



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

해상풍력발전단지가 연계된  
제주계통의 전압형 HVDC의  
동특성 해석

濟州大學校 大學院

電氣工學科

金大現

2011年 6月

해상풍력발전단지가 연계된  
제주계통의 전압형 HVDC의  
동특성 해석

指導教授 金一煥

金大現

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 6月

金大現의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (인)

委 員 \_\_\_\_\_ (인)

委 員 \_\_\_\_\_ (인)

濟州大學校 大學院

2011年 6月

Analysis of Dynamic Characteristics of  
VSC-HVDC in Jeju Power System with  
Offshore Wind Farm

Dae-Hyoun Kim

(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2011. 6.

## 목 차

그림목차 .....	ii
표목차 .....	iv
SUMMARY .....	v
1. 서 론 .....	1
2. 제주지역의 전력계통 및 해상풍력 .....	3
2.1 제주 전력계통 현황 및 풍력발전 전망 .....	3
2.2 제주지역의 풍속 특징 및 해상풍력단지 구성안 .....	6
3. 컴퓨터 해석 .....	18
3.1 모델링과 해석 .....	18
3.2 해석 결과 및 고찰 .....	32
4. 결 론 .....	44
참 고 문 헌 .....	45

## 그림 목 차

그림 1 제주지역 전력계통도(2011년 6월 기준, 전력거래소) .....	3
그림 2 제주지역 풍속자원 분포 .....	16
그림 3 풍력발전시스템 건설 지점의 선정 절차 .....	8
그림 4 제주지역 전자해도 .....	9
그림 5 위성지도상의 측정 지점의 위치 .....	9
그림 6 행원 해상 84m 높이에서의 풍황 예측결과 .....	12
그림 7 행원 해상 84m 높이에서의 웨이블 분포와 바람의 장미 .....	12
그림 8 가파도 해상 84m 높이에서의 풍황 예측결과 .....	13
그림 9 가파도 해상 84m 높이에서의 웨이블 분포와 바람의 장미 .....	14
그림 10 행원 해상풍력단지의 300MW 풍력터빈 배치도 .....	16
그림 11 가파도 해상풍력단지의 201MW 풍력터빈 배치도 .....	17
그림 12 V90 3.0MW 모델링 .....	22
그림 13 V112 3.0MW 모델링 .....	22
그림 14 전압형 HVDC 시스템의 개념도 .....	23
그림 15 전압형 컨버터를 사용한 HVDC 전력전송 운전의 일반적인 공간 벡터 .....	24
그림 16 전압형 HVDC 시스템의 블록도 .....	25
그림 17 전압형 컨버터의 제어기 .....	26
그림 18 P-Q 전압형 HVDC 시스템의 제어가능영역 .....	27
그림 19 전압형 HVDC 모델링 .....	27
그림 20 전압형 HVDC의 컨버터 모델링 .....	28
그림 21 2020년 가상 제주 전력 계통 .....	31
그림 22 100MW 육상풍력단지 출력 곡선 .....	32
그림 23 300MW 해상풍력단지 출력곡선 .....	33
그림 24 100MW 육상풍력단지 가변풍속 출력 .....	34

그림 25 300MW 해상풍력단지 가변풍속 출력 .....	34
그림 26 풍력발전 탈락 시 제주계통의 유효전력과 무효전력 변화 .....	35
그림 27 풍력발전 탈락 시 제주계통의 유/무효전력 변화 .....	36
그림 28 제주계통측 상전압과 상전류 변화_1 .....	37
그림 29 제주계통측 상전압과 상전류 변화_2 .....	37
그림 30 전압형 HVDC에 연결된 TL의 전력, 주파수 전압 변화 .....	38
그림 31 각 발전단지의 바람모델 .....	40
그림 32 가변풍속 운전 시 제주계통의 유효전력 변화 .....	41
그림 33 전압형 HVDC의 유효전력과 무효전력의 변화 .....	42
그림 34 전압형 HVDC의 직류링크 전압과 교류전압 .....	42
그림 35 전압형 HVDC에 연결된 TL의 주파수 .....	43

## 표 목 차

표 1 2013-15년 전력 수요 예측(전력거래소) .....	4
표 2 제주지역 풍력발전단지 건설전망(전력거래소, 2010.11) .....	5
표 3 행원지역에서 측정된 풍황데이터 .....	10
표 4 가파도지역에서 측정된 풍황데이터 .....	10
표 5 측정지점의 월별 평균 풍속분포 .....	11
표 6 행원 해상 풍력발전기 설치시 예상효율 .....	15
표 7 가파도 해상 풍력발전기 설치시 예상효율 .....	15
표 8 V90 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양 .....	21
표 9 V112 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양 .....	21
표 10 2020년 예상 제주 풍력발전기 설치량 .....	29
표 11 2013년 이후 발전기 부하배분데이터(전력거래소) .....	30
표 12 제주지역 평균 풍속 예측결과(월 평균 최대 풍속) .....	39



## SUMMARY

This paper presents the modeling and analysis of Jeju power grid connected with large scale wind farms and voltage source type HVDC to the main land. For the computer simulation, wind farms, VSC-HVDC, thermal power plants and electric loads are modeled. To analyze the grid impact of the wind power generation to the Jeju power system, two kinds of simulation are carried out by using PSCAD/EMTDC program. One is the steady state operation under the variable speed wind, and the other is the transient state operation when 300MW offshore wind farm is disconnected from the Jeju power grid instantaneously due to the electric fault. These comparative studies will be useful to analyze the power quality under the impact of wind power generation in the power system with the renewable energy source. And also, VSC-HVDC wall be established in 2016 in Jeju Island is vary useful for Jeju power system stability under the variable change of lange scale wind farms.

## 1. 서 론

갈수록 심각해지는 기후변화와 최근의 일본원전 사태로 인해 우리나라에서도 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 여전히 우리나라를 비롯해 많은 국가들이 화석연료와 원자력에 의존하고 있는 것이 현실이다. 지난해 덴마크와 독일은 '2050년 화석연료 제로(Zero)'를 선언 하였다. 특히 독일은 일본 원전사태의 영향으로 최근 원전 포기를 공식 선언 하였다.

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[1].

우리나라에서 경제성 있는 풍력발전이 가능한 지역이 한정되어 있으며, 제주도 와 강원산간, 그리고 서해안 일부 지역 정도로 국한되어 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 전 세계적으로 육상풍력발전에서 해상풍력발전으로의 전환이 일어나고 있다. 2010년 11월 정부는 해상풍력발전 운영경험(Track Record)을 확보하여 확대 추세에 있는 세계 해상풍력발전 시장을 선점하고, 세계 3대 해상풍력강국으로의 도약을 목표로 하는 해상 풍력 추진 로드맵을 발표한 바 있다.

또한, 제주에서도 2020년까지 제주에 500MW규모의 신재생에너지 발전을 통한 탄소배출이 없는 섬 제주를 구현하기 위하여(Carbon Free Island) 여러 가지 사업을 진행 하고 있다[2][3].

제주지역은 좁은 지역이면서도 다양한 종류의 발전원을 가지고 있으며, 부하측면으로 보면 제주지역의 부하특성은 대형 플랜트 설비가 없고 관광과 연계된 설비와 농수축산분야 그리고 가정용 부하로 이루어지고 있다. 이러한 부하 특성은 최대 부하와 기저부하의 차가 큰 특성을 가지고 있으며, 또한 풍력발전은 출력이 일정하지 않은 특성을 가지고 있어 추가 풍력발전 건설의 문제점으로 대두 되고 있다.

본 논문에서는 현재 풍력발전단지 설계에 널리 사용되고 있는 WindPRO 프로그램을 이용하여 제주 해상의 풍황특성을 분석하고, 이를 바탕으로 제주지역 해상에 수심 30m를 기준으로 가용단지용량을 추정한 결과 약 500MW 정도의 해상 풍력발전단지가 가능할 것으로 여겨진다. 여기서, 2020년 제주지역에 육상 200MW, 해상 500MW의 발전단지가 조성될 것으로 예상되어 제주 계통에 전압형 직류고압송전 시스템 (VSC-HVDC; Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current)을 도입할 경우 이에 따른 전압형 HVDC의 동특성을 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 해석하고자 한다.

## 2. 제주지역의 전력계통 및 해상풍력

### 2.1 제주 전력계통 현황 및 풍력발전 전망

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. 2010년 제주지역의 총부하중 약 40% 정도인 150 MW는 연계선에서 부담하고, 나머지는 발전원가에 의한 경제급전운용으로 수요에 맞게 저 원가 발전소 순으로 가동되는 형태이다. 표 1과 표 2는 제주지역의 전력 수요 예측 및 각 발전 설비별 발전 배분율을 나타내고 있다.



그림 1 제주지역 전력계통도(2011년 6월 기준, 전력거래소)

표 1 2013-15년 전력 수요 예측(전력거래소)

연도	1월(겨울)			5월(봄)			8월(여름)			10월(가을)			수요 증가 율
	최 저	평 균	최 대	최 저	평 균	최 대	최 저	평 균	최 대	최 저	평 균	최 대	
2005	294	359	419	254	309	364	254	369	479	251	321	414	3.5
2006	265	374	442	268	326	389	293	413	515	271	339	417	4.9
2007	331	405	474	283	350	411	312	440	552	283	357	439	6.8
2008	355	427	493	294	362	422	307	422	537	294	368	443	5.3
2009	331	454	534	319	383	444	319	439	576	291	384	463	9.2
2010	400	481	561	328	395	461	352	502	625	312	401	478	5.8
2011	416	501	583	341	410	479	366	522	650	325	417	497	4.0
2012	433	521	607	354	427	499	381	543	676	338	433	517	4.0
2013	450	542	631	369	444	518	396	565	703	351	451	538	4.0
2014	468	563	656	383	462	539	412	587	731	365	469	559	4.0
2015	487	586	682	399	480	561	429	611	760	380	488	582	4.0

표 1에서 2005년부터 2010년까지의 실제 전력 수요와 2015년까지의 전력 수요 예측을 나타내고 있으며, 최대 부하는 8월 여름이 가장 높게 나타났고, 최저 부하는 10월 가을이 가장 낮게 나타나고 있다. 제주지역은 대형 플랜트설비가 없고 관광과 연계된 설비와 농수축산분야 그리고 가정용 부하로 이루어지고 있다. 이런 부하 특성은 최대부하와 기저 부하와의 차가 큰 특성을 갖는다.

표 2 제주지역 풍력발전단지 건설전망(전력거래소, 2010.11)

풍력발전설비현황		용 량[MW]	합 계[MW]	연도별 풍력설비용량 검토기준[MW]
현재		90	90	
2011	가시리	15	105	250
	난산	10.5	115.5	
	신창2	15	117	
	해상실증	6	123	
2012	이시돌	20	143	
	한신	45	188	
	이시돌2	20	208	
	상도	30	238	
	팜파스	20	258	
	삼무	30	288	
2013	월정해상	50	338	350
	제주풍력	20	358	
2014	한경해상	50	408	400

표 2는 2014년까지의 제주지역 풍력발전단지 건설전망을 나타내고 있다. 연도별 풍력 설비에 따른 검토기준은 각각 2012년 250MW, 2013년 350MW, 2014년 400MW로 전망 하고 있다[4].

제주도의 우수한 풍황자원을 이용한 풍력발전단지 개발이 활발히 진행 되고 있으며 전체 발전원 중에서도 풍력발전이 차지하는 점유율이 점차 증가하는 추세이다. 특히, 한라산을 중심으로 동부지역과 서부지역이 연평균 풍속이 약 7 m/s 정도로 풍력발전에 우수한 풍황자원을 가지고 있어, 향후 풍력발전설비는 지속적으로 증가될 전망이다.

하지만 제주도의 연중 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 제주지

역에서 풍력발전에 대한 용량검토 등 계통안정도를 높일 수 있는 다양한 방안이 모색되고 있다.

## 2.2 제주지역의 풍속 특징 및 해상풍력단지 구성안

그림 2는 제주도의 육·해상 바람지도를 나타낸 것이다. 제주 지형적 특성상 가장자리에 우수한 풍황자원 보유율 보이고 있는데 년 평균 풍속 7.0 m/s 이상으로서 풍력단지 구성에 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 나타나고 있다.

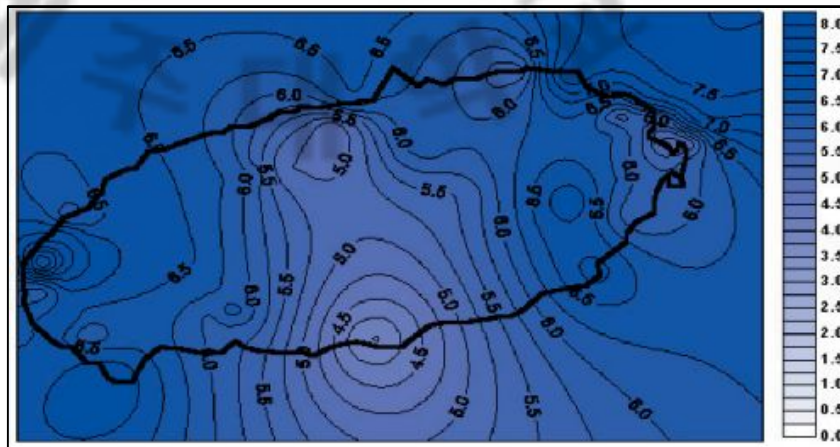


그림 2 제주지역 풍속자원 분포

### 2.2.1 풍력발전기 설치지점 선정 절차

해상풍력단지의 설계 시 크게 두 가지로 자연적인 조건과 인위적인 조건을 고려하여 가급적 풍력발전단지 내에서 최적의 가동조건을 가질 수 있는 지점을 우

선적으로 선정해야 한다. 자연적 여건으로는 바람의 세기 및 질과 관련된 풍향 상태, 수심, 지형, 지반 상태 접근성 등과 관련된 요인을 의미 하며, 인위적 여건으로는 민원, 환경 훼손, 인허가, 전력선 연계등과 관련된 요인을 의미 한다. 발전용량을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 설계 시 국소 풍속 분포, 난류분포, 후류 분석 등을 토대로 풍력발전기의 설치 지점 및 이격 거리등을 설정 하여야 하며 다음과 같은 절차를 거쳐서 최종적으로 풍력발전기의 최적 설치지점을 설정 하게 된다[5].

- 신규 풍력설비의 최적 설치지점을 선정키 위해 현장에서의 풍력자원 실측 장비의 운용을 통한 실측 자료 확보
- 도상 검토 및 현장실사를 통해 해당 지역의 풍력발전단지 구축 가능 여부, 현재 부지의 사용현황, 자연보호구역 지정 여부 등을 검토한 후 1차 지점을 선정함
- 우선적 선정지점에 대하여 지형정보를 갖고 있는 전자지도, 전자해도와 실측 풍특성 자료를 통한 WAsP(Wind Energy Analysis Program)을 통한 풍속 분포, 풍력에너지 밀도 및 최소 후류 손실을 감안한 단지 배열 영향 분석
- 1차 설치지점의 발전용량을 분석하고, 풍력발전기 이격거리 및 국소 풍속 분포 등에 의해 발전용량이 어떻게 변화 하는지를 분석하여 발전용량을 극대화 시킬 수 있는 지점을 최종 선정





그림 3 풍력발전시스템 건설 지점의 선정 절차

해상풍력발전단지인 경우 설치 지점의 수심 및 해저 지형 조사가 가장 중요하다. 풍황 측정을 통하여 풍황이 우수한 곳을 선정하였어도 해저 지형 상 풍력 발전기가 시공 불가능 하다면 설계지점의 건설은 불가능 하다. 그림 4는 제주지역의 전자 해도를 나타내고 있다. 전자 해도는 각 선박의 운항 경로, 각 지역의 어업권 및 수심 분포를 자세하게 표시하고 있어 해상풍력 설계 시 전자 해도를 통한 사전 위치 선정이 필요로 하다.

