碩士學位論文

PSCAD/EMTDC에 의한 한경풍력발전단지의 모델링과 해석

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

電氣工學 專攻

李 春 雨

2009

碩士學位論文

PSCAD/EMTDC에 의한 한경풍력발전단지의 모델링과 해석

指導敎授 金 一 煥

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

李 春 雨

2009

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
제주대학교
dCollection @ jeju

PSCAD/EMTDC에 의한
한경풍력발전단지의 모델링과 해석

指導敎授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009 年 12 月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 電氣工學 專攻

李 春 雨

李春雨의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2009 年 12 月 日

委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
제주대학교
dCollection @ jeju

목 차

그림목차 ····· ii

표목차 ····· iii

SUMMARY ····· iv

Ⅰ. 서 론 ····· 1

Ⅱ. 제주지역의 전력계통 및 풍속특징 ····· 3

2.1 제주 전력계통 ····· 3

2.2 제주지역의 풍속 특성 ····· 5

2.3 한경풍력단지 연중 풍황 추이 ····· 6

Ⅲ. 컴퓨터 해석 ····· 8

3.1 풍력 터빈 시스템 ····· 8

3.2 풍력 발전단지 모델링 ····· 16

3.3 해석결과와 고찰 ····· 18

Ⅳ. 결 론 ····· 26

참 고 문 헌 ····· 27

Collection @ jeju

그 림 목 차

그림 1. 제주지역 전력계통도('09년 10월 기준, 전력거래소) ····· 3
그림 2. 제주지역 풍속자원 분포 ····· 5
그림 3. 한경풍력단지 풍속 특성 ····· 6
그림 4. 한경풍력단지 이용률 현황('05년~'09년 10월) ····· 7
그림 5. NEG-MICON 1.5MW 모델링 ····· 15
그림 6. VESTAS 3.0MW 모델링 ····· 16
그림 7. 한경풍력단지 계통의 PSCAD/EMTDC 모델 ····· 18
그림 8. NEG-MICON 1.5MW 실측 결과 ····· 19
그림 9. NEG-MICON 1.5MW 시뮬레이션 결과 ····· 19
그림 10. VESTAS V90 3.0MW 실측 결과 ····· 20
그림 11. VESTAS V90 3.0MW 시뮬레이션 결과 ····· 21
그림 12. 한경풍력발전단지 가변풍속 ····· 21
그림 13. 한경풍력 1단계 출력(6MW) ····· 22
그림 14. 한경풍력 2단계 출력(15MW) ····· 23
그림 15. 한경 풍력발전단지 출력(21MW) ····· 23
그림 16. 풍력발전이 연계된 한림변전소 배전선로 #1의 전압변동 ····· 24
그림 17. 풍력발전이 연계된 한림변전소 배전선로 #2의 전압변동 ····· 25

Collection @ jeju

표 목 차

표 1. 제주 전력계통 현황(2009, 11월기준) ····· 4
표 2. NEG-MICON 1.5MW 풍력터빈 시스템의 사양 ····· 14
표 3. V90 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양 ····· 15

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
제주대학교
JEJU 1952

dCollection @ jeju

Modeling and Analysis of Hankyung Wind Farm using PSCAD/EMTDC

Chun-Woo Lee

Department of Electrical and Electronic Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

Supervised by professor Eel-Hwan Kim

Summary

This paper presents the modeling and analysis of Hankyung wind farm connected with 3MW DFIG and 1.5MW opti-slip type wind turbine system. For the computer simulation, three kinds of main items are modeled, which are 21MW wind farm, power transformer, transmission line and power load.

To analyze the charactreistics of output of the wind power generation to the Jeju power system, two kinds of simulations are carried out by using the PSCAD/EMTDC program. One is the steady

dCollection @ jeju

state operation under the variable speed wind, and the other is one T/L line ground fault when all of wind farms in Hankyung operated steady state under the rated power output.

With the comparison of these results, it is useful for analyzing the characteristics of power system versus wind power generation according to variable speed wind.

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
JEJU 1952
제주대학교

Collection @ jeju

Ⅰ. 서 론

세계 각국은 자국의 녹색성장을 위한 정책강구가 활발하다. G7 등 선진국을 중심으로 신에너지정책을 최우선 국책과제로 채택하고, 탄소가스 배출 의무 감축량 시대로 접어들면서 유엔 등 상호 감시체제 구축을 통한 규제를 강화하고 있다. 한발 짝 더 나아가서 탄소 배출권 거래에 관한 매커니즘 개발로 인하여 전 세계적으로 풍력발전에 대한 수요가 폭증하고 있다.

이러한 추세에 부응하여 우리나라에도 신재생에너지 보급 확대를 위해 선진국에서 실시되고 있는 신재생에너지 의무 할당제(RPS, Renewable Portfolio Standards)제도를 도입하여 2012년도부터 에너지 사업자에게 2%이상 신재생에너지로 충당하도록 하는 법적제도를 시행 할 예정이다. 뿐만 아니라 정부의 신재생에너지 발전차액 보전 제도로 인하여 풍력발전에 대한 관심과 설비증가가 큰 폭으로 증가하고 있다.

그러나 우리나라에서 경제성 있는 풍력발전이 가능한 지역이 한정되어 있으며, 제주도와 강원산간, 그리고 서해안 일부 지역 정도로 국한되어 있다. 이러한 여건 속에서 풍황이 우수한 한정된 지역을 선점하고자하는 경쟁이 심화되고 그중 제주도는 풍황이 우수해 많은 개발자들이 제주지역에서 풍력사업을 타진하고 있다. 그렇지만 면밀히 검토해보면 제주 지역내 풍력발전을 할 수 있는 곳이 동부지역과 서부지역으로 국한되어 있다[1].

특히 제주지역의 동서부 지역들은 전력부하가 적은 지역으로 변전 설비용량이 크지 않다. 이러한 이유 때문에 풍력발전 접속 용량이 한정 될 수도 있고 또한 접속시 풍력설비 특성상 급격한 출력변화에 따른 접속 선로에 전력품질을 떨어뜨릴 가능성이 커진다[2][3].

따라서 본 논문에서는 전력전자 시스템응용과 전력계통 해석을 하기가 쉬운 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 한경풍력단지에 설치된 NEG-MICON 기종의 1.5 MW, 그리고 VESTAS V90 3.0W 급 D그림 발전

Collection @ jeju

기의 구성요소들을 모델링 후에 시뮬레이션 결과를 실측치와 비교검토 함으로써 풍황 변화에 따른 출력변동 시 나타나는 유효, 무효전력, 역률의 상관관계를 검토하였다. 아울러 총 출력 21 MW의 풍력단지와 연계된 전용선로 및 한림변전소를 대상으로 모델링하고, 풍력단지 적정설계 여부판단의 근거를 컴퓨터 해석을 통하여 분석하고자 한다.

이때, 제주 154kV송전선 및 화력발전소, HVDC는 주파수 운전 모드로 정상동작한다고 가정하였다.

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
제주대학교
JEJU 1952

dCollection @ jeju

Ⅱ. 제주지역의 전력계통 및 풍속특징

2.1 제주 전력계통

제주지역은 좁은 지역이면서도 다양한 종류의 발전원을 가지고 있다. 그림.1에 나타낸 것처럼 기간 발전시스템으로 제주화력의 기력발전과 내연발전, 남제주발전소의 내연과 기력발전, 한림발전소의 복합발전 그리고 육지 계통과 연계된 직류고압 송전 시스템이다. 뿐만 아니라 최근에는 신재생에너지에 의해 풍력발전, 태양광발전, 그리고 폐기물 가스 발전 등 다양한 종류의 분산전원이 운영되고 있다. 2009년 제주지역의 총부하중 약 40 % 정도인 150 MW는 연계선에서 부담하고, 나머지는 발전원가에 의한 경제급전운용으로 수요에 맞게 저 원가 발전소 순으로 가동되는 형태이다. 표 1은 2009년 11월 기준 제주전력계통의 발전원별 점유율과 용량을 나타내고 있다.

