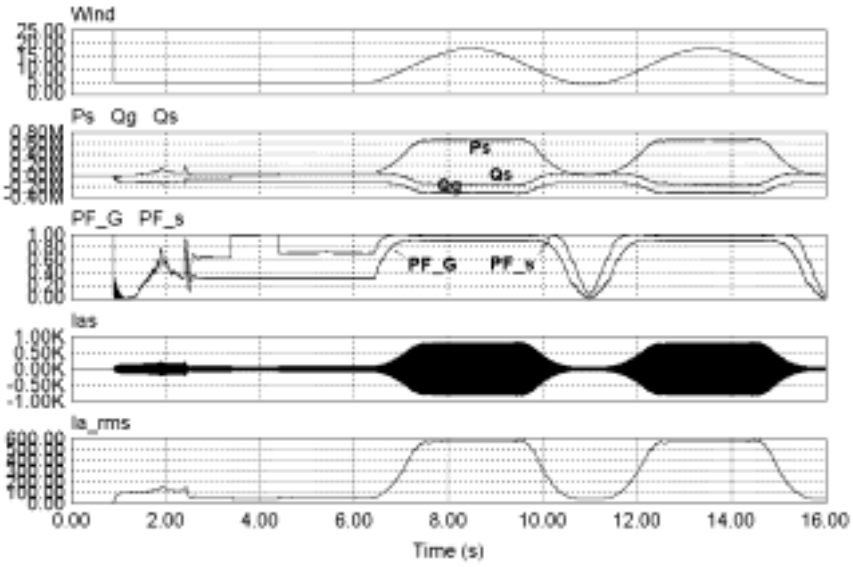


Fig. 14 Simulation results without static var compensator

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

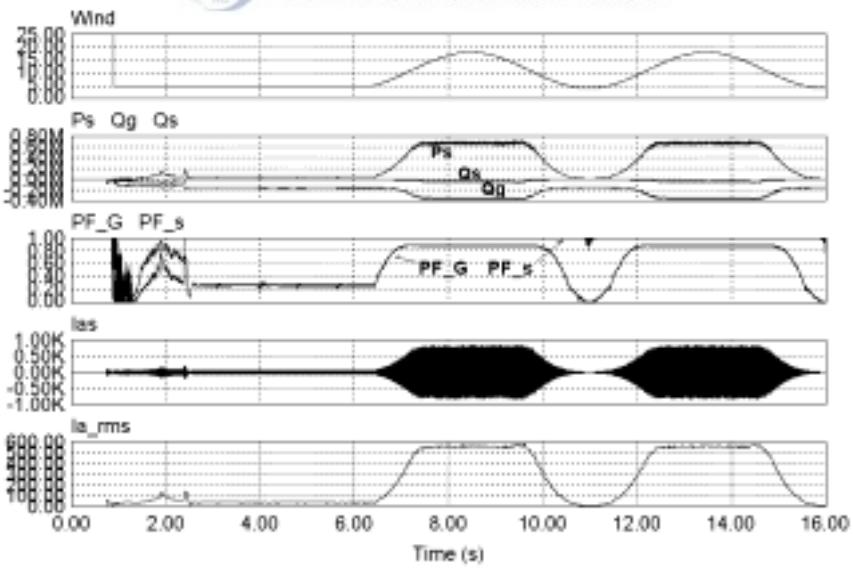


Fig. 15 Simulation results with static var compensator

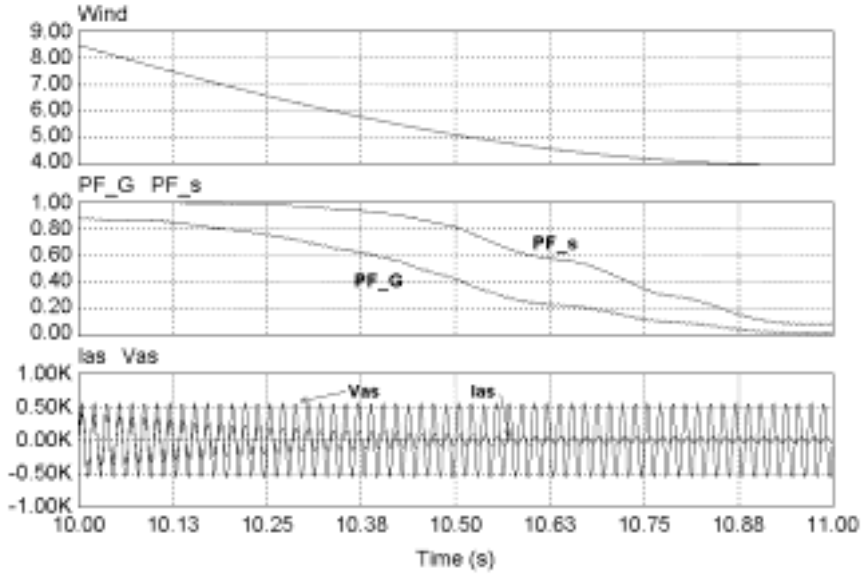


Fig. 16 Zoom of Fig. 14

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

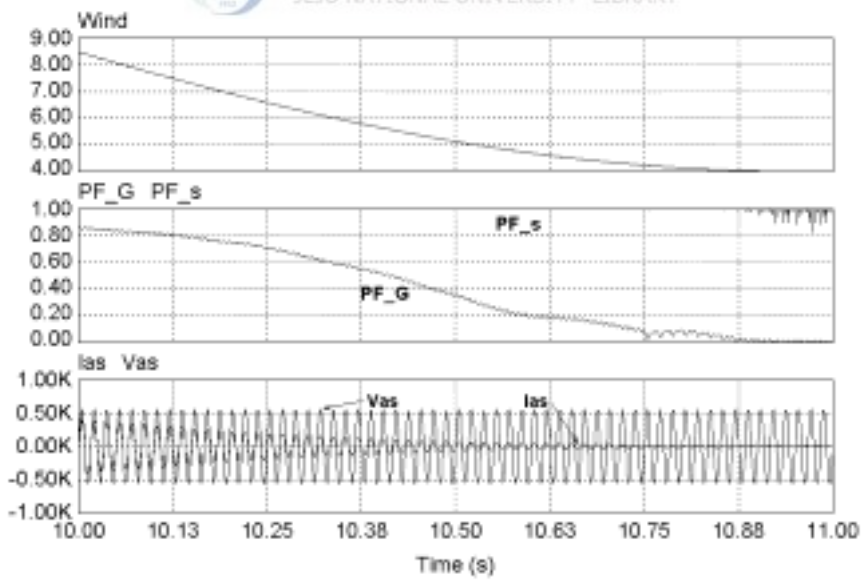


Fig. 17 Zoom of Fig. 15

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 제주도 행원 풍력 단지에 설치된 덴마크 Vestas 사의 V47-660 kW 풍력발전 시스템을 모델로 하여 실제 시스템 상에서 측정된 역률 특성과 무효전력 보상 시스템을 모델 시스템에 적용하였을 때의 역률 특성을 비교 분석하였다. 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.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이상의 결과를 토대로 풍력발전 시스템을 효과적으로 모델링하는 방법을 얻을 수 있었고 또한 기존 시스템에서 나타나는 저 풍속 운전하에서 역률이 현저히 떨어지는 원인을 규명할 수 있었다. 뿐만 아니라 제안한 시스템을 모델 시스템 상에 적용했을 때 보다 획기적으로 전원계통의 역률을 개선할 수 있음을 알 수 있어, 기존 행원 풍력발전 시스템에 적용하여 역률을 개선할 수 있다는 것을 알 수 있고 또한 새로운 시스템을 개발할 때 풍력발전 시스템의 설계 및 해석 시 크게 도움이 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

B. K. Bose, 1988, Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, pp. 207~231.

C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, 1993, Experimental Evaluation of a Variable Speed Doubly-Fed Wind Power Generation System, IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp. 480~487.

F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, 1991, D-Q Analysis of a Variable Speed Doubly AC Excited Reluctance Motor, Electric Machines and Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 125~138.