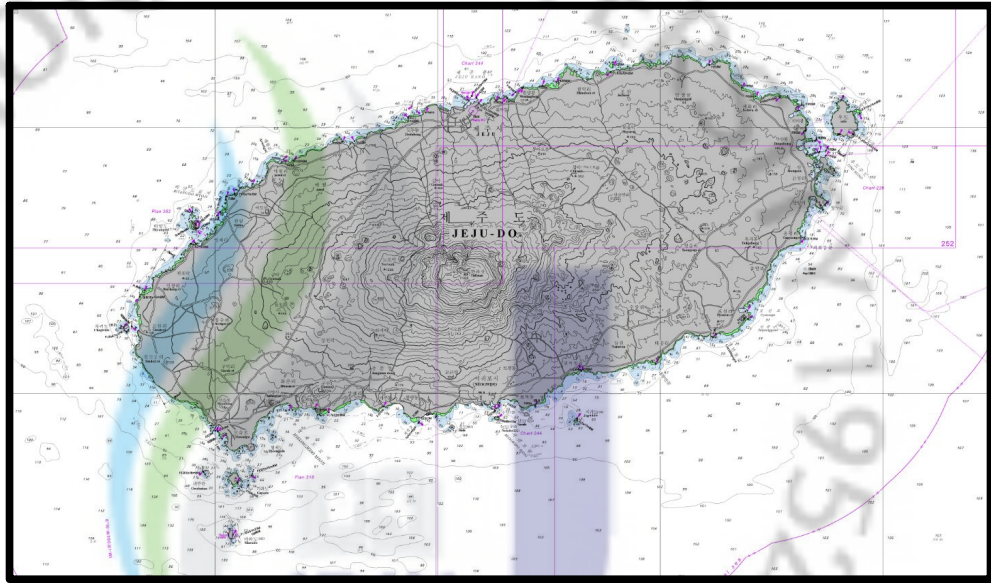


그림 4 제주지역 전자해도

### 2.2.2 풍력자원의 분석

그림 5는 위성지도상의 실제 행원과 가파도 실측지점 위치를 나타내고 있다. 그림의 두 지역은 제주지역에서도 가장 풍황이 우수한 지점으로 육상 풍력 및 추후 대규모 해상 풍력 또한 우수한 발전량을 보일 것으로 예상 된다.



그림 5 위성지도상의 측정 지점의 위치

행원과 가파도 해상 인근 지역에서 측정된 풍황 측정 장비에서 취득된 풍속과 풍향 등의 풍황데이터를 활용하여 행원 및 가파도 해상의 풍황과 이용율을 예측 하였다. 분석에는 덴마크 RISO연구소에서 개발하여 전 세계에서 풍력발전단지 분석으로 가장 많이 사용되고 있는 WAsP와 덴마크 EMD사에서 개발한 풍력발전단지 설계 인터페이스 프로그램인 WindPRO를 사용 하였다[6].

분석 대상지역은 제주도 행원 인근 해상인 제주 동북부지역과 가파도와 인접한 제주 서남부지역이다. 분석 시 사용되어진 풍황 자료는 제주 도청에서 실측한 인근지역의 풍황데이터를 바탕으로 분석되었으며 표 3, 표 4에 나타내었다.

표 3 행원지역에서 측정된 풍황데이터

측정요소	측정결과	비 고
측정기간	09.01.01~09.12.31	97.8% (회수율)
연 평균풍속 [m/sec]	6.5	45m (측정높이)
최대풍속 [m/sec]	22.5	
바람에너지 밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	388.6	
주풍향 (빈도)	WNW (22.7%)	

행원 지역의 풍황 자료를 보면, 측정 기간은 09년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 측정되었으며 데이터 복구율은 97.8%를 보이고 있다. 1년간 평균 풍속은 6.5m/s(지상 45m), 평균 최대풍속은 22.5m/s, 평균 바람에너지밀도는 388.6W/m<sup>2</sup>, 주풍향은 서북서풍(22.7%)를 나타내고 있다.

표 4 가파도지역에서 측정된 풍황데이터

측정요소	측정결과	비 고
측정기간	06.02.01~07.01.31	100% (회수율)
연 평균풍속 [m/sec]	7.8	48m (측정높이)
최대풍속 [m/sec]	30.1	
바람에너지 밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	631.6	
주풍향 (빈도)	N (26.4%)	

가파도 지역의 풍황 자원을 보면, 측정 기간은 06년 2월 1일부터 07년 01월 31일까지 1년간 측정되었으며 데이터 복구율은 100%를 보이고 있다. 1년간 평균 풍속은 7.8m/s(지상 48m), 평균 최대풍속은 30.1m/s, 평균 바람에너지밀도는 631.6W/m<sup>2</sup>, 주풍향은 북풍(26.4%)를 나타내고 있다.

표 5 측정지점의 월별 평균 풍속분포

월별	행원(m/s)	가파도(m/s)
1 월	8.9	8.9
2 월	6.8	10.2
3 월	7.6	8.7
4 월	6.4	8.3
5 월	5.3	8.6
6 월	4.2	6.5
7 월	5.1	6.5
8 월	6.1	4.8
9 월	5.4	7.9
10 월	5.8	5.8
11 월	7.7	9.4
12 월	8.6	8.5
월 평균 풍속	6.5	7.7

표 5는 두 지점의 월 평균풍속분포를 나타내고 있다. 두 지점 모두 동절기 평균 풍속은 8m/s이상 보이며, 하계는 약 5~6m/s의 분포를 보이고 있다.

WindPRO와 WAsP 모델링을 통하여 분석한 풍황 분석 결과는 그림 6~9와 같다.

행원지역의 경우 해상 84m높이에서 연평균 풍속은 8.4m/s, 주풍향은 서북서풍(20.6%)으로 예측되었으며 이 지점에서의 예상 이용율은 49.5%(VESTAS-V112 기준)로 풍황 분포가 매우 우수함을 보이고 있다.

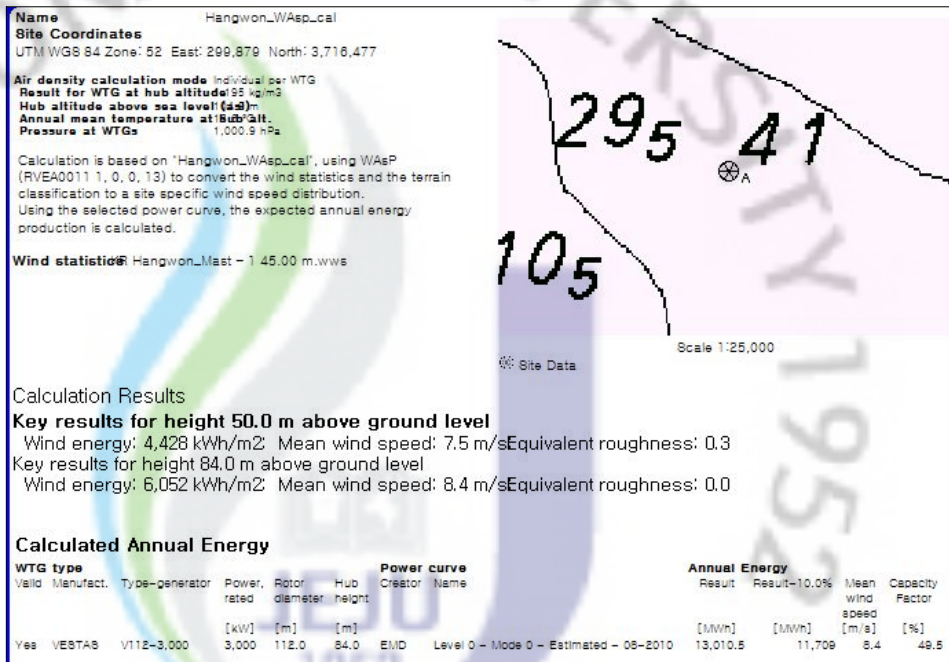


그림 6 행원 해상 84m 높이에서의 풍향 예측결과

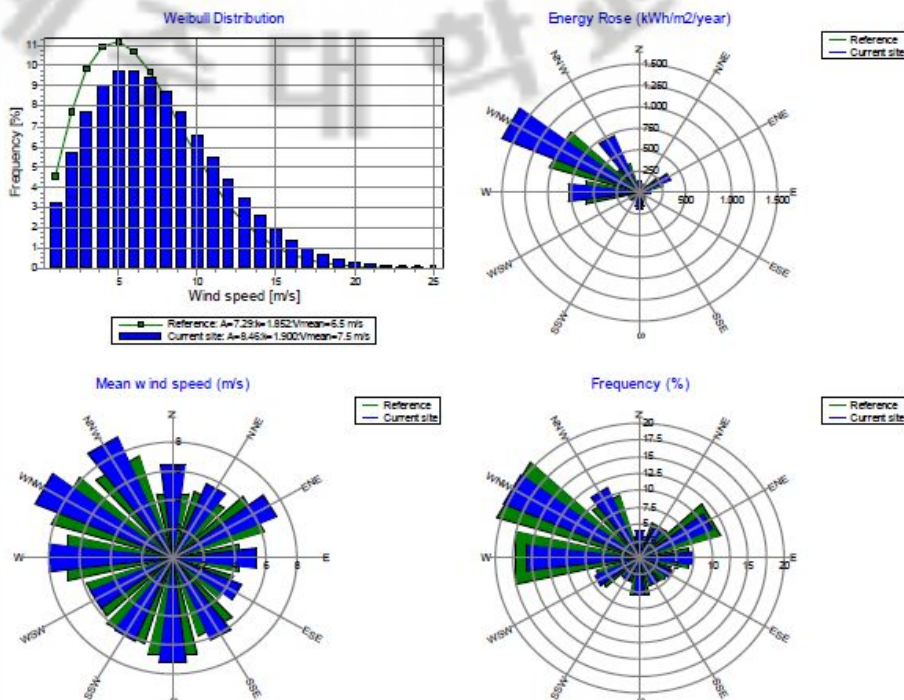


그림 7 행원 해상 84m 높이에서의 웨이블 분포와 바람의 장미

가파도 지역의 경우 해상 84m높이에서 연평균 풍속은 8.7m/s, 주풍향은 북풍 (23.5%)으로 예측되었으며 이 지점에서의 예상 이용율은 52.5%(VESTAS-V112 기준)로 가파도를 포함한 인근지역의 풍황 분포가 매우 우수함을 보이고 있다.

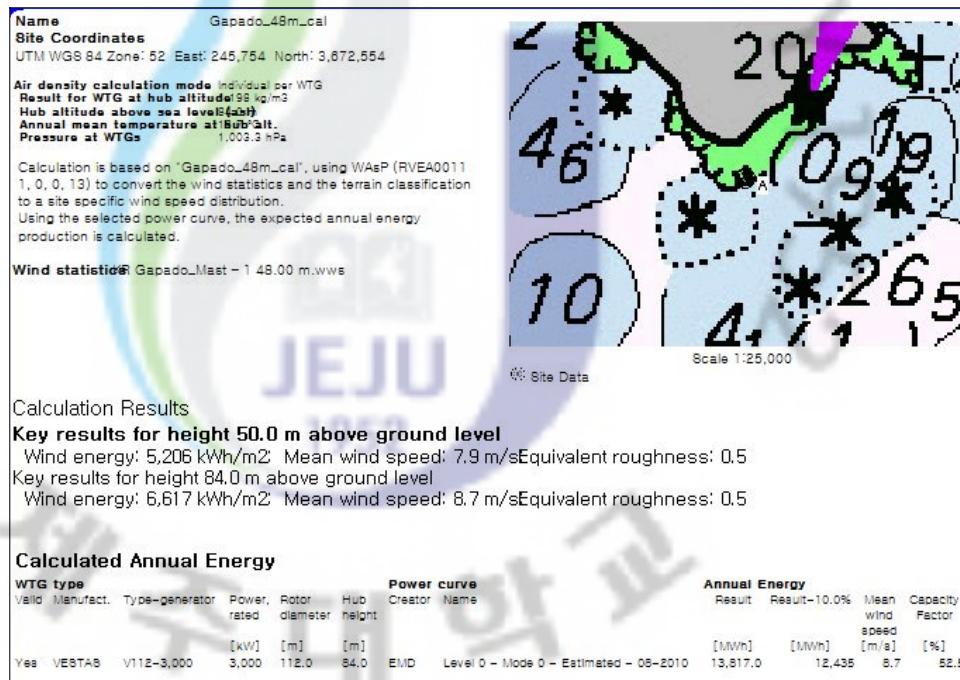


그림 8 가파도 해상 84m 높이에서의 풍황 예측결과

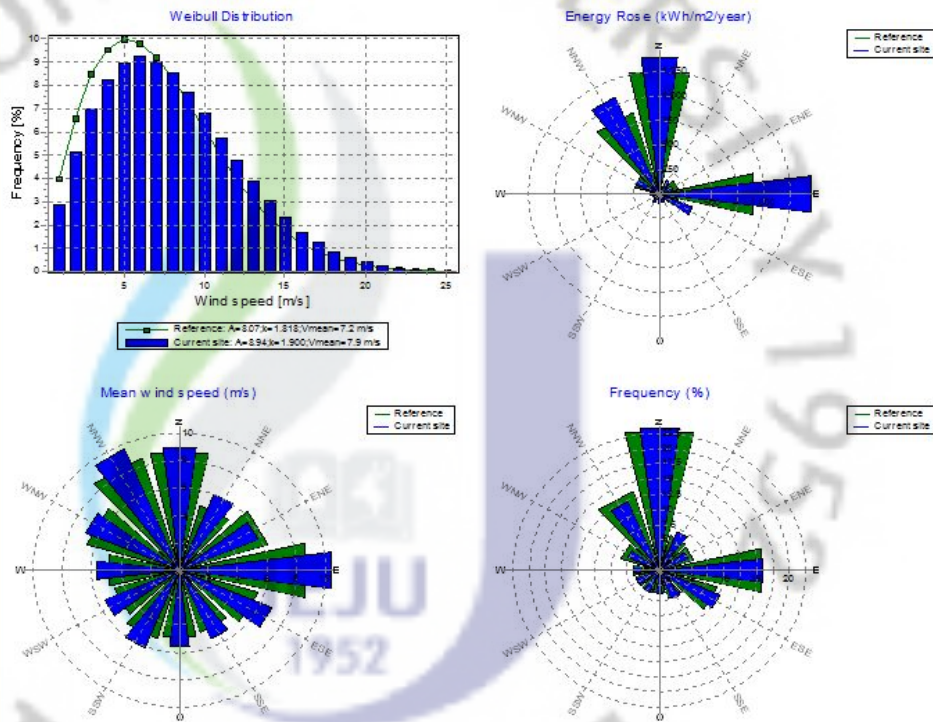


그림 9 가파도 해상 84m 높이에서의 웨이블 분포와 바람의 장미

### 2.2.3 제주지역 대규모해상풍력단지의 설계결과

실제 측정된 풍황데이터 분석과 예측을 통한 예상 이용률 계산이 되면 그 결과를 바탕으로 해당지역의 수심을 고려한 실제 발전기 설치 위치를 설계 한다. 다음은 행원과 가파도 지역에서 해상풍력의 경제성을 확보할 수 있는 수심 30m 이내를 기준으로 하여 해상 풍력발전단지를 설계한 결과이다.