발전기명	설비용량(MW)
조상기	110
합계	110

발전기명	설비용량(MW)
#2 · 3T/P	150
#3G/T	55
#1,2D/P	80
합계	285

발전기명	설비용량(MW)
신재생	79

발전기명	설비용량(MW)
#1 · 2G/T	70
ST	35
합계	105

발전기명	설비용량(MW)
#3 · 4T/P	200
#1~4D/P	40
합계	240

그림 1. 제주지역 전력계통도('09년 10월 기준, 전력거래소)

dCollection @ jeju

표 1. 제주 전력계통 현황(2009, 11월기준)

발전원	기력	내연	복합	GT	풍력	태양광	LFG	연계선	계
용량[MW]	350	120	105	55	46	1.3	1.0	150	828.3
점유율[%]	42.25	14.48	12.67	6.64	5.55	0.17	0.12	18.1	100

부하 측면으로 보면 제주지역의 부하특성은 대형 플랜트설비가 없고 관광과 연계된 설비와 농수축산분야 그리고 가정용 부하로 이루어지고 있다. 이런 부하 특성은 최대부하와 기저 부하와의 차가 큰 특성을 가진다. 2009년도에는 하계 최대부하가 57만 7000 kW, 년중 최저부하 37만 2000 kW로 차가 약 20만 kW 정도로 변동폭이 매우 크다. 이러한 계절별, 시간대별 전력수요의 특징의 당분간 지속될 전망이다.

최근 제주도의 우수한 풍황자원을 이용한 풍력발전단지 개발이 활발하고 전체 발전원 중에서도 풍력발전이 차지하는 점유율이 점차 증가하는 추세이다. 특히, 한라산을 중심으로 동부지역과 서부지역이 년 평균 풍속이 약 7 m/s 정도로 나타나고 있어 풍력발전에 우수한 풍황자원을 가지고 있어, 향후 풍력발전설비는 지속적으로 증가될 전망이다.

하지만 제주도의 년 중 풍황분포를 보면 동계에는 평균 8 m/s 이상으로 풍황이 좋은 반면 하계에는 5~6 m/s의 저조한 기록을 보이고 있다. 풍력을 포함한 신재생에너지는 중앙급전의 통제를 받지 않는 상시 기저 발전기로 운용되고 있기 때문에 이러한 불규칙적인 출력특성은 계통운영 측면에서 봤을 때 풍력발전에 기인한 여러 가지 특성요인을 검토할 필요성이 있다. 이런 맥락에서 최근 제주지역에서 풍력발전에 대한 용량검토 등 계통안정도를 높일 수 있는 다양한 방안이 모색되고 있다.

dCollection @ jeju

2.2 제주지역의 풍속 특성

그림.2는 제주도의 육·해상 바람지도는 나타낸 것이다. 제주 지형적 특성상 가장자리에 특히 우수한 풍황자원 보유율 보이고 있다. 년 평균 풍속 7.0 m/s 이상으로서 풍력단지 조성에 최적지로 손꼽히고 있다. 이와 같은 풍황자원 특성 때문에 현재 제주지역에서의 풍력발전 단지건설은 성산을 중심으로 한 동부지역과 한경을 중심으로 한 서부지역에 편중되어 추진되고 있는 실정이다.

한편, 한라산을 중심으로 북쪽과 남쪽의 내륙 및 해상지역은 년 평균 풍속 4.5~5.5 m/s 지역으로 비교적 바람 자원이 저조한 곳으로 예상된다.

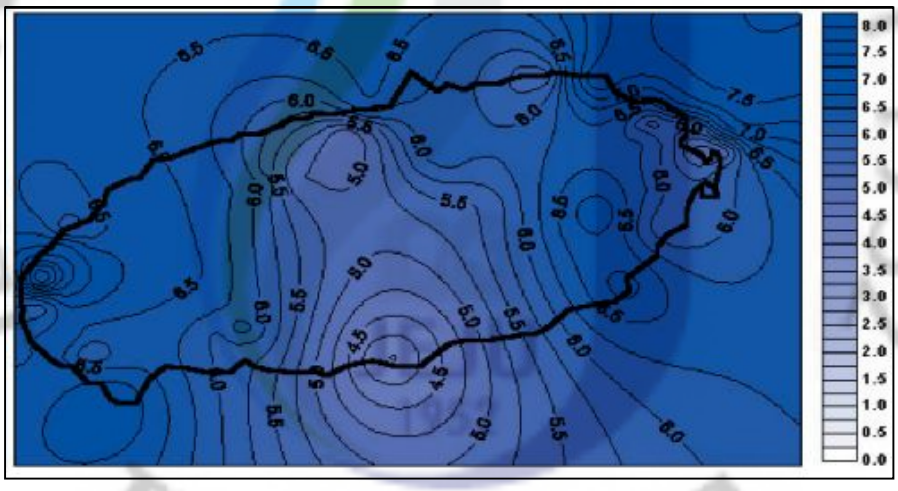

그림 2. 제주지역 풍속자원 분포

dCollection @ jeju

2.3 한경풍력단지 연중 풍황 추이

그림.3은 한경 풍력단지의 년간 풍속 자료로써 '08년 1월 1일 부터 12월 31일까지의 일별 평균풍속의 추이를 고찰한 것이다. 아울러, 동 자료를 토대로 년 간 발전 가능지수를 얻기 위해 날짜와 상관없이 일별 평균풍속이 최대부터 내림차순으로 정렬하여 전력생산이 가능한 풍속 4 m/s 이 되는 일수를 산출 할 수 있도록 나타내고 있다. 한경단지는 대략 년 70% (265일) 정도는 전력생산이 가능하고 나머지 30%는 발전 대기상태로 있다. 풍속 구간으로는 4~5 m/s에서 점유시간이 가장 많고, 풍속이 올라갈수록, 점차 점유시간이 줄어든다.

이 그림에서 보면 5월부터 10월 까지는 풍속이 전반적으로 낮게 나타나고 있으며 그 이외에는 풍속이 증가하고 있음을 나타내고 있다. 이는 제주지역의 북서풍이 부는 계절풍의 영향을 크게 받는다고 볼 수가 있다.

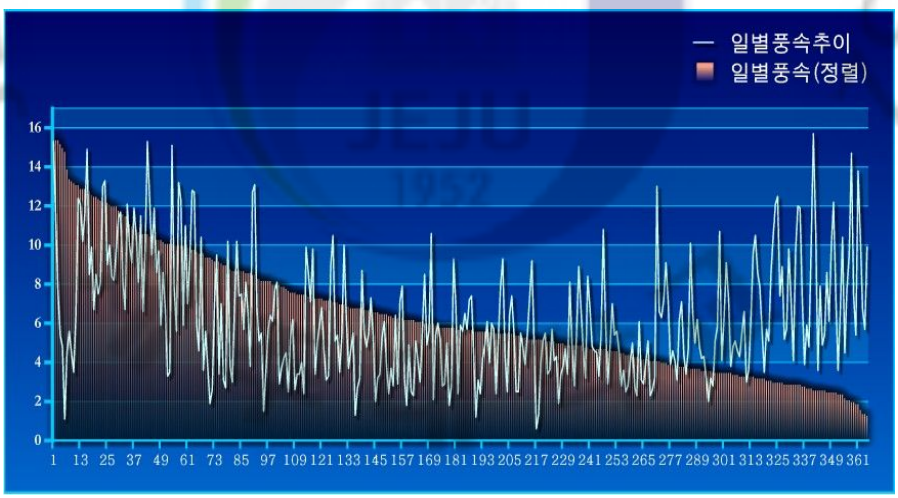

그림 3. 한경풍력단지 풍속 특성

dCollection @ jeju

그림.4는 최근 5년간 한경풍력발전단지의 월별 이용률을 나타내고 있다. 11월부터 3월 까지는 연평균 풍속이 6/7 m/s로 주 풍향인 북서풍의 바람자원이 우수하여 이용률이 30% 이상을 나태내고 있다. 하지만 그 이외의 달에는 20% 미만대를 나타내고 있다. 이는 한경 풍력단지 풍속특징이 하절기와 동절기의 뚜렷한 풍속변화가 나타나고 있음을 나타내고 있다.