F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, 1991, Transient Model of a Doubly Excited Reluctance Motor, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, pp. 126~133.

G. H. Choe, 1986, Analysis an Control of Active Power Filter with Optimized Injection, in Conf. Rec. IEEE PESC, pp. 401~409.

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.

J. H. Choi, 1989. 7, Instantaneous Reactive Power Compensator Using Current Controlled PWM Converter, Trans. KIEE, Vol. 38, No. 7, pp. 539~548

제주대학교 중앙도서관

L. Xu and Tang Y. Tang, 1992, A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Fed Excited Brushless Reluctance Machine, IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp. 408~413.

L. Xu, Li Zhen and E. H. Kim, 1998, Field Orientation Control of a Doubly Excited Brushless Rluctance Machine, IEEE Trans. Appl., Vol. 34. No. 1, pp. 148~155.

M. Yamamoto and O. Motoyoshi, 1991, Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator, IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 6, No. 4, pp. 624~629.

VESTAS Manual, 2000.

X. Xu, Rik De Doncker and Donald W. Novotny, 1998, A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive, Proc.of IEEE PESC, pp. 870~876.

고지호, 2000. 6, PWM 전력 컨버터를 이용한 배전용 무효전력 보상기 제어, 제주대학교 석사학위 논문.

김용현, 김일환, 2000, 풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451~458.

전영진, 2002. 12, 제주행원 풍력발전 시스템의 모델링 및 해석, 제주대학교 석사학위 논문.

풍력발전 Q&A, 2000. 2, 日本 Ohm社.

허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서.

제주대학교 중앙도서관

감사의 글

2년여 동안의 대학원 석사 과정동안 전공에 대한 인식을 넓히고 전기 전공자로서의 길을 갈 수 있는 시기가 되었던 소중한 시간들이 떠오릅니다. 이러한 2년의 시절이 저의 삶에서 큰 소중한 시간으로 남을 수 있도록 매사에 최선의 모습으로 생활하고자 다짐합니다. 진심으로 감사합니다.

부족한 저를 이끌고 이 논문을 완성하도록 많은 지도와 가르침을 주신 김일환 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 본 논문을 심사하시면서 아낌없는 조언과 관심을 기울여 주신 좌종근 교수님과 김호찬 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 또한 학부와 대학원 과정 동안 학업과 제가 대학생활을 활기 있게 할 수 있게 해주신 오성보 교수님, 김세호 교수님. 이개명 교수님께도 감사드립니다. 또한 행원 풍력발전 연구를 하는 동안 많은 격려와 힘을 주셨던 허종철 교수님께도 감사드립니다.

2년여 동안 저의 선배이자 대학원 입학 동기였던 전영진 선배에게 친구 이상의 정을 주었던 것에 감사하고 같은 연구실에서 본 논문이 나오기 까지 함께 고생하고 노력했던 박성기 대학원생에게도 감사드립니다. 지금은 졸업했지만 연구실에서 부족한 전공지식을 넓히게 도왔던 김재홍 선배와 많은 다양한 지식들을 나눌 수 있었던 김도진 선배에게도 감사하며 지금도 아낌없는 조언을 해주는 부창진 대학원생에게도 감사합니다. 또한 같은 위치에서 열심히 대학원 생활을 하고 모범을 보이고 있는 김태한, 강찬호, 부찬혁, 양익준, 고민철 대학원생과 산업대학원생 분들께도 감사를 드립니다. 또한 석사 과정동안 행정적으로 많은 도움을 주었던 강시훈 조교와 현여숙 조교에게도 감사드리고 연구실내에서 많은 조언과 관심을 보여주었던 양승훈 선배와 강인봉 학부생에게도 감사를 드립니다.

여러모로 관심과 사랑을 보여주었던 제 절친한 선배, 친구, 후배들과 영어회화반 동아리 선, 후배들에게도 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 대학원에 대한 희망과 꿈을 선사하고 지금도 물심양면으로 자식에게 최선을 다하시는 사랑하는 부모님께 그리고 언제나 나를 사랑하는 누이동생들에게도 진심어린 감사의 마음을 전합니다.