행원 해상풍력발전단지의 설비용량에 따른 발전용량 분석 결과는 다음과 같다.

표 6 행원 해상 풍력발전기 설치시 예상효율

설비용량	연간 발전량 [GWh]	연간순발전량 [GWh]	발전기 평균 발전량 [GWh]	배치효율 [%]
102MW (3MW×34)	415.1	373.6	12.2	96.4
201MW (3MW×67)	784.3	705.9	11.7	94.4
300MW (3MW×100)	1,170.1	1,053.1	11.7	93.3

표 5에서 연간발전량은 각 단지의 발전량을 나타내며, 연간 순 발전량은 발전기 위치의 후류 손실 및 기타 손실을 반영한 발전량이다. 또한 발전기 평균 발전량은 각 개별 발전기별 연간 발생하는 발전량이며, 배치효율은 각 발전기 위치의 손실에 대한 각 발전기별 효율로, 후류 손실 및 기타 영향 손실을 반영한 값이다.

총 설비용량을 102MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 373.5GW, 배치효율은 96.4%로 분석되었으며, 201MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 705.9GW, 배치효율은 94.4%로 분석되었다. 또한 300MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 1,053.1GW, 배치효율은 93.3%로 분석되었다. 행원지역의 경우 수심 및 인근 경관을 고려 할 경우 최대 300MW까지 수용이 가능 할 것으로 보인다.

표 7 가파도 해상 풍력발전기 설치시 예상효율

설비용량	연간 발전량 [GWh]	연간순발전량 [GWh]	발전기 평균 발전량 [GWh]	배치효율 [%]
102MW (3MW×34)	426.5	383.9	12.5	94.3
201MW (3MW×67)	847.6	762.8	12.7	93.2
300MW (3MW×100)	1,280.8	1,152.7	12.8	93.4



가파도 해상풍력발전단지의 설비용량에 따른 발전용량 분석 결과는 다음과 같다.

총 설비 용량을 102MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 383.6GW, 배치효율은 94.3%로 분석되었으며, 201MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 762.8GW, 배치효율은 93.2%로 분석되었다. 또한, 300MW 규모로 조성할 경우, 연간 순발전량은 1,152.7GW, 배치효율은 93.4%로 분석되었다. 가파도 지역의 경우, 송악산 및 산방산, 형제섬 등이 있어 인근 경관을 고려하면 약 200MW 정도의 해상풍력단지 계획이 적절할 것으로 보인다.

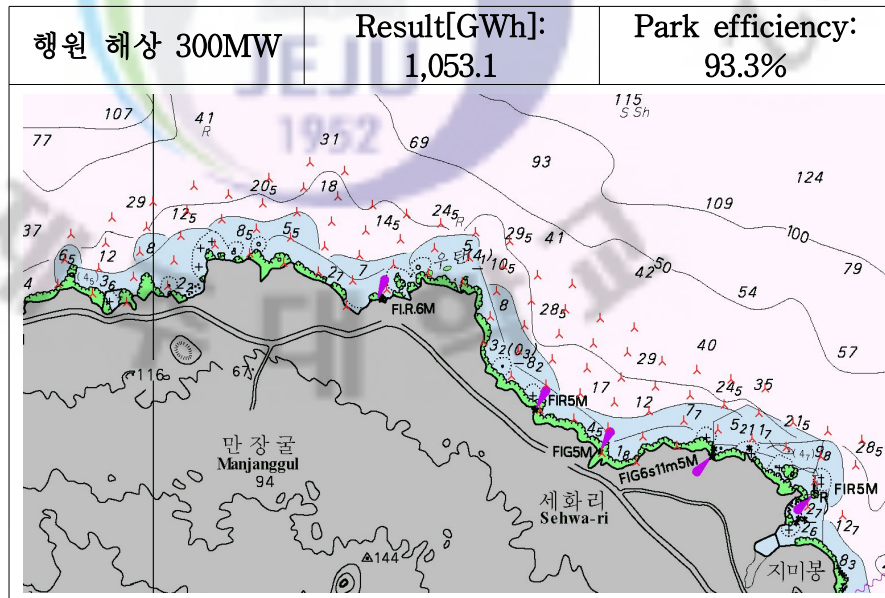


그림 10 행원 해상풍력발전단지의 300MW 풍력터빈 배치도

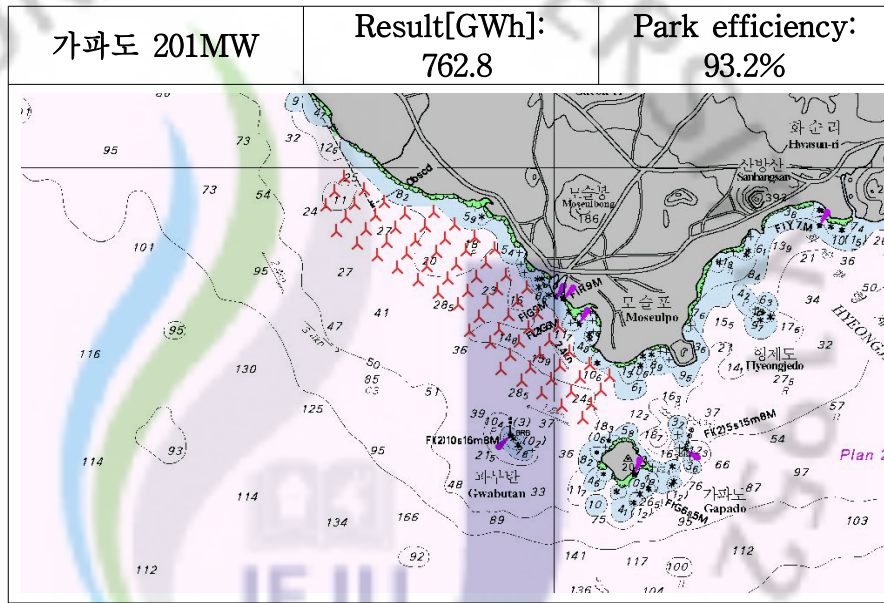


그림 11 가파도 해상풍력발전단지의 201MW 풍력터빈 배치도

행원과 가파도 지역 모두 풍력발전기 이격 거리는 주 풍향 방향에서 약 780m, 그 외 방향은 560m의 이격 거리를 주었다.

이상으로 제주지역의 대규모 해상풍력단지의 개략적인 설계를 하였다. 설계 시 상에 사용되어진 풍력발전기는 VESTAS-V112 3MW모델로, 현재 상용화 된 해상 풍력발전기 중 최신 기종이다. 그러나 현재 전 세계 각 기업에서 5~6MW급 초대형 해상 풍력 발전기 개발에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라 추후 초대형 기종에 대한 분석 및 설계가 필요하며, 해당지역의 해저탐사 및 수심 조사를 통한 해양 생태계의 영향 분석이 필요하다고 사료된다.

### 3. 컴퓨터 해석

#### 3.1 모델링과 해석

##### 3.1.1 풍력발전단지 모델링

풍력터빈의 회전자는 바람의 갖는 에너지를 기계적인 회전 토크로 발생시키는 블레이드부와 여기서 발생된 토크를 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 토크 출력을 발전기에 전달하는 과정에서의 영향은 아주 미미하다. 이러한 이유로 인하여 본 논문에서는 회전자 모델링 시 이 부분을 무시하였다.

블레이드는 굉장히 큰 관성을 가지는 공기역학적 시스템으로 랜덤하게 부는 바람에 대해서 발생하는 출력 토크를 정확하게 수학적으로 모델링하는 것은 쉽지가 않다. 그래서 풍력터빈의 회전자 시스템을 해석 할 때는 풍속에 대한 전기적인 출력곡선을 이용하는 방법과, 식 (1)과 같이 풍속에 대한 블레이드의 회전속도 비를 나타내는 주속비  $\lambda$ 에 대해서 블레이드의 피치 제어각에 따른 출력 계수  $C_p(\lambda, \theta)$  값을 이용하는 방법이 있다[7][8].

$$\lambda = R \frac{\omega_m}{v_w} \quad (1)$$

단,  $R$  : 블레이드 반경 [m]

$\omega_m$  : 블레이드의 기계적인 각속도 [rad/s]

$v_w$  : 풍속 [m/s]

여기서 전기적인 출력 특성곡선을 이용하는 방법은 블레이드와 바람의 공기역학적인 상호작용과 주속비  $\lambda$  에 대한 회전자의 공기역학적 효율을 무시하고, 최적의  $C_p$  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  $C_p(\lambda, \theta)$  값을 이용하는 방법은 블레이드의 공기역학적 출력계수를 식(2)과 같이 주속비  $\lambda$ 와 피치각  $\theta$ 의 함수로 나타내고, 주속비  $\lambda$ 에 대해 각각의 피치각에 따라 출력계수  $C_p$  값을 얻어 식(3)와 같이 토오크 출력을 얻는 방법이다. 이 방법은 바람과 블레이드의 공기역학적 특성을 좀더 정확하게 해석할 수 있다는 장점을 가지는 반면에,  $C_p(\lambda, \theta)$ 의 함수를 정확하게 얻어내는 것이 쉽지 않다는 단점을 가진다.

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

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

단,  $T_w$  : 기계적인 발생 토오크 [N·m]

$P_w$  : 터빈에서 얻어지는 에너지 [W]

$\rho$  : 공기 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  : 블레이드에 따른 출력계수

$A$  : 블레이드 회전 통과 면적 [m<sup>2</sup>]

$\eta$  : 시스템 효율

$\theta$  : 피치각(°)

현재까지 국내에 설치되어 있는 대형 풍력발전기는 주로 프로토 타입의 수평축 3 Blade 형식이다.

모델링을 위한 풍력발전기 제어모델은 회전자에 채용된 컨버터시스템에 의한 출력제어와 역률을 제어하는 V90 3MW DFIG(Doubly Fed Induction Generator) 방식과 V112 3MW PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)방식을 적용하였다. 분석Tool은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였다

실제로 설치되어 운용되고 있는 풍력발전시스템은 발전기 타입에 따라 회전자 슬립전력제어(DFIG 발전기)방식과 출력되어지는 모든 전력을 변환하는 전출력 변환(PMSG 발전기)방식이 있다. 이러한 형태를 전부 실제 데이터를 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.

본 논문에서는 풍력발전단지에서 풍력터빈시스템 모델 구현은 육상 풍력발전소와 해상풍력 발전소로 나뉘었으며, 육상 풍력인 경우 VESTAS V90 3MW의 실제 파워 커브를 참조하여 모델링 하였고, 해상풍력인 경우 VESTAS V112 3MW 풍력발전기의 파워커브를 참조하여 모델링 하였다.

풍력발전기 시스템 모델링에서는 전력변환용 시스템에 대한 모델링이 매우 복잡하고 또한 많은 해석시간을 요하기 때문에 등가 변환회로를 이용하여 해석하는 것이 간편하고 용이하다. 본 논문에서는 그림 12, 13과 같이 PSCAD/EMTDC 프로그램에서 제공하고 있는 전류원 라이브러리를 이용하여 출력역률이 항상 1이 되게끔 PI 제어를 수행하고 또한 가변풍속에 대응하는 유효출력이 발생하도록 모델링을 구현하였다[9][10].

표 8 V90 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양

풍력터빈	제조사	VESTAS
	모델명	V90/3MW
	시동 풍속(m/s)	4
	중단 풍속(m/s)	25
회전자	출력제어	피치제어
	회전자직경(m)	90
	허브높이(m)	80
	회전수(rpm)	9.9-16.1-18.4 가변속
블레이드	형식	강화 그라스 파이버
	공기 브레이크	기계브레이크
	잠영면적 (m <sup>2</sup> )	6,362
기어박스	형식	유성기어장치
	기어비	1:109
발전기	정격출력(kW)	3000
	극수	4
	정격전압(V)/주파수(Hz)	1000/60
	정격전류(A)	2103
요잉	타입	전기모터
제어기	타입	IGBT제어형
타워	타입	튜블러 타워

표 9 V112 3.0MW 풍력터빈 시스템의 사양

풍력터빈	제조사	VESTAS
	모델명	V112/3MW
	시동 풍속(m/s)	3
	중단 풍속(m/s)	25
회전자	출력제어	피치제어
	회전자직경(m)	112
	허브높이(m)	84, 94, 119
	회전수(rpm)	12.8
블레이드	타입	그라스 파이버
	공기 브레이크	기계식 브레이크
	잠영면적 (m <sup>2</sup> )	9,852
기어박스	형식	유성기어장치
	기어비	-
발전기	정격출력(kW)	3,075
	극수	-
	정격전압(V)/주파수(Hz)	650/45~65
	정격전류(A)	2300
요잉	타입	전기모터
제어기	타입	전출력 변환 시스템
타워	타입	튜블러 타워