이 같은 출력특징은 제주계통측면에서 봤을 때 여름철 중부하시 안정적인 전원으로서 역할이 크게 떨어지고 있는 것으로 나타나고 있다.

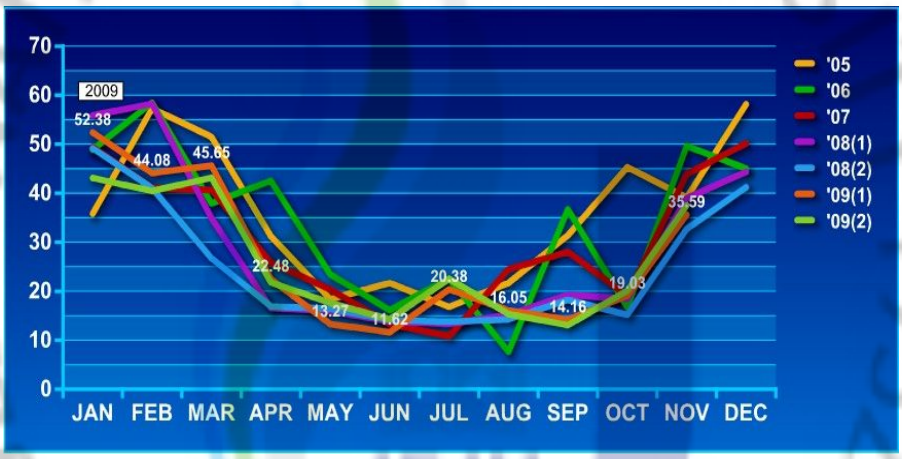

그림 4. 한경풍력단지 이용률 현황('05년~'09년 10월)

Collection @ jeju

Ⅲ. 컴퓨터 해석

3.1 풍력 터빈 시스템

3.1.1 바람 모델

바람은 날씨와 지형지물 등 다양한 요소의 영향을 받아 풍향과 풍속이 결정된다. 이러한 이유 때문에 바람의 특성을 정확하게 실시간으로 예측하거나 모델링 하는 것은 아주 어렵다. 그래서 연구용 바람모델은 사용목적에 따라 다양한 형태로 만들어진다. 본 논문에서의 바람 모델은 평균풍속, 거스트 풍속, 램프함수 특성을 갖는 풍속, 그리고 노이즈 특성을 갖는 풍속이 포함된 모델을 사용하였으며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$V_w = V_b + V_g + V_r + V_n \tag{1}$$

여기서, V_b : 평균풍속 [㎧]

V_g : 거스트 풍속 [㎧]

V_r : 램프함수 특성을 갖는 풍속 [㎧]

V_n : 노이즈 특성을 갖는 풍속 [㎧]

식(1)에서 평균풍속 V_b는 일정한 상수값을 가지며, 거스트 풍속 V_g는 식(2)과 같은 수식으로 표현되는 성분이다.

$$V_g = V_{\cos} \quad T1_g < t < T1_g + T_g \tag{2}$$

dCollection @ jeju

단, $V_{\cos} = (MAX_g/2)1-\cos 2\pi[(t/T_g)-(T1_g/T_g)]$

$V_{\cos} = 0 \qquad t < T1_g \ , \quad t > T1_g + T_g$

MAX_g : 거스트 최대값 [㎧]

T_g : 거스트 주기 [s]

$T1_g$: 거스트 시작점 [s]

t : 시간 [s]

램프풍속은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_r = V_{ramp} \qquad T1_r < t < T2_r \tag{3}$$

$$V_r = 0 \qquad t < T1_r \ , \quad t > T2_r$$

단, $V_{ramp} = MAX_r[1-(t-T2_r)/(T1_r - T2_r)]$

MAX_r : 램프최대값 [㎧]

$T1_r$: 램프시작시간 [s]

$T2_r$: 램프최대시간 [s]

마지막으로 랜덤노이즈 풍속은 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_n = 2\sum_{i=1}^{N}[S_v w_i(\triangle w)^{\frac{1}{2}}]\cos(w_i + \Phi_i) \ , \quad t > 0 \tag{4}$$

Collection @ jeju

단, $w_i = (i - \frac{1}{2}) \triangle w$

Φ_i : 0 과 2π 사이에서 랜덤 변수 값

그리고 함수 $S_v(w_i)$는 Varicaitis에 의해 정의된 스펙트럼밀도 함수로써 다음식과 같다[5].

$$S_v(w_i) = W \frac{2K_n \cdot F^2 \cdot [w_i]}{\pi^2 [1 + F \cdot w_i / (u \cdot \pi)^2]^{\frac{4}{3}}} \quad (5)$$

단, K_n : 표면 입자 계수

F : 튜뷰런스 높이 [m]

u : 기준 높이에서의 평균 풍속값 [㎧]

3.1.2 풍력발전기 모델링

풍력터빈의 회전자는 바람의 갖는 에너지를 기계적인 회전 토오크로 발생시키는 블레이드부와 여기서 발생된 토오크를 발전기에 전달하는 축계부로 구성된다. 축계부분에는 블레이드와 발전기를 연결하는 축과 기어로 이루어진다. 축 관성과 기어의 백래쉬 성분은 블레이드의 큰 관성으로 인한 기계적인 시정수 때문에 회전자 시스템 전체적으로 보았을 때 블레이드의 토오크 출력을 발전기에 전달하는 과정에서의 영향은 아주 미미하다. 이러한 이유로 인하여 본 논문에서는 회전자 모델링시 이 부분을 무시하였다.

블레이드는 굉장히 큰 관성을 가지는 공기역학적 시스템으로 랜덤하게 부는 바람에 대해서 발생하는 출력 토오크를 정확하게 수학적으로 모델링하는 것은 쉽지가 않다. 그래서 풍력터빈의 회전자 시스템을 해석 할 때는 풍속에

Collection @ jeju

대한 전기적인 출력곡선을 이용하는 방법과, 식 (6)과 같이 풍속에 대한 블레이드의 회전속도 비를 나타내는 주속비 λ에 대해서 블레이드의 피치 제어각에 따른 출력계수 $Cp(\lambda,\theta)$ 값을 이용하는 방법이 있다[5][6].

$$\lambda = R \cdot \frac{w_m}{v_w} \tag{6}$$

단, Vw : 풍속 [㎧]

ω_m : 블레이드의 기계적인 각속도 [rad/s]

R : 블레이드 반경 [m]

여기서 전기적인 출력 특성곡선을 이용하는 방법은 블레이드와 바람의 공기역학적인 상호작용과 주속비 λ 에 대한 회전자의 공기역학적 효율을 무시하고, 최적의 Cp 값을 갖는 시스템으로 가정하여 풍속에 대한 출력 값을 이용하는 것이다. 이 곡선을 이용하면 풍속에 대한 출력을 얻기가 간단하여 풍력터빈 시스템을 모델링하는 것은 아주 쉽다는 장점이 있다. 하지만 풍속의 변화에 대한 공기역학적 변환과정이 무시되어 블레이드의 피치 제어부분을 생략하는 것이 된다. 이것은 풍력터빈 시스템에서 중요한 블레이드의 피치각 제어특성을 알지 못하는 큰 단점을 가진다. 반면에 출력계수 $Cp(\lambda,\theta)$값을 이용하는 방법은 블레이드의 공기역학적 출력계수를 식(8)과 같이 주속비 λ와 피치각 θ의 함수로 나타내고, 주속비 λ에 대해 각각의 피치각에 따라 출력계수 Cp 값을 얻어 식(9)와 같이 토오크 출력을 얻는 방법이다. 이 방법은 바람과 블레이드의 공기역학적 특성을 좀더 정확하게 해석할 수 있다는 장점을 가지는 반면에, $Cp(\lambda,\theta)$의 함수를 정확하게 얻어내는 것이 쉽지 않다는 단점을 가진다.