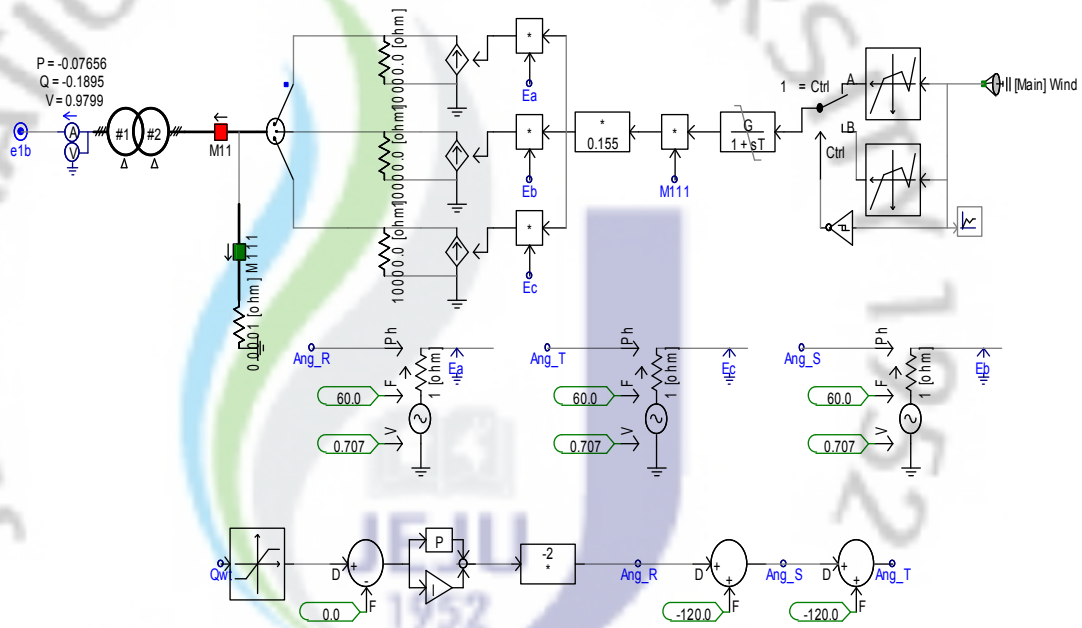


그림 12 V90 3.0MW 모델링

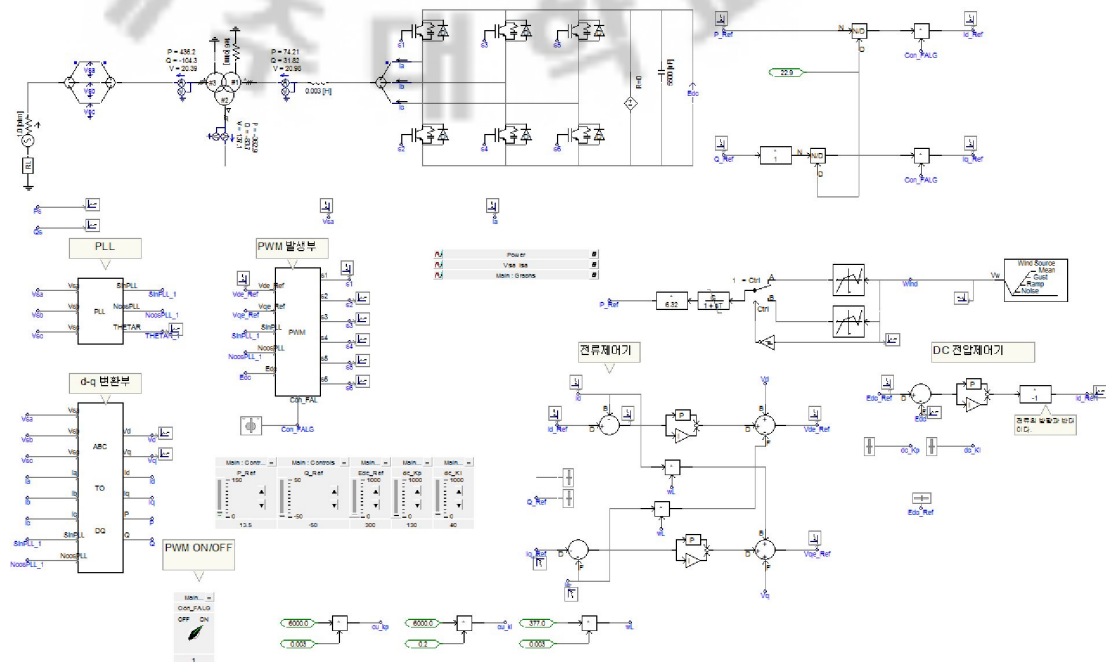


그림 13 V112 3.0MW 모델링

### 3.1.2 전압형 HVDC 시스템 모델링

전압형 HVDC 시스템의 운전원리는 그림 14에서 보여주는 것과 같이 정류단과 인버터단의 3상 리액터를 거쳐 AC계통과 연계된 전압형 컨버터를 통하여 전압형 HVDC 시스템의 전압을 승압하고, 입력 전압과 전류의 위상각을 제어함으로써 유효전력과 무효전력을 제어하는 것이다. 그림 14와 같이 간단하게 설명될 수 있다.

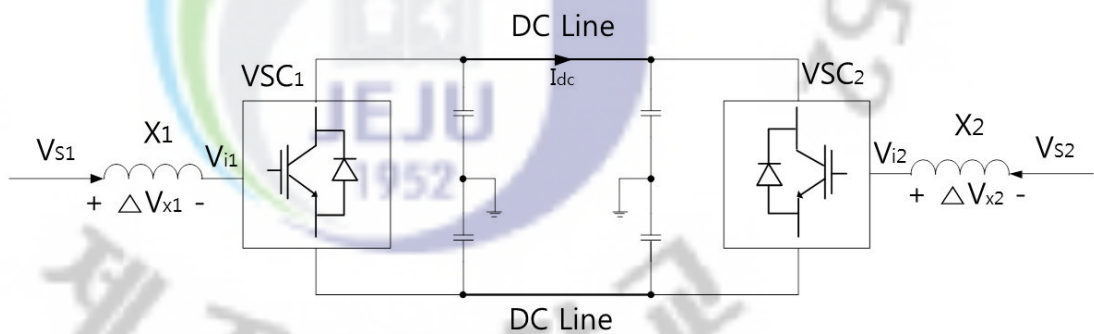


그림 14 전압형 HVDC 시스템의 개념도

그림 15 (a)와 (b)는 그림 14에서 보여주는 전압형 HVDC 시스템의 운전 벡터도를 보여주고 있는 것으로 이 벡터도는 양쪽의 터미널이 인버터나 정류 모드로 동작하여도 타당한 것을 보여주고 있다. 여기서, 인버터 동작은 유효전력이 직류측으로부터 교류측으로 흐르는 것으로 정의되며, 반면에 정류 동작은 교류측으로부터 직류측으로 유효전력이 흐르는 것을 의미한다. 따라서 그림 15에서 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 표현될 수 있다[11].



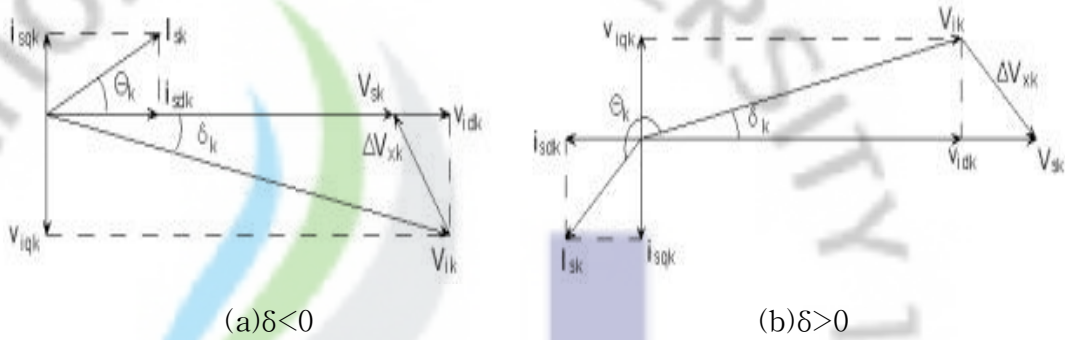


그림 15 전압형 컨버터를 사용한 HVDC 전력전송 운전의 일반적인 공간 벡터

$$P_k = \frac{V_{sk} V_{ik}}{X_k} \sin \delta_k \quad (4)$$

$$Q_k = \frac{V_{sk}^2}{X_k} - \frac{V_{sk} V_{ik}}{X_k} \cos \delta_k, \quad k = 1, 2 \quad (5)$$

단,  $V_{sk}, V_{ik}$  : 송전선 양단의 전압

$X_k$  : 송전선의 리액턴스

$\delta_k$  :  $V_{sk}$ 와  $V_r$ 간의 위상차 각

식(4)에서 정(-)과 부(+) 유효전력은 각각 인버터 모드와 컨버터 모드라고 할 수 있고, 이것은 전압과 전류의 위상이 정(+)인지 부(-)인지에 따라 결정되어진다. 그림 15와 식 (4)와 (5)로부터 다음과 같은 결론이 도출되어질 수 있다 [12][13].

- 인버터 동작에서는 VSC출력전압  $V_{ik}$ 는  $\delta_k(\delta_k < 0)$ 에 의해 교류 전압원  $V_{sk}$ 보다 뒤지며, 직류측으로부터 교류측으로의 유효전력이 흐른다.
- 정류 동작에서는 VSC출력전압  $V_{ik}$ 는  $\delta_k(\delta_k < 0)$ 에 의해 교류전압원  $V_{sk}$ 보다 앞서며, 교류측으로부터 직류측으로의 유효전력이 흐른다.
- 유효전력은 직류버스 커패시터 전압을 유지하기 위해서 교류측과 직류측

사이에서 위상  $\delta_k$ 를 조정함으로써 제어되어진다.

- 무효전력은 비교적 작은  $\delta_k$ 에서 전압원  $V_{sk}$ 의 크기와 VSC출력  $V_{ik}$ 전압으로 결정된다.  $V_{sk} > V_{ik}$ 에서, VSC는 무효전력을 공급하고,  $V_{ik} > V_{sk}$ 에서는 무효전력을 흡수 한다.

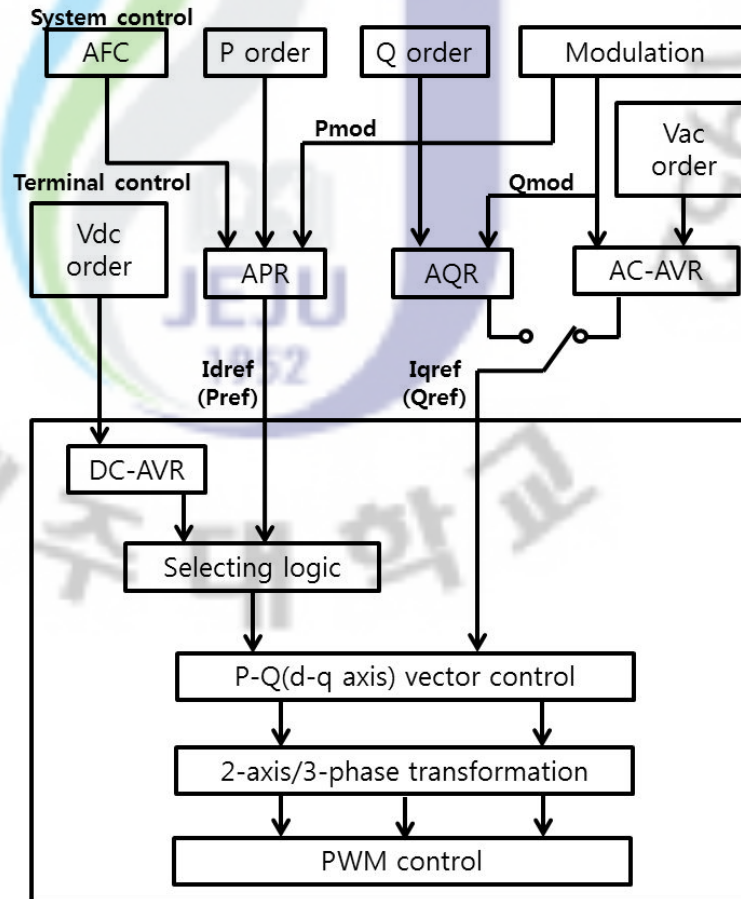


그림 16 전압형 HVDC 시스템의 블록도

그림 16은 전압형 HVDC 시스템의 제어 블록도를 보여주고 있는 것으로 이 그림에서 보는 바와 같이 전압형 HVDC시스템은 일반적으로 전류형 HVDC 시스템과 비교하여 유효전력과 무효전력을 동시에 독립적으로 제어 할 수 있는 장점이 있다. 전력 계통에서 주파수는 유효전력에 관계되는 성분이며 무효전력은 교류계통의 전압제어에 해당되는 성분이다. 그림 16에서는 유효전력은 Id로 표현되어 주파수 제어나 일정 실효 전력제어의 출력이 되고 Iq는 무효전력 성분이 되어 교류전압제어나 일정 무효 전력 제어의 출력이 된다.

전압형 HVDC 시스템은 일반적인 싸이리스터형 HVDC시스템과 같이 유효 전류  $I_d$ 와 컨버터의 직류출력 전압의 값을 최대값/최소값 선택기를 거쳐 동작점이 결정된다. 동작 보드는 그림 16의 최대값/최소값 선택기(Selecting Logic)에 의해서 결정 된다[14].

전압형 HVDC 시스템은 유효전력과 무효 전력을 임의로 제어할 수 있다는 장점 때문에 STACOM(Static COMPensator)이나 UPFC(Unified Power Factor Controller)의 용도로 사용되어 질 수 있다. 그러나 전압형 HVDC 시스템이 전력의 전송을 주된 목적으로 하는 것인지 아니면 계통을 보강하기 위한 하나의 이상적인 소자로 할 것인지에 따라 유효전력과 무효전력의 중요도가 달라 질 수 있다. 따라서 전압형 HVDC 시스템을 전력 전송의 개념으로만 이용할 경우에는 무효전력의 지령 값이 일정한 무효전력 제어기(AQR)를 선택하고, 계통보강 관점이라면 교류전압제어기(AC-AVR)가 무효전력 제어기로 선택되어질 수 있다. 그림 16에서 보여주는 제어블록도의 각각의 제어기는 그림 17에서 보여주는 제어기가 될 수 있으며, 그림 17 (a)는 실효전력 제어기를 보여주고 있는 것으로 제어기의 시정수 값이나 제어 알고리즘은 발전기의 터빈제어기와 유사해 질 수 있다. 또한, 그림 17 (b)는 무효전력 제어기를 보여주고 있는 것으로 발전기의 AVR제어기와 유사한 형태를 가지고 있으며 제어 게인도 발전기의 AVR 제어 게인을 설정할 때 사용하는 방법을 그대로 이용하고 있다.

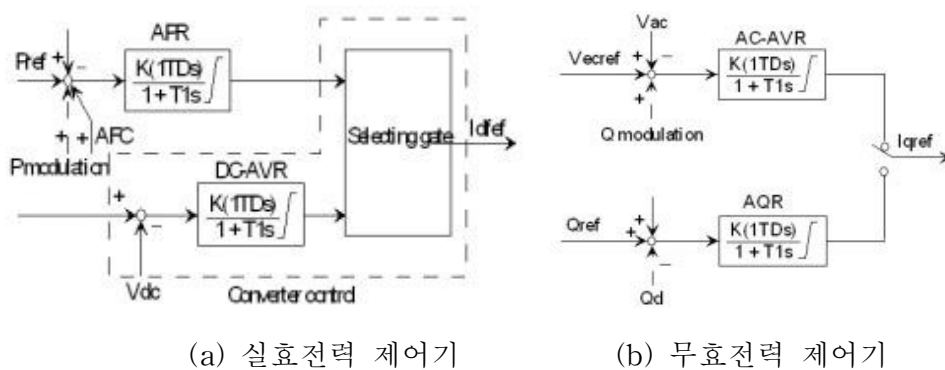


그림 17 전압형 컨버터의 제어기

그림 17에서 보여주는 “P/Q Modulation” 신호는 전압형 HVDC 시스템이 이상적인 발전기와 같이 동작할 수 있고, 기존의 발전기에서는 나타낼 수 없는 전압형 HVDC 시스템만이 구현할 수 있는 특성을 보여주고 있는 것으로, 그림 17 (a)의 실효전력 제어기에 적

용되는 P변조 신호는 발전기 관점에서 그림 17 (b)의 무효전력 제어기에 적용되는 Q변조 신호는 회전형 발전기의 AVR에 인가되는 PSS(Power System Stabilizer)신호와 같은 역할을 하는 것이다.