Collection @ jeju

$$Pw = \frac{1}{2}\rho C_p(\lambda,\theta) A v_w^3 \eta \quad [\mathrm{W}] \tag{8}$$

$$T_w = \frac{Pw}{\omega_m}[N \cdot m] \tag{9}$$

단, Tw : 기계적인 발생 토오크 [N·m]

Pu : 터빈에서 얻어지는 에너지 [W]

ρ : 공기 밀도 [kg/㎥]

Cp : 블레이드에 따른 출력계수

A : 블레이드 회전 통과 면적 [㎡]

η : 시스템 효율

현재까지 국내에 설치되어 있는 대형 풍력발전기는 주로 프로토 타입의 수평축 3 Blade 형식이다. 대부분 외국산으로 덴마크의 VESTAS社 제품이다. 한경풍력단지는 NEG-MICON社의 1.5MW급 4기와 Vestas社 3.0MW급 5기로 구성된 총 용량 21MW 발전단지이다.

설비 구성으로 보면 회전을 위한 양력을 일으키는 날개, 회전력의 전달과 증속을 위한 기어박스, 전기변환을 위한 발전기로 구성되며, 계통연계 및 보호를 담당하는 컨트롤러, 그 밖의 부대설비로 구성된다. 모델링을 위한 풍력발전기 제어모델은 전력용콘덴서에 역률제어를 하는 NEG-MICON 1.5MW 시스템과 회전자에 채용된 컨버터시스템에 의한 출력제어와 역률을 제어하는 V90 3MW DFIG(Doubly Fed Induction Generator)방식을 적용하였다. 아울러, 풍력단지 구·내외 연계선로 구성요소와 변전소의 연계 접속점까지의 가급적 모든 구성요소를 모델링에 반영하였으며, 분석Tool은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였다

한경풍력발전 단지에 설치되어 운용되고 있는 시스템은 날개 제어방식에 따라 스톨제어와 피치제어로 되어 있다. 이러한 형태를 전부 실제 데이터를

Collection @ jeju

가지고 모델링하는 것은 어렵다. 그리고 계통 측면에서 보면 개개의 풍력발전기의 보다는 단지 출력으로 계통에 공급되기 때문에 계통의 과도 특성이나 정상상태 특성을 해석하는 경우에는 발전기 형태별 대표 모델을 선정하여 모델링하고 이를 이용하여 단지를 모델링하는 것이 효과적으로 볼 수 있다.

그래서 본 논문에서는 한경 풍력발전단지에서 풍력터빈시스템 모델 구현은 제 1단계 사업에서 구축된 표 2와 같은 정격을 갖는 NEG-MICON 1.5MW, 2단계 사업에서 표 3과 같은 정격을 갖는 Vestas V90 3MW 시스템을 선정하여 실제 출력 데이타를 가지고 풍속에 대한 토오크를 발생할 수 있도록 그림.5와 그림.6과 같이 구현하였다. 1.5MW 시스템은 유도발전기를 채용하였기 때문에 역률개선용 콘덴서를 실제 시스템에 채용한 용량대로 적용하였다.

3MW DFIG 시스템 모델링에서는 DFIG 시스템 회전자 부분에 채용되는 전력변환용 시스템에 대한 모델링이 매우 복잡하고 또한 많은 해석시간을 요하기 때문에 등가 변환회로를 이용하여 해석하는 것이 훨씬 간편하고 용이하다. 그래서 본 논문에서는 그림6과 같이 PSCAD 프로그램에서 제공하고 있는 전류원 라이브러리를 이용하여 출력역률이 항상 1이 되게끔 PI 제어를 수행하고 또한 가변풍속에 대응하는 유효출력이 발생하도록 모델링을 구현하였다.

Collection @ jeju

표 2. NEG-MICON 1.5MW 풍력터빈 시스템의 사양

풍력터빈	제조사	NEG-MICON
	형식	NM72C/1500㎾
	시동풍속	4 ㎧
	종단풍속	25 ㎧
회전자	출력제어	스톨제어
	회전자직경	72 m
	허브높이	62 m
	회전수	17.3
블레이드	형식	그라스 파이버
	공기 브레이크	풀 블레이드
	잠영면적 (㎡)	4,072
기어박스	형식	유성기어장치
	기어비	1:70.2
발전기	정격출력	1500㎾
	극수	6
	정격전압/주파수	600V/60Hz
	정격전류	1607 A
요잉	형식	전기모터
제어기	형식	SCR제어형
타워	형식	강철판금 타워

Collection @ jeju

표 3. V90 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양

풍력터빈	제조사	VESTAS
	형식	V90/3000kW
	시동풍속	4 ㎧
	종단풍속	25 ㎧
회전자	출력제어	피치제어
	회전자직경	90 m
	허브높이	80 m
	회전수	9.9-16.1-18.4 가변속
블레이드	형식	강화 그라스 파이버
	공기 브레이크	기계브레이크
	잠영면적 (m^2)	6,362
기어박스	형식	유성기어장치
	기어비	1:109
발전기	정격출력	3000kW
	극수	4
	정격전압/주파수	1000V/60Hz
	정격전류	2103 A
요잉	형식	전기모터
제어기	형식	IGBT제어형
타워	형식	튜블러 타워