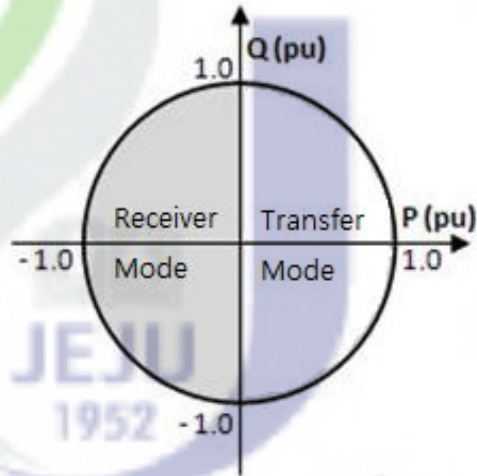


그림 18 P-Q 전압형 HVDC 시스템의 제어가능영역

전압형 HVDC 시스템이 동작할 수 있는 동작 영역은 그림 18과 같다. 그림 18에서 VSC HVDC 시스템은 4상한 동작이 가능하며 역률제어가 가능하다[15].

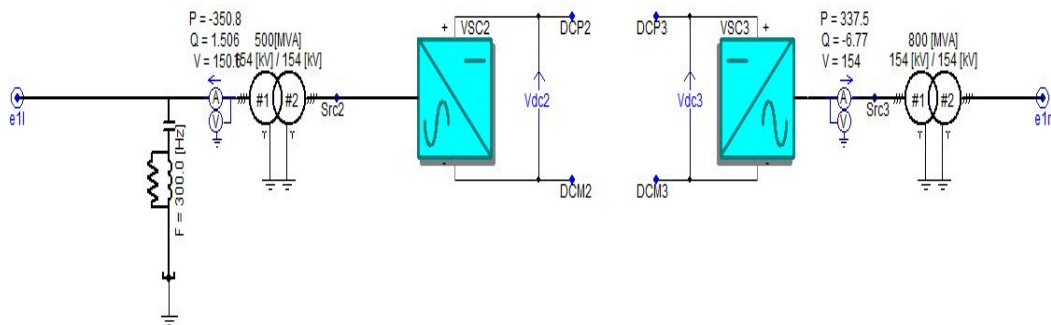


그림 19 전압형 HVDC모델링

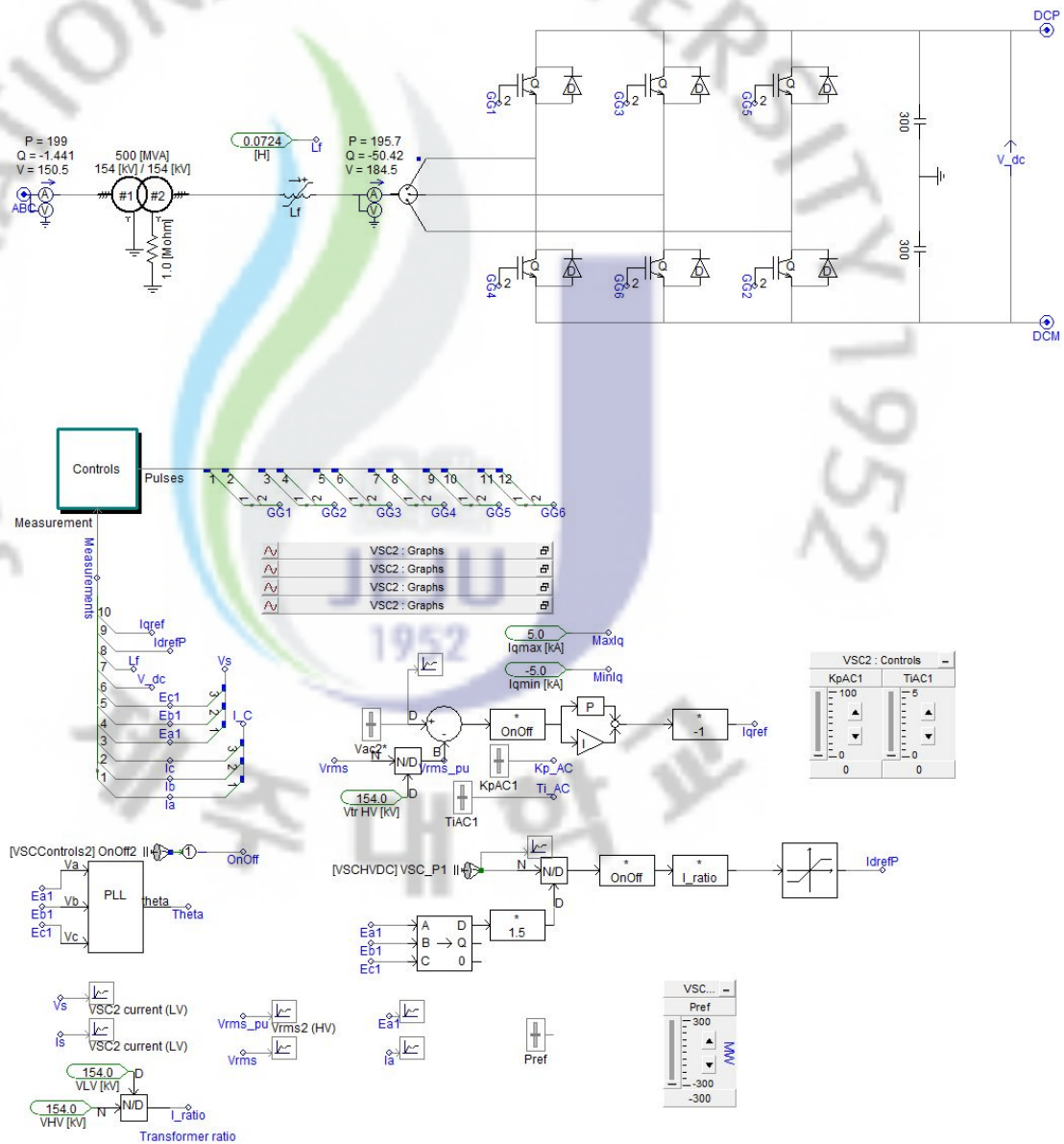


그림 20 전압형 HVDC의 컨버터 모델링

### 3.1.3 제주계통 모델링

2020년 제주지역의 부하 증가율과 표 11과 같은 풍력발전단지 용량이 건설된다고 가정하여 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 제주계통을 모델링하여 나타내면 그림 25와 같다. 경관 훼손이나 해양특성을 고려할 경우 제주 근해에 설치할 수 있는 해상 풍력의 경우 500MW까지 설치가 가능할 것으로 추정되고 육상풍력의 경우 200MW까지 수용이 가능 할 것으로 보인다. 시뮬레이션에 사용된 풍력발전기는 해상풍력용 PMSG 타입과 육상 풍력용 DFIG 타입을 적용하였다.

표 10 2020년 예상 제주 풍력 발전기 설치량

지 역	발전기 용량[MW]
제주 서부 육상	100
제주 서부 해상	200
제주 동부 육상	100
제주 동부 해상	300

전력 거래소의 전력 수요 전망을 보면, 제주계통의 부하는 2011년 이후 매년 4%씩 증가하는 것으로 예상 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 2010년 10월 최저 부하 312MW를 기준으로 매년 4%씩 가중하여 예측 하였을 경우, 2020년에는 약 462MW가 될 것으로 예상 된다.

표 11 2013년 이후 발전기 부하배분데이터(전력거래소)

구 분	공급능력 [MW]	누계 [MW]	우선순위	최대배분량 [WM]	누계 [MW]	발전기최소 운전부하 [MW]
연계선#1	150	200	1	150	150	30
연계선#2	250	400	1	250	400	30
제주내연#1	40	440	2	38	438	28
제주내연#2	40	480	2	38	476	28
남제내연#1	20	500	3	18	494	7
남제내연#2	20	520	3	17	511	7
남제주기력#3	100	620	4	95	606	55
남제주기력#4	100	720	4	95	701	55
제주기력#2	79	799	5	75	776	46
제주기력#3	79	878	5	75	851	46
한림복합	105	983	6	90	941	41
발전합계	833			941		

표 11은 2013년 이후 제주도내 발전기별 설비용량과 우선순위, 최대와 최소 운전부하를 나타내고 있으며, 남제주 내연 #1, #2는 각각 2013년 1월과 2월에 폐지할 예정이다. 발전기 운영은 비용을 최소화하기 위하여 연계선 #1, #2가 우선 운영을 시작하며, 그다음은 연료원가가 낮은 발전기부터 차례대로 운전하도록 우선순위를 지정 하였다.

1차 연계선과 2011년 말에 완공 예정인 2차 연계선은 표 3의 조건에 따라 최저 운전 조건을 적용하여 정출력 30MW로 운전하는 것으로 가정 하였으며, 풍력 발전 설비는 육상과 해상 단지를 모두 포함하여 총용량 700MW, 기존의 기간 발전소는 전력거래소의 발전소 운영계획에 따라 운영 순위가 높은 제주내연 #1, #2가 최소운전부하인 28MW로 운전하는 것을 가정 하였으며, 다른 기간 발전소는 운전 정지 상황을 가정하여 모델링을 하였다. 또한 400MW 용량을 갖는 전압형 HVDC는 주파수 운전모드로 동작하고 실시간으로 송수전이 가능하도록 성산변 전소에 연계하여 운전하도록 하였다.

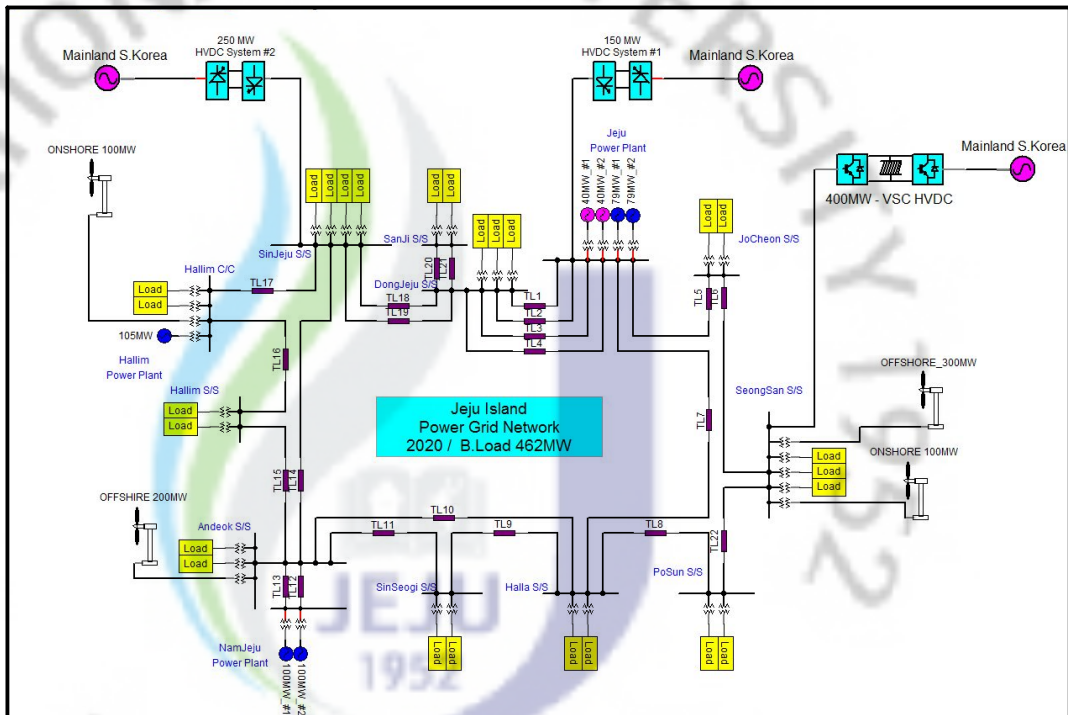


그림 21 2020년 가상 제주 전력 계통



## 3.2 해석 결과 및 고찰

### 3.2.1 풍력발전단지 해석 결과

가상 육상풍력발전단지와 해상풍력발전단지 해석을 위하여 100MW급의 단지 2곳과, 200MW, 300MW급 해상풍력단지의 풍력발전시스템으로 구성하여 가변풍속을 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 기종별 풍력발전시스템의 동특성을 검증하기 위해 RISO연구소에서 제공되는 각 풍력발전기의 출력곡선 데이터를 가지고 풍속에 대해 유효전력과 무효전력의 출력 특성을 비교하였다. 그림 22와 그림 23은 각 풍력발전단지에 대한 컴퓨터 해석한 결과 값을 나타낸 것이다.

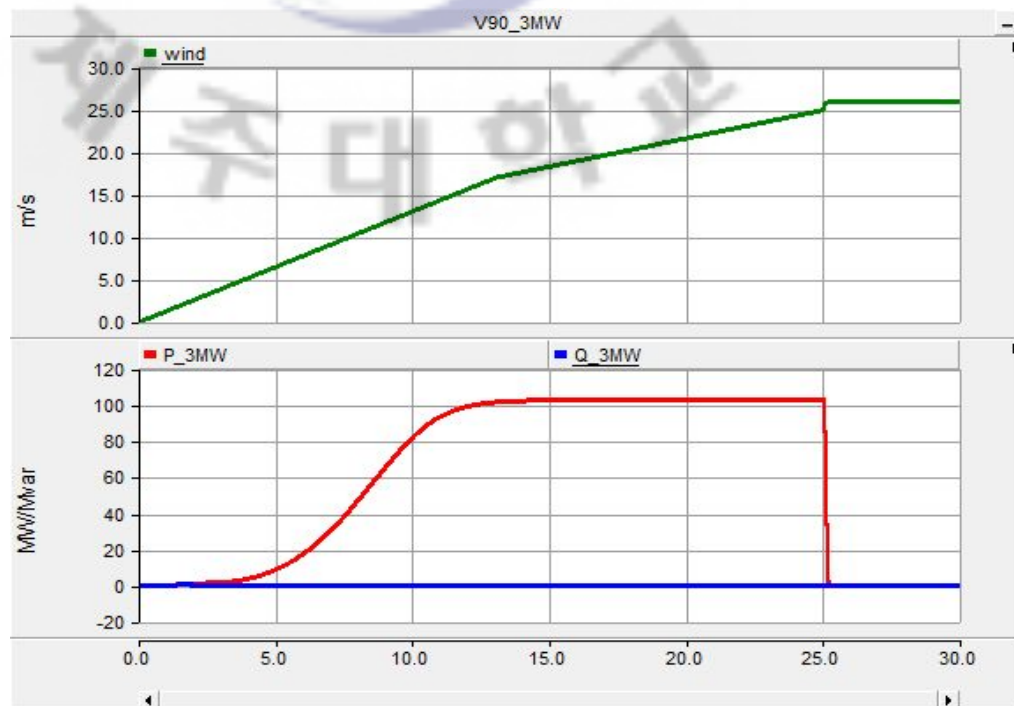


그림 22 100MW 육상풍력단지 출력 곡선

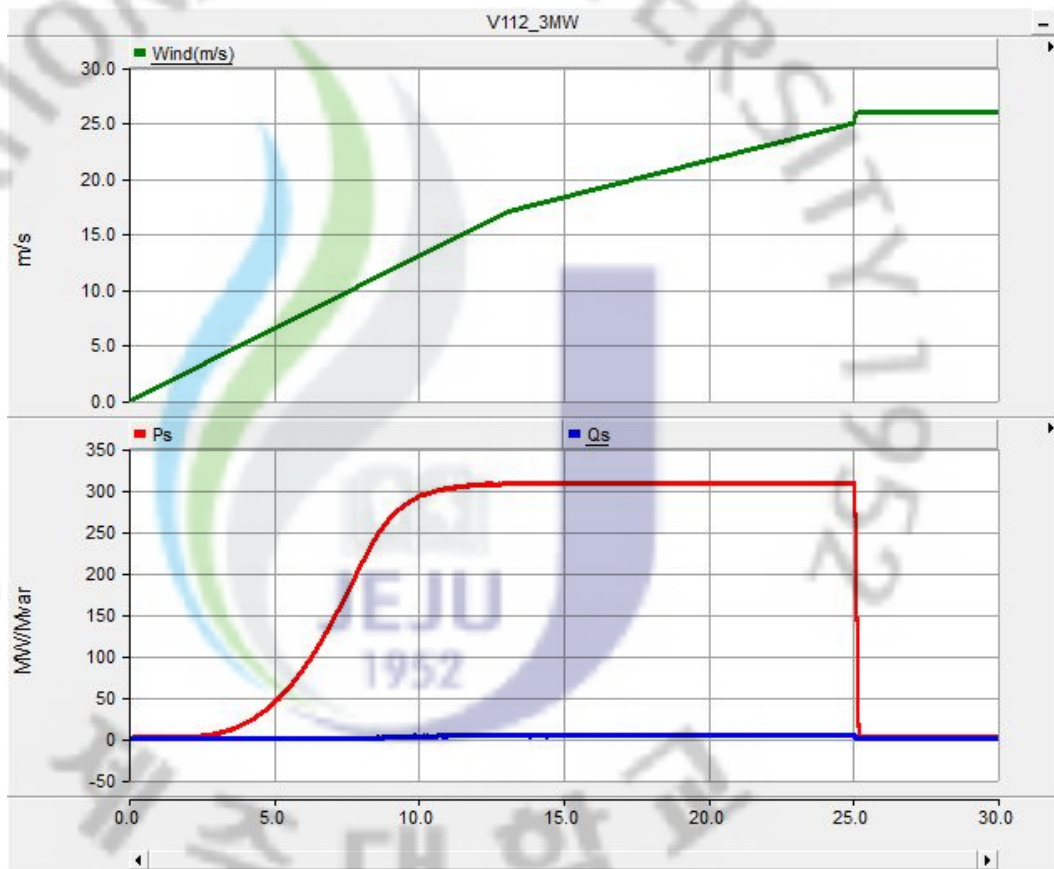


그림 23 300MW 해상풍력단지 출력곡선

그림 24와 그림 25는 각 발전단지에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 가변풍속에 대하여 풍력발전시스템의 이에 상응하는 출력을 보이는 것을 볼 수 있다.

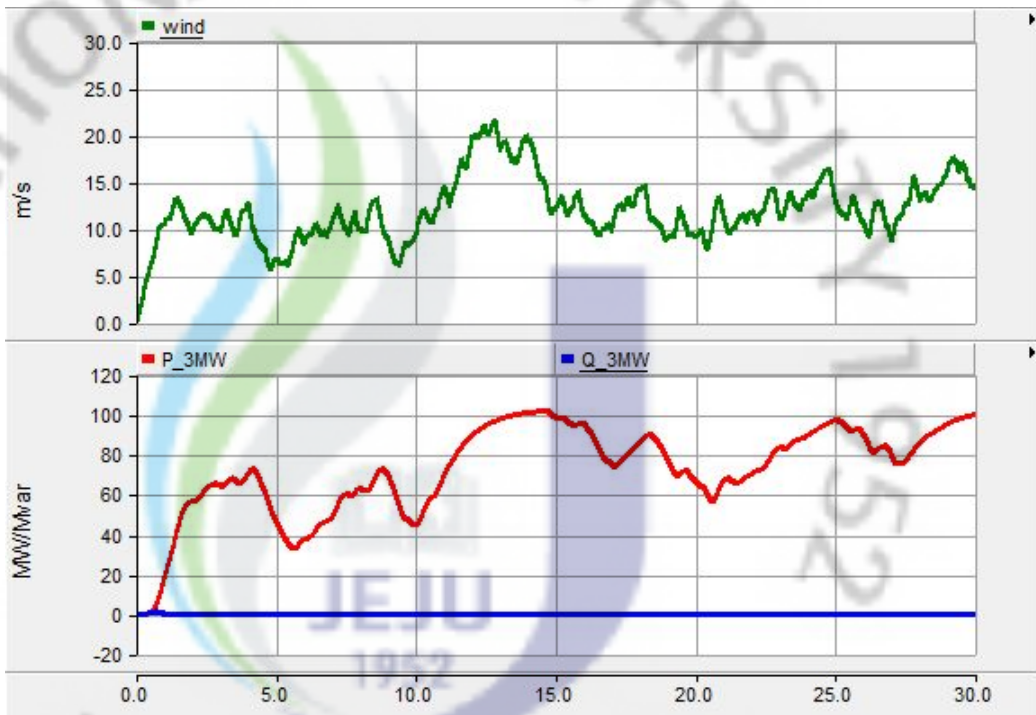


그림 24 100MW 육상풍력단지 가변풍속 출력

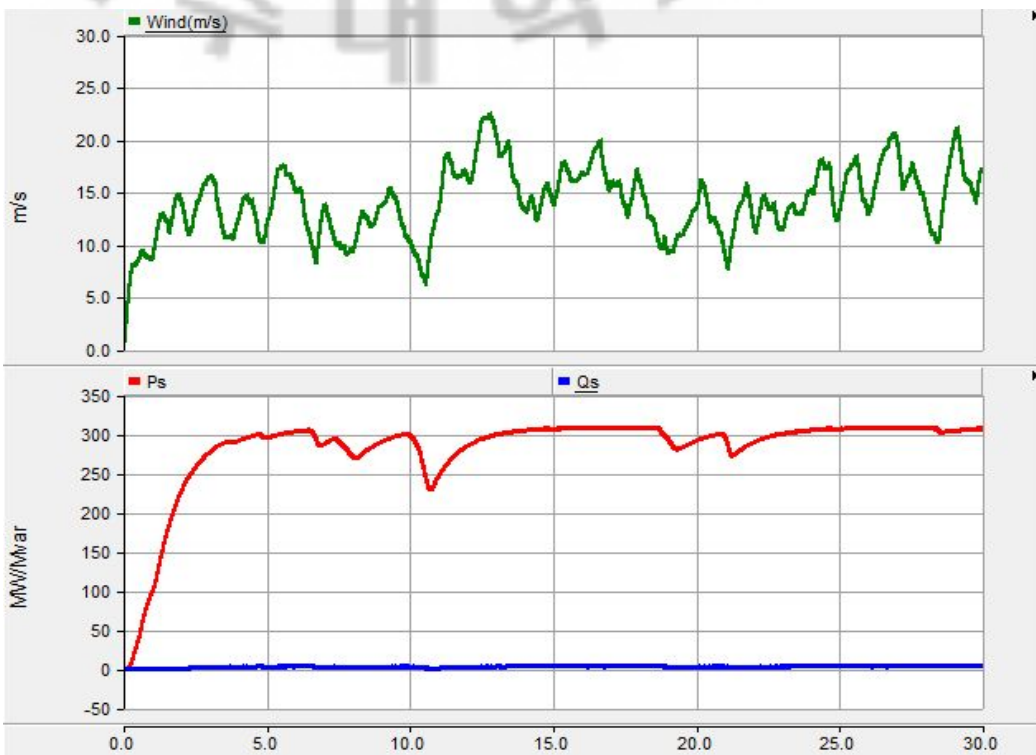


그림 25 300MW 해상풍력단지 가변풍속 출력

### 3.2.2 전압형 HVDC가 포함된 제주 계통 해석

2020년 제주계통은 두 가지의 형태로 모의 하였다. 두 가지 조건을 모의한 이유는 제주지역의 풍력발전단지 중 설비 용량이 가장 큰 300MW 해상풍력 발전 단지가 탈락할 경우 제주계통에 가장 큰 영향을 주기 때문에 이에 대한 컴퓨터 해석을 수행하여 제주계통의 전력품질 특성을 분석 하였다. 또한, 가변풍속에 따른 전압형 HVDC의 운전특성을 해석하기 위해 시뮬레이션을 수행 하였다.

#### 1) 300MW 풍력발전단지 탈락 시

각 풍력발전단지 중 최대출력용량을 갖는 300MW 동북 해상풍력 발전단지가 최대 출력에서 탈락 사고에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 풍력발전단의 탈락은 5초에서 300MW의 발전단지가 탈락하였으며, 이 때의 시뮬레이션은 그림 26~30과 같다.

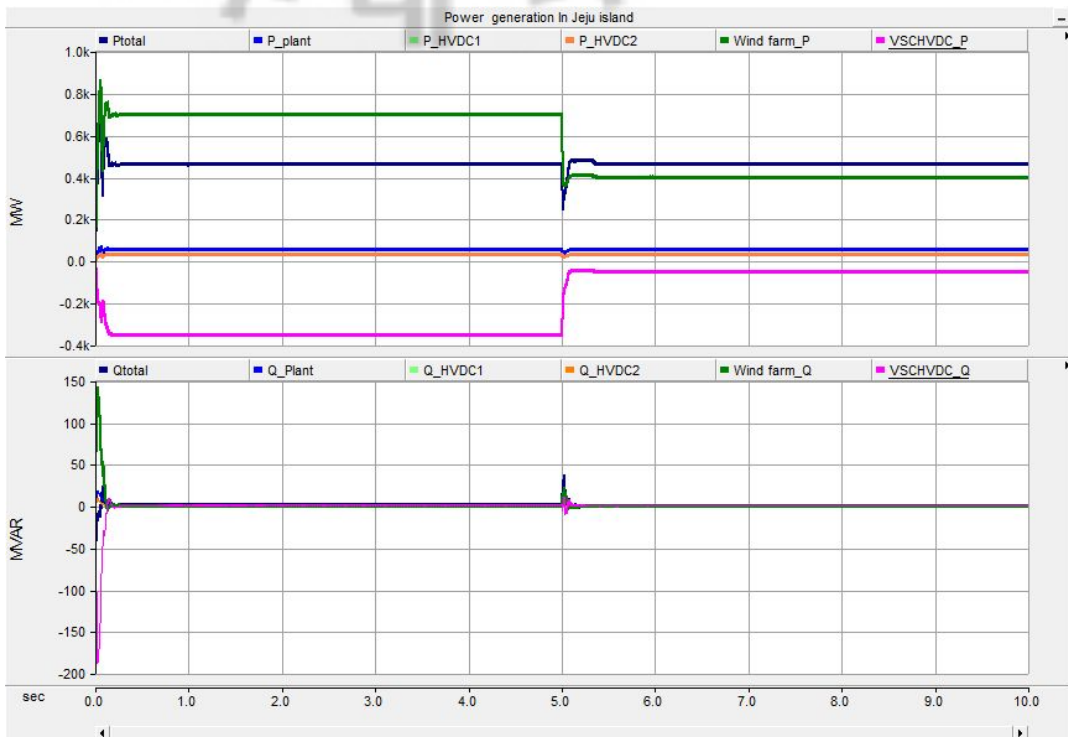


그림 26 풍력발전 탈락 시 제주계통의 유효전력과 무효전력 변화

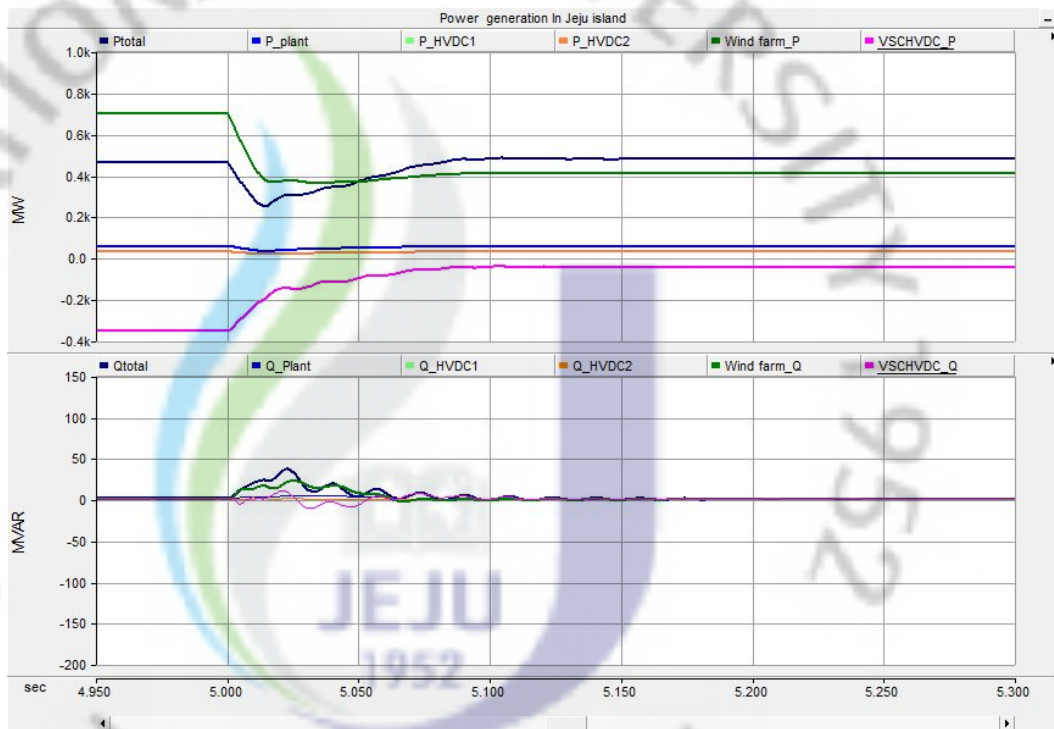


그림 27 풍력발전 탈락 시 제주계통의 유/무효전력 변화

시뮬레이션 결과 풍력발전단지가 탈락함에 따라 부하에 공급하는 전력과 전압형 HVDC는 0.1초 내에 발전단지의 탈락에 대해 전력 전송량을 조절하여 제주 계통이 안정화됨을 볼 수 있다.