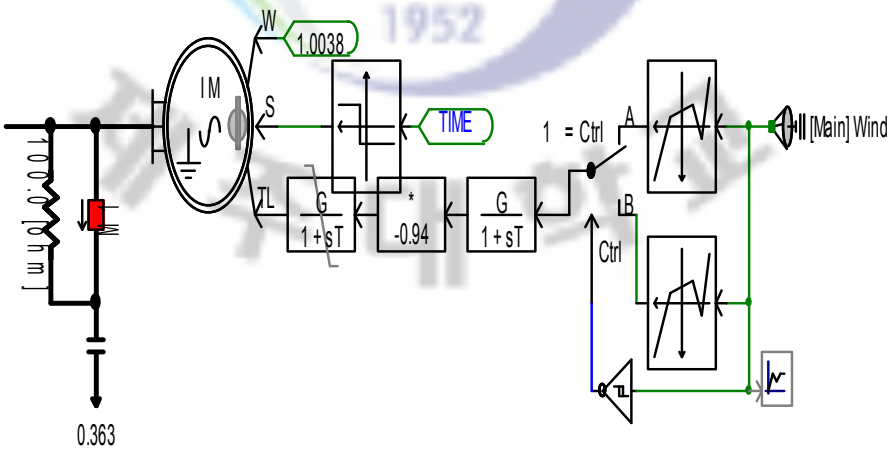

그림 5. NEG-MICON 1.5MW 모델링

dCollection @ jeju

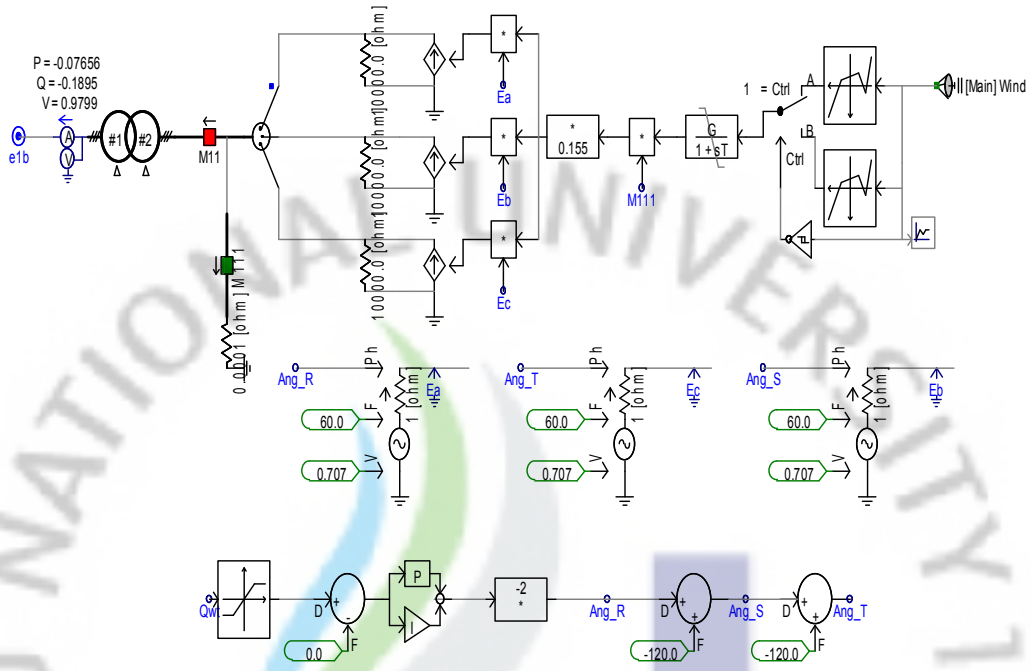

그림 6. VESTAS 3.0MW 모델링

3.2 풍력 발전단지 모델

한림변전소가 위치한 지역은 제주의 서부지역으로 제주 154kV 환산망 계통에서 제주 서부지역 부하를 담당한다고 볼 수 있다. 154/23kV 변압기 2대에 연계된 부하 선로는 22.9kV 정격전압을 갖는 애월 등 6개 DL에 연계되어 있다. 또한, 긍장 17.3km의 한경풍력 전용선로 2회선을 통해 각각 한경1단계, 한경2단계 풍력단지가 접속되어 있다. 이들 송전선로와 그 부속설비를 PSCAD 로 모델링하는 것은 이 프로그램에서 제공하고 있는 송전선 라이브러리를 이용하는데 그 중에서도 시퀀스 컴포넌트 방법을 이용하였다. 그림.7은 해석을 위해 한림변전소에 접속되는 풍력발전단지 1,2 단계 전용선로계통

dCollection @ jeju

의 PSCAD/EMTDC 모델을 나타낸 것이다. 한림변전소에는 1 BANK 용량이 30/40MVA 이고 전압 권수비 154/23 이며, YYD 결선으로 구성된 변압기가 2 BANK이다.

즉, No.1 TR, No.2 TR이 총 80MVA 용량을 갖도록 되어 있으며, No.1 에는 금악, 삼달, 한경, 청수 D/L과 한경 1단계 전용선로에 의해 6[MW] 용량의 풍력발전기가 연계되어 있다.

그리고 부하용량은 매시간 다르므로 정확한 값을 얻는 것이 쉽지 않다. 그래서 본 논문에서는 부하변동 값이 대략 10~30MW 정도를 가지므로 이를 바탕으로 하여 22.95+5.4j MW 로 모델링 하였다. No.2 에는 애월, 협재, 고내 D/L과 아울러 한경 2단계 전용선로에 의해 15MW 용량의 풍력발전기가 접속되어 있으며 부하가 25.5+5.4jMW로 가정하여 모델링하였다.

dCollection @ jeju

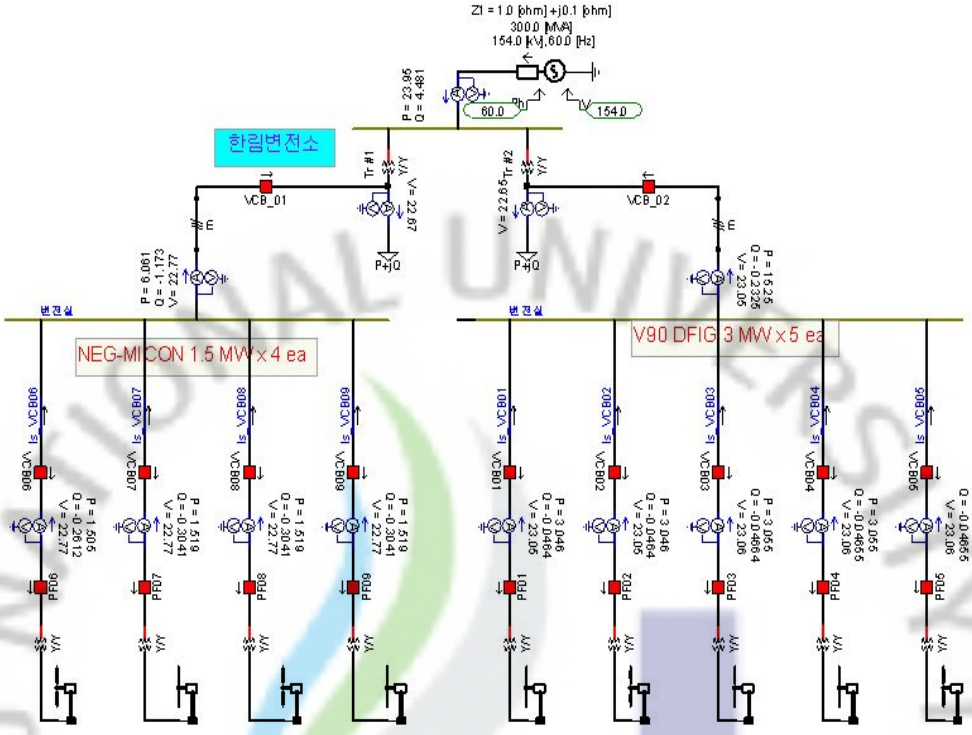

그림 7. 한경풍력단지 계통의 PSCAD/EMTDC 모델

3.3 해석결과와 고찰

한경풍력발전단지 해석을 위하여 1.5MW 4기, 3MW 5기 총 21MW 용량의 풍력발전시스템으로 구성하여 가변풍속을 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 기종별 풍력발전시스템의 동특성을 검증하기 위해 2009년 1월부터 2009년 7월 까지 실제 출력된 측정 데이터를 가지고 풍속에 대해 유효전력과 무효전력의 출력 특성을 비교하였다. 그림.8과 그림.9는 1.5MW 시스템에 대해 실제 측정해서 얻은 출력 값과 모델 시스템을 모델링해서 컴퓨터 해석한 결과 값을 0.1m/s 간격으로 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 실측결과에서는 약 13-14m/s에서 정격에 도달하고 있고 시뮬레이션에서는 14m/s에서

Collection @ jeju

도달하고 있어 약간의 오차가 존재하지만 실측치와 시뮬레이션 결과가 양호한 결과를 나타내고 있다.

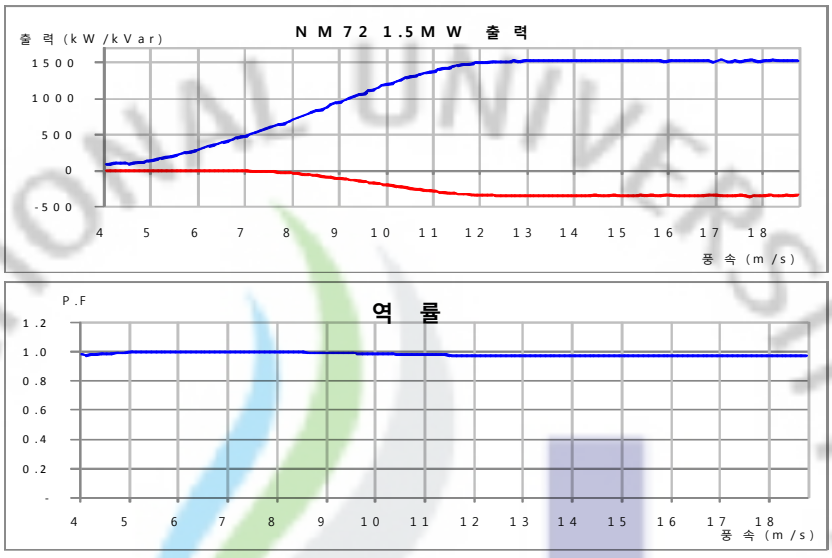

그림 8. NEG-MICON 1.5MW 실측 결과

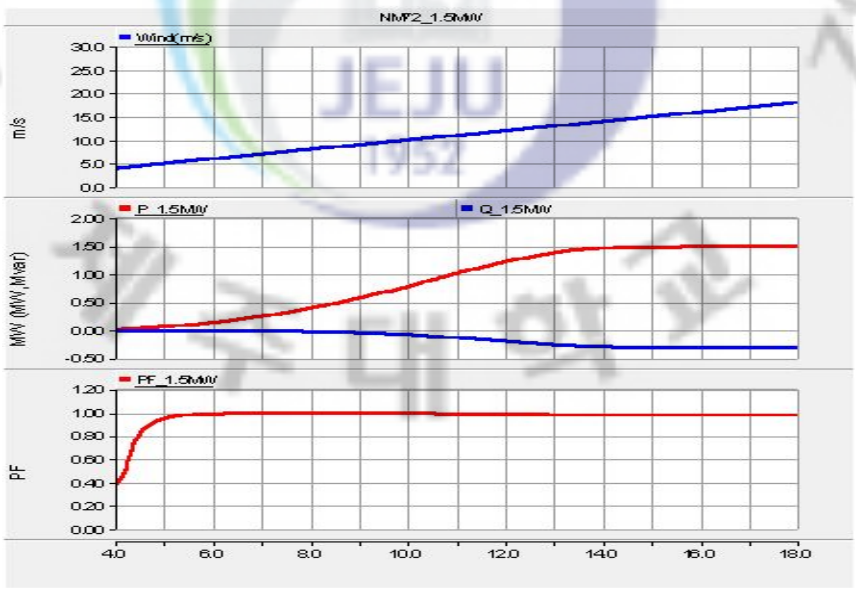

그림 9. NEG-MICON 1.5MW 시뮬레이션 결과

dCollection @ jeju

그림.10과 그림.11은 3MW 시스템에 대한 실측치와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 가변풍속에 대한 두 결과가 거의 일치하여 3MW 풍력발전시스템 모델링 구현이 양호하게 이루어졌음을 나타내고 있다. 다만 발전기 기동 후 초기 병입 연계시 역률은 시뮬레이션 해석 값이 다소 낮은 결과를 보였으며, 이는 실제 발전기들의 접속점이 동일하여 다중의 발전기가 한곳에 연계됨으로써 개별 역률측정 이 불가한데 기인한 것으로 보인다.

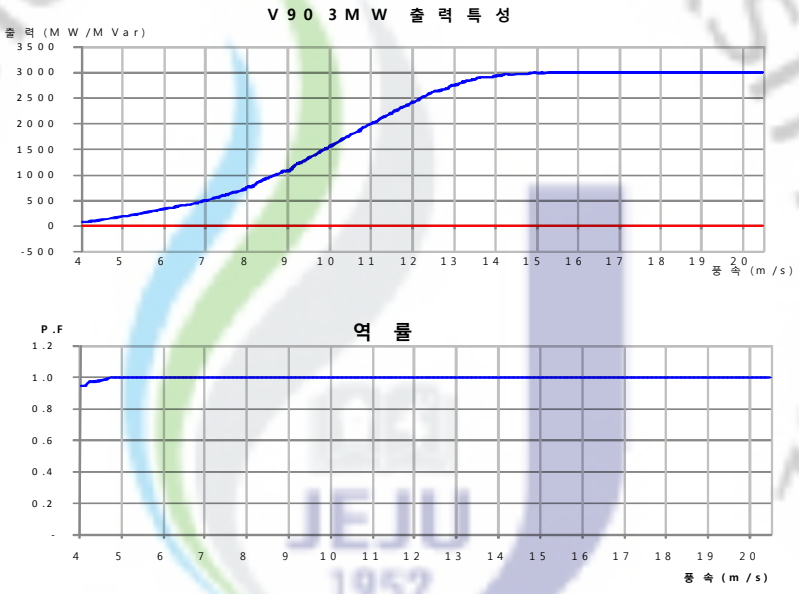

그림 10. VESTAS V90 3.0MW 실측 결과

dCollection @ jeju

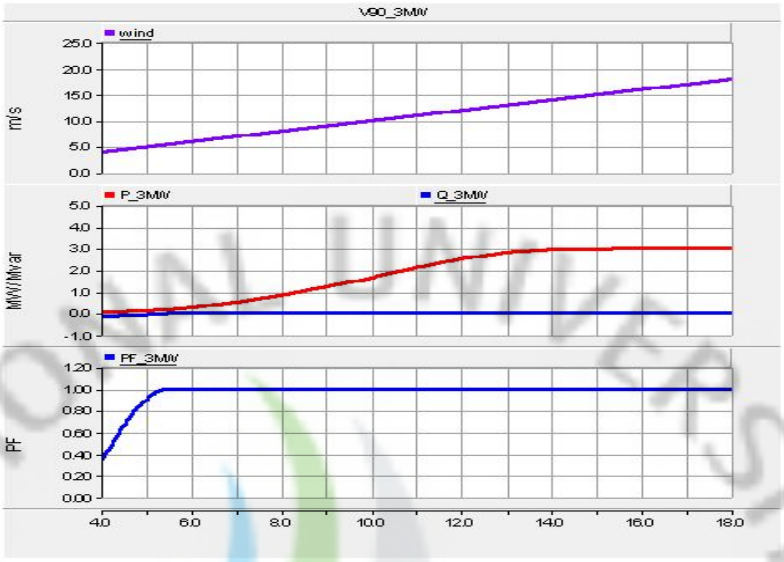

그림 11. VESTAS V90 3.0MW 시뮬레이션 결과

본 논문에서 한경 풍력단지를 대상으로 가변풍속에 따른 출력특성 결과를 해석하기 위하여 바람모델은 식(1)-(5)을 이용하여 평균풍속을 13m/s 로 하였고 이를 이용하여 가변풍속 출력을 나타낸 것이 그림.12이다.

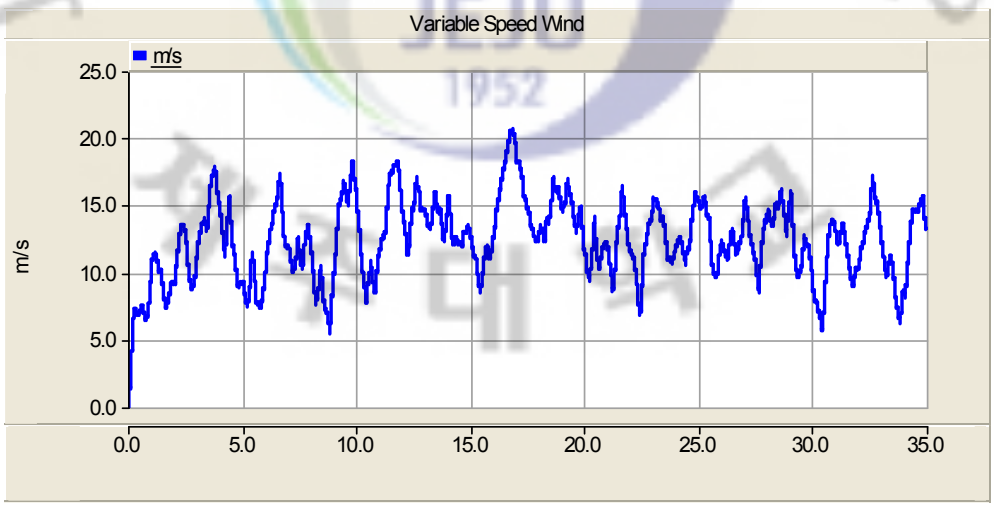

그림 12. 한경풍력발전단지 가변풍속

Collection @ jeju

그림.13은 한경 1단계 6MW 용량의 단지에 그림12와 같은 가변풍속을 적용하였을 때의 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 유효전력이 최대풍속에 대해서 최대 약 6MW 로 나타나고 있어 모델링 구현이 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 무효전력은 용량이 일정한 전력용 콘덴서에 의해서 이루어지고 있기 때문에 시동풍속에서는 무효전력 소비가 거의 없지만 정격풍속에서는 무효전력소비가 최대로 되어 약 1Mvar 정도가 소요되고 있음을 나타내고 있다.