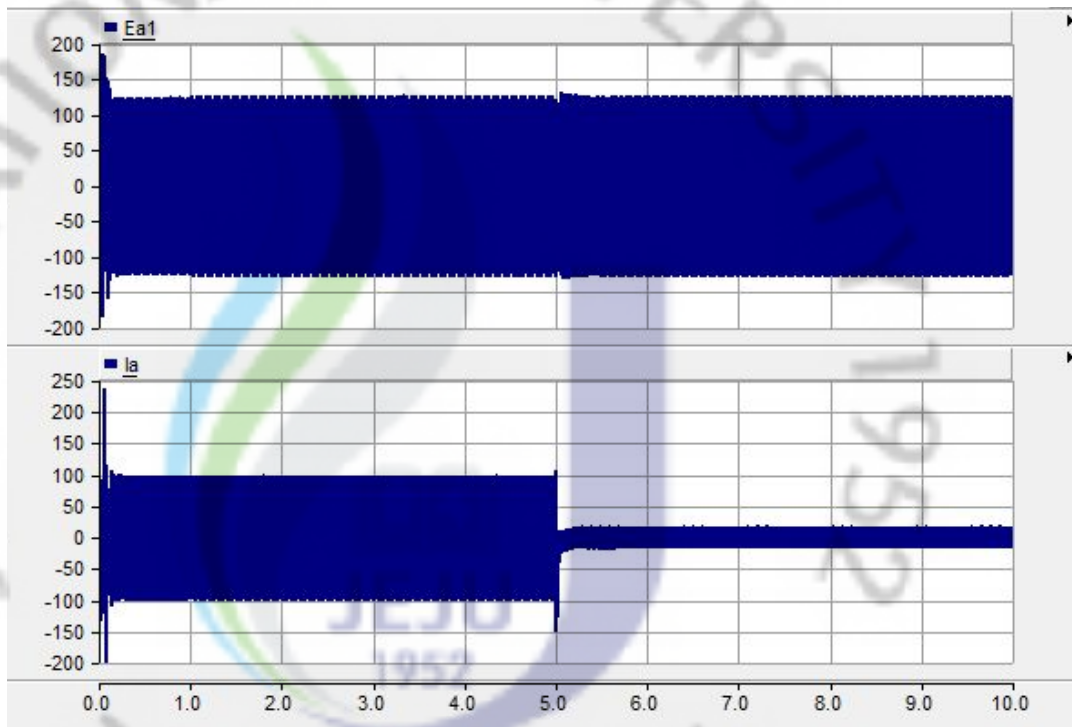


그림 28 제주계통측 상전압과 상전류 변화\_1

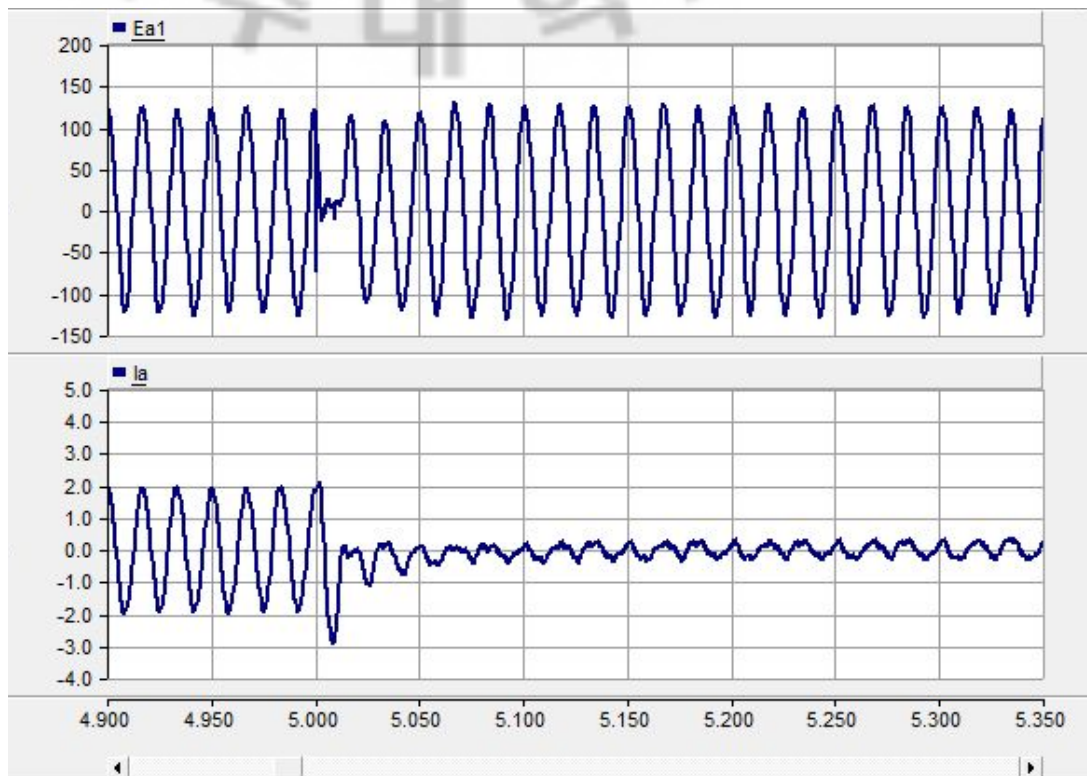


그림 29 제주계통측 상전압과 상전류 변화\_2

그림 28~29는 전압형 HVDC의 전압과 전류 파형을 비교 한 것이다. 전압과 전류 파형을 보게 되면, 풍력단지의 탈락 후 0.05[S] 이내에 전압과 전류가 정상적인 파형으로 되고 있음을 알 수 있다.

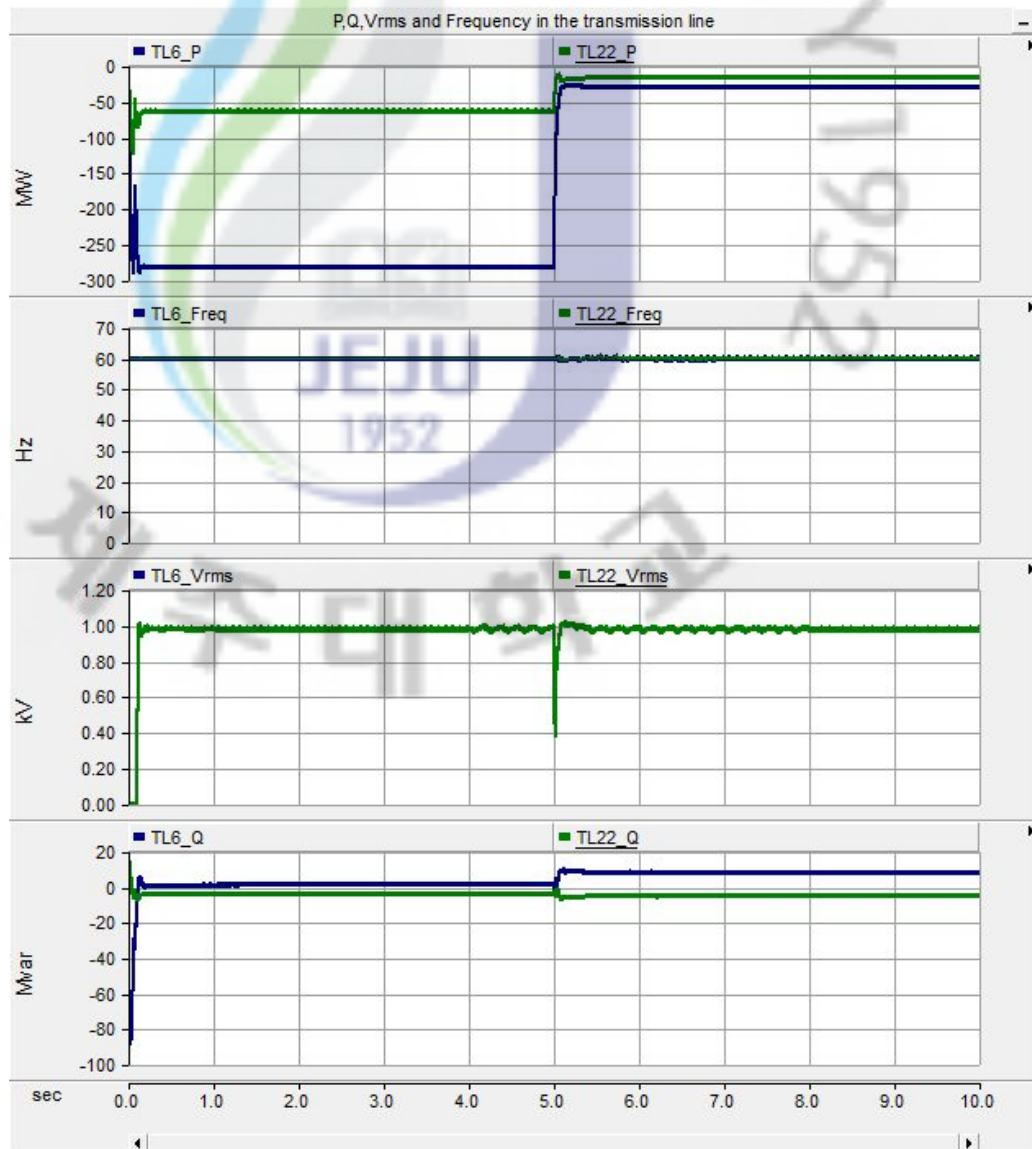


그림 30 전압형 HVDC에 연결된 TL의 전력, 주파수 전압 변화

그림 30은 전압형 HVDC가 접속된 성산S/S와 연결된 TL의 유/무효 전력과 주파수, 전압을 나타내고 있다. 풍력 발전단지가 탈락 후 약 0.1초만에 TL의 전압은 정상상태로 돌아오는 것을 확인 할 수 있다.

## 2) 가변풍속하에서의 해석

각각의 풍력발전단지에 가변풍속에 따른 각 발전단지의 출력특성과 이에 따른 전압형 HVDC의 동작특성에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 여기서 각각의 풍력발전단지는 육상 2곳과 해상 2곳을 대상으로 표 12에 나타낸 것과 같은 데이터를 이용하여 육상 및 해상의 허브 높이에 따른 WAsP로 예측한 값을 적용하였다. 표 12는 육상 풍력단지와 해상 풍력단지의 허브높이 80m와 84m에서의 평균풍속 예측결과를 나타내었고, 그림 31은 예측 풍속에 대한 PSCAC/EMTD를 이용한 바람 모델이다.

표 12 제주지역 평균 풍속 예측결과(월 평균 최대 풍속)

지 역	평균 풍속[m/s]
동부 육상	8.4
동부 해상	11.5
서부 육상	9.6
서부 해상	13.3



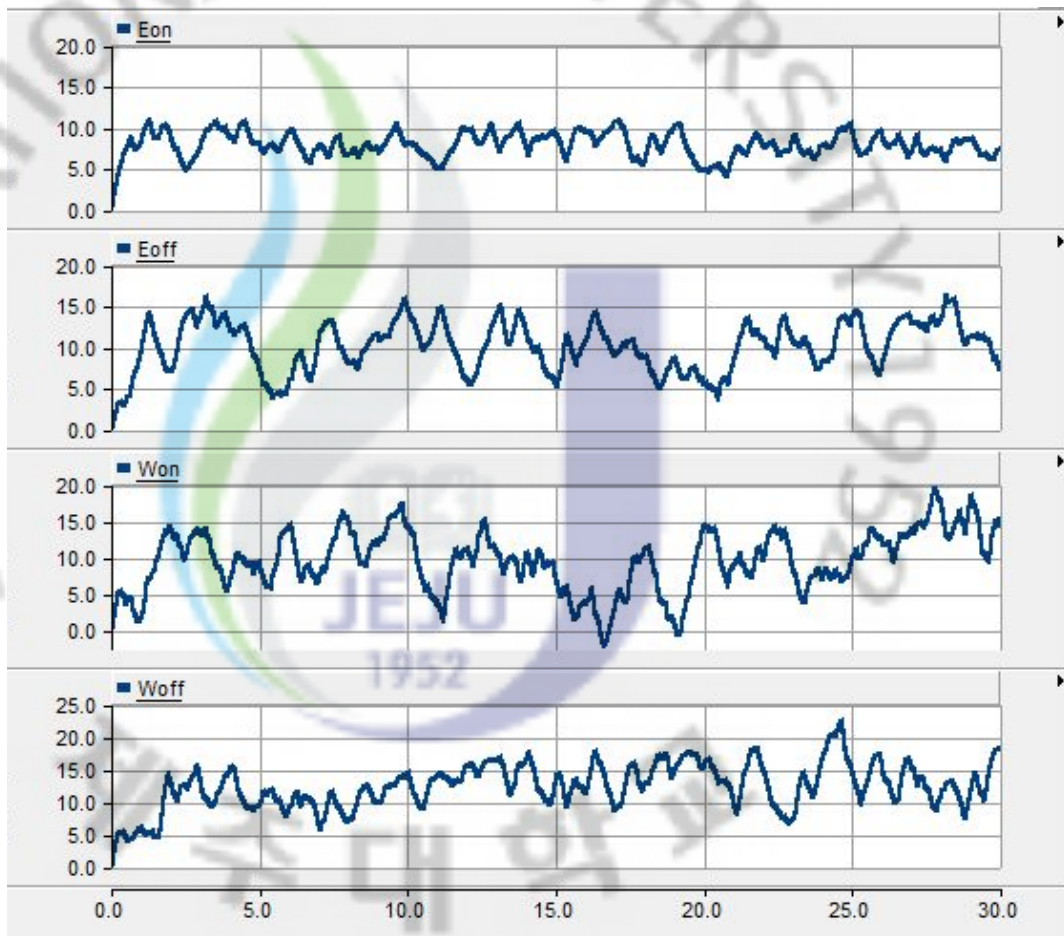


그림 31 각 발전단지의 바람모델

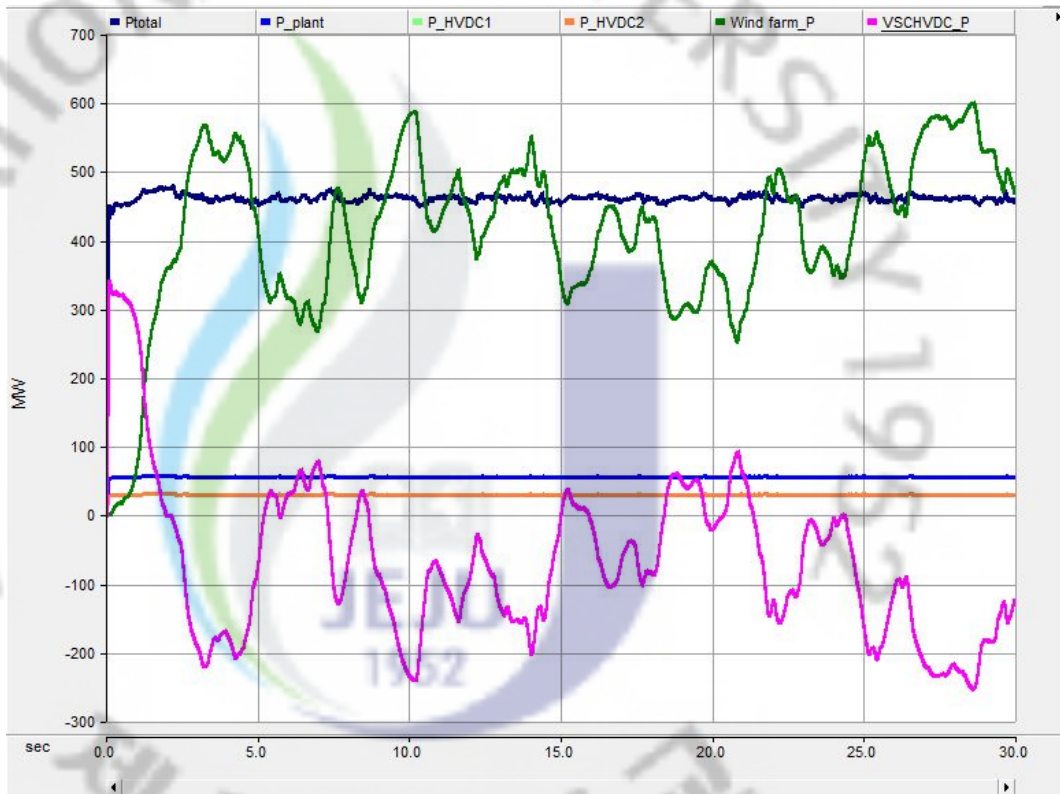


그림 32 가변풍속 운전 시 제주계통의 유효전력 변화

시뮬레이션 결과 가변출력에 의한 풍력발전단지의 출력은 제주 계통에 필요한 전력외의 잉여전력은 전압형 HVDC에 의해 육지 계통으로 전부 전송하여 제주 계통에 필요한 전력을 안정적으로 유지 하는 것을 볼 수 있다.