그림.14는 V90 3MW DFIG 시스템이 5기가 구축된 한경 2단계에 그림12와 같은 가변풍속을 인가하였을 경우에 유효전력과 무효전력의 출력변동특성을 나타내고 있다. 여기서 유효전력은 시동풍속에서는 거의 출력이 없지만 정격풍속 이상에서는 15MW 보다 약간 높게 나타나고 있다. 이것은 정격풍속이상에서 1기당 약간의 정격출력이상이 합쳐져서 이러한 결과를 나타내고 있는 것으로 볼 수가 있다. 그리고 무효전력은 DFIG가 무효전력 제어를 통하여 항상 역률이 1로 제어하기 때문에 전풍속에 대해서도 무효전력이 거의 0에 가까움을 나타내고 있다.

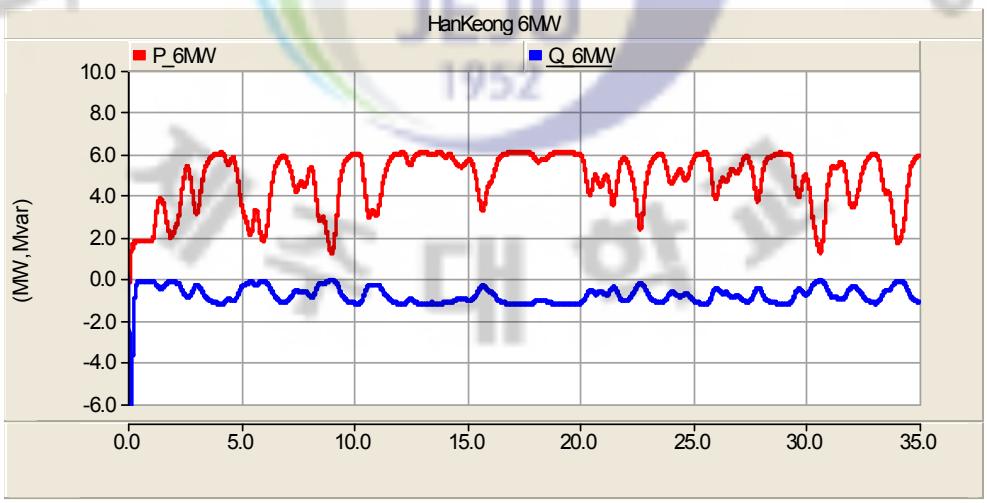

그림 13. 한경풍력 1단계 출력(6MW)

dCollection @ jeju

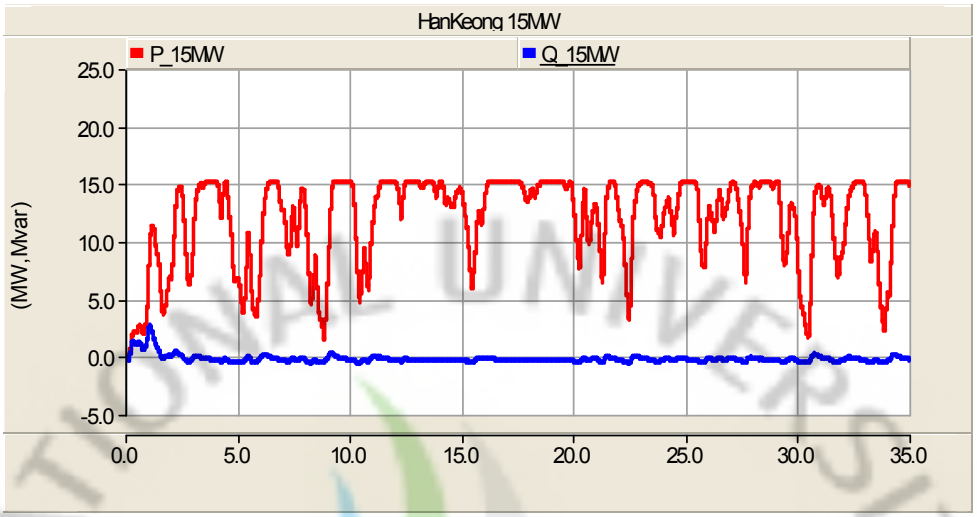

그림 14. 한경풍력 2단계 출력(15MW)

그림.15는 가변풍속에 대한 전체 출력을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 정격풍속이상에서는 최대 약 22MW 까지 나타나고 있고 무효전력은 한경 1단계에서 나타난 1MW 정도만 나타나고 있다.

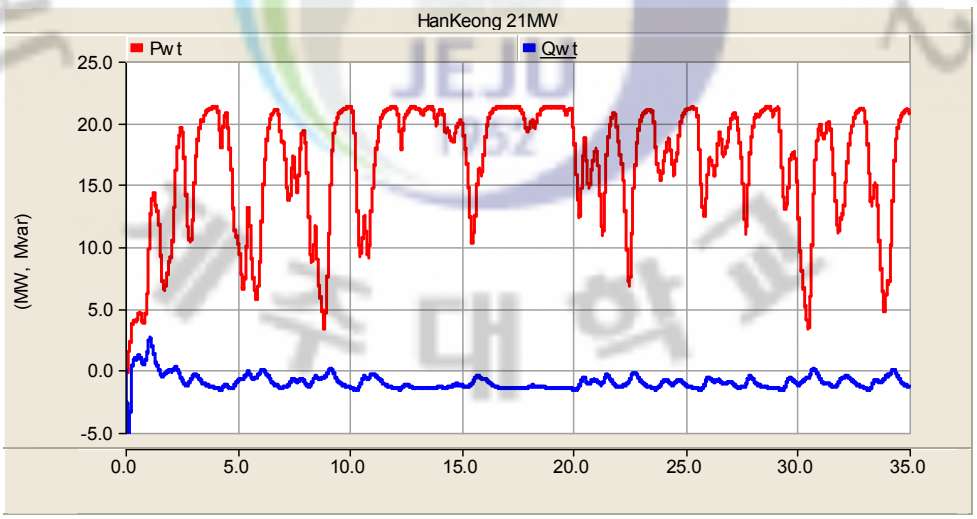

그림 15. 한경풍력발전 출력(21MW)

Collection @ jeju

그림.16과 그림.17은 한경풍력 1단계와 2단계가 연계된 배전선로 #1과 #2에 각각 나타나는 전압변동을 나타내고 있다. VLoad_1은 1단계가 연계된 지점의 전압변동을 나타내고 있고 Vload_2는 2단계에 연계된 전압변동을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 1단계에서의 전압변동은 매우 미미하지만 2단계에서는 배전선로의 공칭전압에 대해서 약 0.88%의 변동을 나타내고 있어 이 또한 배전계통의 전압품질에 영향은 미미한 것으로 볼 수가 있다.

이상과 같은 컴퓨터시뮬레이션을 종합해보면 한경풍력 1,2단계에 의한 배전계통의 전압품질문제에는 큰 영향이 없는 것으로 볼 수가 있다.