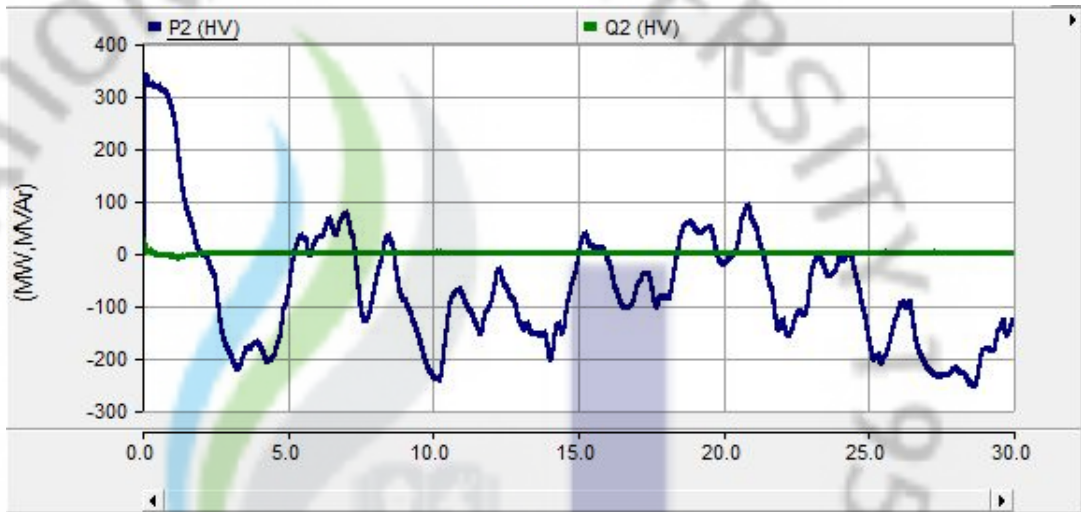


그림 33 전압형 HVDC의 유효전력과 무효전력의 변화

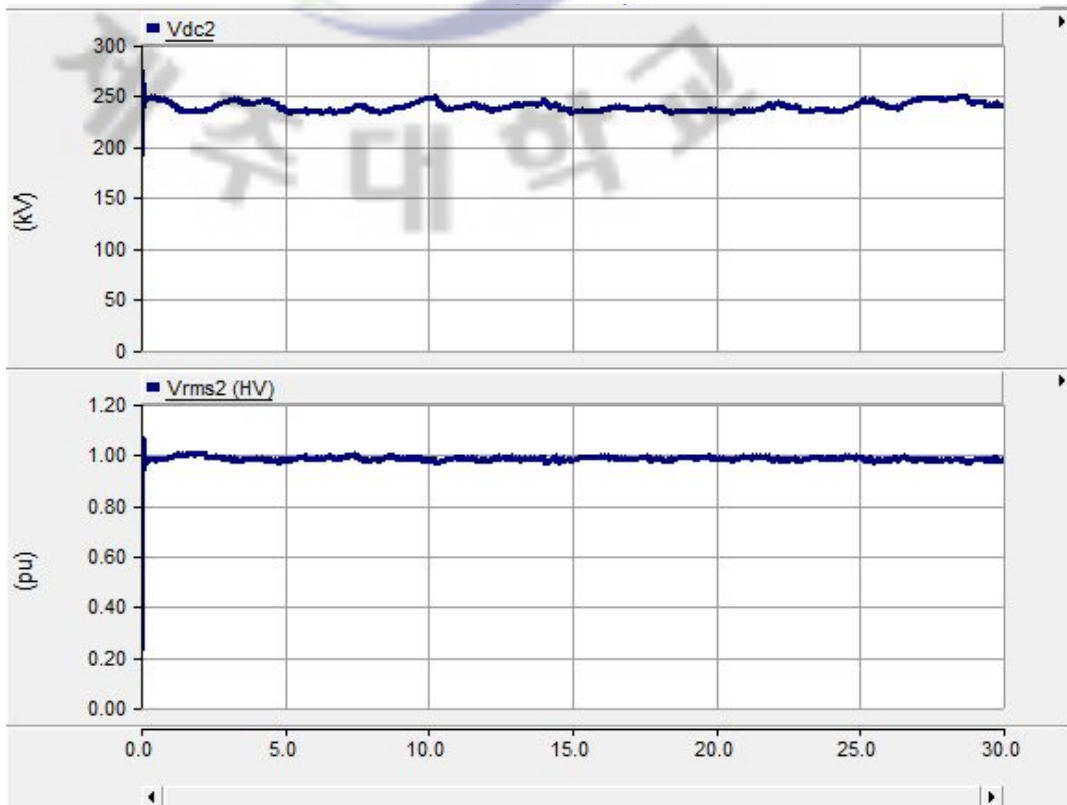


그림 34 전압형 HVDC의 직류링크 전압과 교류전압

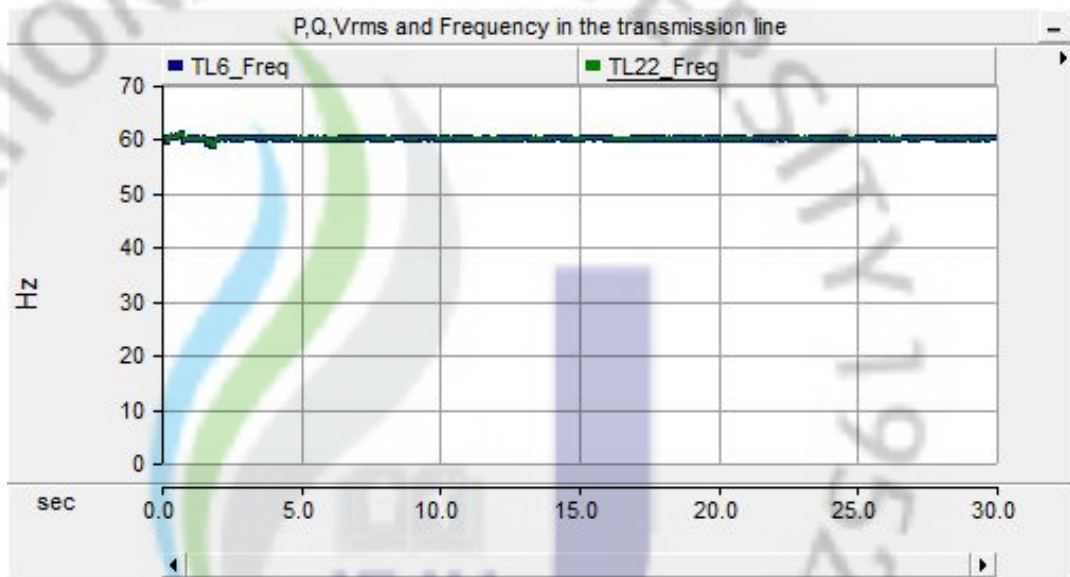


그림 35 전압형 HVDC에 연결된 TL의 주파수

제주계통을 해석한 결과 대규모의 풍력 발전설비가 계통에서 탈락 하여도 전압형 HVDC의 응답 특성이 우수하여 약 0.1초 이내에 제주계통의 잉여 전력을 역송하던 전압형 HVDC는 제주계통으로 전력을 전송함을 확인할 수 있었다. 또한 가변풍속에 대하여 전압형 HVDC가 육지계통에 역송하여 풍력발전에서 발생하는 가변전력에 대해 빠르게 대응함을 볼 수 있다.

### 3.2.3 결과 및 고찰

전압형 HVDC의 동특성 시뮬레이션 결과 풍력단지 탈락 시 전압형 HVDC는 약 0.1초 이내에 정상상태로 동작함으로써 계통의 안정화 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 상전압과 상전류도 약 0.5초 이내에 정상화 되어 사고에 대한 전압형 HVDC의 동특성이 매우 우수함을 볼 수 있었다.

또한 가변 풍속에 대하여 전압형 HVDC는 제주계통의 잉여 전력을 신속하게 육지 계통으로 역송을 하고, 풍력발전기의 발전량이 적을 경우 제주 계통에 필요한 전력을 전송함으로써 제주계통에 일정한 전력을 공급하며, 가변되는 전력에 대하여 전압형 HVDC의 DC링크 전압과 계통측의 상전압은 일정하게 유지됨을 보여 전압형 HVDC는 매우 안정적인 제어가 됨을 볼 수 있었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 WindPRO와 WAsP프로그램을 이용하여 제주지역에서의 해상풍황 분석을 통하여 수심 30m 이내에 경제성을 확보할 수 있는 가용단지용량을 나타내었다. 이 결과에서 보면 행원 해상에 300MW, 가파도 해상에 200MW가 적당한 용량으로 볼 수가 있었다. 2020년 까지 제주지역에 육상풍력 200MW, 해상풍력 500MW, 총 700MW의 풍력발전단지가 조성된다는 가정 하에 제주 계통 운전조건을 제 1연계선과 제 2연계선은 정출력의 최소 운전조건인 각각 30MW로 운전하고, 전압형 HVDC는 주파수 운전모드로 동작하도록 하였다. 전압형 HVDC가 연계된 제주계통을 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 모델링 하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 풍력발전단지 모델링 결과 풍력발전기의 등가 모델을 사용하여 모델링 하였을 경우 발전단지의 모델링이 수월하며, 풍속특성에 대한 풍력단지 해석이 용이 하였다.
2. 전압형 HVDC의 모델링을 실제 전압형 컨버터모델을 적용하여 실제 제어 알고리즘에 대한 분석을 하였으며, 시뮬레이션 결과 전압형 HVDC의 제어 알고리즘의 구현이 가능 하였다.
3. 300MW 풍력발전단지가 탈락 시 전압형 HVDC에서 실시간으로 전력을 보상 하여 제주계통에서의 영향은 거의 없었다.
4. 가변풍속 하에서 제주지역의 총 풍력발전 용량이 제주계통에서 필요한 전력보다 많거나 적었을 경우 실시간으로 전압형 HVDC가 응동하여 제주계통의 안정화를 이루고 있었다.

이상의 결과를 토대로 2016년 도입 검토 중인 제 3연계선은 응답특성이 우수한 전압형 HVDC로 적용할 경우 풍력발전단지의 탈락 사고 및 풍력발전단지의 가변 출력에 대한 제주 계통의 안정화를 도모할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 신재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈-풍력, 2008.
- [2] 지식경제부, 해상풍력발전산업로드맵, 2010.
- [3] 제주발전연구원, “제주지역 대규모 해상풍력발전 시범단지 조성방안 기초 연구”, 현안과제 2011.
- [4] 지식경제부, 제5차 전력수급기본계획, 2010.
- [5] 한국중부발전(주) “상명·이시돌지구 풍력발전건설 타당성 분석 최종보고서”, 한국 중부발전(주), pp.45-46 2010.
- [6] EMD International A/S, WindPRO Module Description, pp.19-26, 2006.
- [7] PSCAD/EMTDC Manual, 2006.
- [8] HVDC Light Topology, ABB Handbook, 1999.
- [9] M.J.Verdonschot, Modeling and Control of Wind turbines using a Continuously Variable Transmission, DCT, 2009.
- [10] 이춘우, PSCAD/EMTDC에 의한 한경풍력발전단지의 모델링과 해석, 석사 학위논문, 2009.
- [11] 김찬기, 장길수, 임성주, 추진부 공저, “HVDC와 전력전자” 생능출판사, pp.374-384, 2006.
- [12] 김찬기, 광주식, 고봉언, 우정욱, 심응보, 정길조, “전압형 HVDC 시스템 제어기설계”, 전력전자학술대회 논문집 2000. 7, pp.645-650, 2000.
- [13] 송길영, 이윤희, “신편 전력계통공학” 동일출판사, pp.343-381, 2001.
- [14] Ana - Irina Stan, Daniel - Ioan stoe, “CONTROL OF VSC-BASED HVDC TRANSMISSION SYSTEM FOR OFFSHORE WIND POWER PLANTS”, Master Thesis, Aalborg University, SPRING SEMESTER, 2010.
- [15] Stephan Meier, “Novel Voltage Source Converter based HVDC Transmission System for Offshore Wind Farms”, KTH VETENSKAP OCH KONST, Stockholm, 2005.

## 감사의 글

대학원 생활을 시작한지 어느덧 2년 6개월이라는 시간이 흘렀습니다. 그동안 일생을 보냄에 있어 피가 되고 살이 되는 좋은 경험을 많이 하였고, 많은 분들의 따뜻한 관심과 애정 어린 질책 속에 또다시 한층 성숙해질 수 있었습니다. 또한 논문과 보고서를 쓰면서 깊이 있는 전공 지식들을 습득할 수 있었습니다. 그리고 대학원 생활을 통하여 학문에 접근하는 방법을 조금이나마 경험할 수 있는 기회가 되었고, 이 모든 경험들이 저의 생활에 많은 도움이 되었습니다.

그동안 부족한 저를 성심껏 지도해 주시고 항상 따뜻한 격려와 많은 가르침을 주신 김일환 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 대학원 생활동안 항상 옆에서 지켜보시며 열심히 하라는 충고와 조언, 그리고 격려를 아끼지 않으신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께 다시 한번 감사드립니다. 그리고 항상 저에게 많은 관심과 격려, 지원을 아끼지 않았던 김준철 형님과 부정환 형님, 중부발전소의 고지호 차장님, 배형섭 차장님, 고병욱 대리님, 남부발전소의 이춘우 차장님, 장동훈 대리님, 전력거래소의 김영환 부장님, 한라과워의 장대현 대표이사님께 감사드립니다.

함께 2년이라는 시간동안 연구실에서 함께 고생하면서 지내온 김재홍 형과 동기 안진홍, 그리고 연구실 후배 강명석, QUACH NGOC THINH, 변익수, 진경민, 김승현, 김용기, 김동완, 그리고 전력전자 연구실 선배님들과 대학원생 김형택 형과 강형규, 명호산, 김봉언, 양수형, 김진 그리고 대학원 생활을 하는데 도움을 많이 준 김도진 선배님과 김창진 선배님, 김상연, 이진재, 이길연 조교선생님께 고마움을 전합니다.

끝으로 저를 믿고 사랑하고 아껴주시는 부모님과 누나, 형, 형수님 그리고 조카 동욱, 유나, 서연에게도 사랑하고 고맙다는 감사와 사랑의 글을 전합니다.

대학원 과정이 배움의 끝이 아니라 앞으로 나아가기 위한 바탕이라 생각하며 앞으로 더 넓은 곳으로 나아갈 수 있는 사람이 되도록 항상 노력하겠습니다.

2011년 6월

김대현 드림