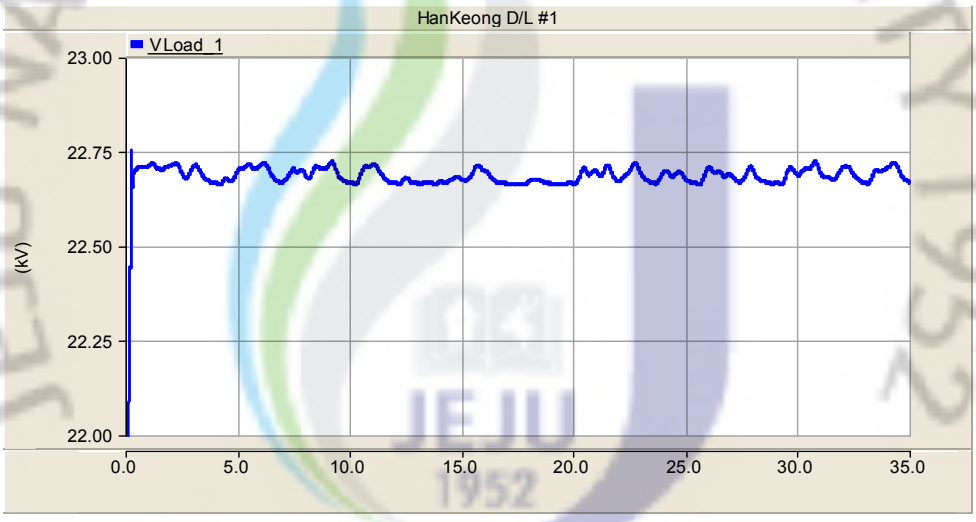

그림 16. 풍력발전이 연계된 한림변전소 배전선로 #1의 전압변동

dCollection @ jeju

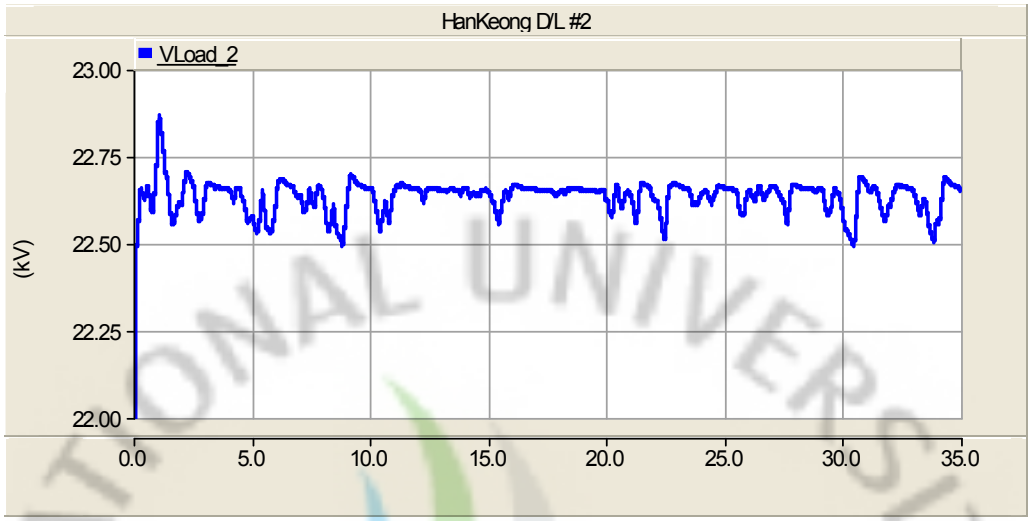

그림 17 풍력발전이 연계된 한림변전소 배전선로 #2의 전압변동

JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952
제주대학교
JEJU 1952

Collection @ jeju

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 제주도 한경 풍력발전단지에 설치된 NEG-MICON 사의 NM72C 1.5MW 풍력발전시스템과 Vestas사의 V90 3MW 풍력발전시스템을 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 모델링하여 한경 풍력발전단지의 가변풍속에 대한 출력 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과에서 나타난 것과 같이 가변풍속에 대해서 1.5MW 시스템이 4개가 구성된 한경 1단계에서는 무효전력이 최대 약 1Mvar 정도가 소요되고 있고 3MW DFIG 시스템이 5개가 설치된 한경 2단계에서는 무효전력소비가 거의 나타나고 있지 않고 있다.

또한 한경1단계와 2단계가 연계된 한림변전소 22.9kV 배전선로에서 나타나는 전압변동은 1단계에서는 거의 나타나고 있지 않지만 2단계에서는 약 0.2kV 정도로 매우 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 역률은 전력용콘덴서를 이용하여 역률을 보상하는 1단계에서는 시동풍속 이상에서 역률이 거의 1에 가까움을 알 수 있고, 2단계 DFIG 시스템에서는 풍속이 5m/s 이상에서 역률이 거의 1로 나타나고 있다. 이는 시스템에서 실제 측정한 결과에서도 비슷하게 나타나고 있다.

이상의 결과를 토대로 풍력발전 시스템을 효과적으로 모델링하는 방법을 얻을 수 있었고 이를 이용하여 새로운 풍력발전 건설시 계통영향을 분석하는데 도움이되리라 사료된다.

Collection @ jeju

참 고 문 헌

[1] Kwang Y. Lee, Se-Ho Kim, Eel-Hwan Kim, Ho-Chan Kim, "Fuel Cell as an Alternative Distributed Generation Source under Deregurated Power System," KIEE Trans. B, Vol. 55A, No. 12, pp. 561-568, 2006.

[2] Oplimpo Anaya-Lara and F. Michael Hughes, "Influence of Windfarms on Power System Dynamic and Transient Stability," Wind Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 107-123, 2006.

[3] Salman K. Anita L. J.Teo, "Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator", IEEE Trans. on Power Systems,Vol.18, No.2, May, pp 793-802, 2003.

[4] Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Florin Lov and Frede Blaabjerg, "Initialisation of Grid-Connected Wind Turbine Models in Power System Simulations", Wind Engineering , Vol. 27, No. 1, pp. 21-38, 2003.

[5] PSCAD/EMTDC Mannual, 2006.

[6] HVDC Light Topology, ABB Handbook, 1999.

Collection @ jeju

감사의 글

사회생활을 병행하면서 2년 6개월이란 대학원 생활을 통하여, 일생을 보냄에 있어 피가 되고 살이 되는 좋은 경험을 많이 하였고, 많은 분들의 따뜻한 관심과 애정 어린 질책 속에 또 다시 한층 성숙해질 수 있었습니다. 전기공학이라는 심오한 학문을 접하고 하나씩 깨우쳐 나아갈수록 부족한 나 자신을 돌이켜 볼 수 있는 기회가 되었고 진실한 공학인으로 발전할 수 있도록 소양과 자세를 일깨워준 모든 분들께 감사를 드립니다.

먼저, 연구와 강의로 바쁘신 가운데도 논문이 완성되기까지 자상하게 인도해 주시고 연구방향에 대하여 넓은 안목으로 지도해주신 김일환 지도교수님과, 좌종근, 오성보, 김세호, 이개명, 김호찬 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

무엇보다도 본 논문의 근원이 되는 풍력분야에 있어 부족한 저에게 중책을 허락해 주신 남호기 사장님, 이상호 본부장님, 김태우 발전처장님께 고개 숙여 감사드립니다. 또한, 부족한 제가 회사생활을 병행하면서 대학원에 진학하기로 결심 했을 때 아낌없는 격려와 배려로 도움 주신 최병기 소장님, 김철용 풍력개발실장님, 김동욱 부장님, 김창환 부장님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 새로 부임하셔서 누구보다 풍력분야에 애착과 지원을 아끼지 않으시는 한은섭 소장님과 조대엽 풍력건설부장님께도 감사를 드립니다.

또한 본인의 연구에도 모자라는 시간을 쪼개어 여러 가지로 배려를 아끼지 않은 김재홍, 김대현, 그리고 전력전자 연구진분들께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 아울러 저와 동고동락하며 고생한 직장 동료 선, 후배 분들께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

끝으로, 입학에서부터 논문이 완성되기 까지 2년 6개월이란 배움의 여정이 힘들지 않게 격려와 배려를 해준 아내에게 이 지면을 빌어 무엇보다 고마움을 전합니다. 지금까지 변함없는 믿음과 사랑으로 저를 응원 해주신 사랑하는 부모님과 함께 있어주지 못해 늘 미안한 사랑하는 아들 상준이, 딸 예은이에게 고마움을 전합니다. 그리고 늘 기도와 권면으로 힘을 주시는 최일만 목사님께 이 지면으로나마 감사의 뜻을 올려드립니다. 이외에 일일이 열거하지 못한 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜 봐주셨던 모든 분들께 이 지면을 빌어 다시 한 번 감사드립니다.

dCollection @ jeju