

碩士學位論文

제주지역 풍력발전시스템  
분석 및 전력계통 해석



濟州大學校 大學院

電氣工學專攻

姜 志 潤

2009年 12月

# 제주지역 풍력발전시스템 분석 및 전력계통 해석

指導教授 金世鎬

姜志潤

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

姜志潤의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

吳性寶



委員

金一煥



委員

金世鎬



濟州大學校 大學院

2009年 12月

# Analysis of Wind Generation and Power Grid System in Jeju

Jee-Yoon Kang

(Supervised by professor Se-Ho Kim)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 12

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLES .....	ii
SUMMARY .....	iii
I. 서론 .....	1
II. 풍력발전시스템 분석 .....	3
1. 풍력 시장 현황 .....	3
1) 국내 풍력 시장 .....	3
2) 해외 풍력 시장 .....	4
2. 제주지역 풍력발전시스템 출력 특성 분석 .....	6
1) 풍력설비 현황 .....	7
2) 풍력발전 평활 효과 분석 .....	8
3) 풍력발전 유효용량 .....	14
III. 제주 전력계통 해석 .....	18
1. 해석모델 .....	18
1) 부하배분 및 UFR 부하차단 설정 .....	18
2) 발전기배분 .....	19
2. 2011년 제주계통 PSS/E 과도안정도 시뮬레이션 결과 .....	20
1) 풍력발전단지 102MW 탈락 사고 .....	24
2) HVDC 연계선 2회선 탈락 사고 .....	27
3) 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 .....	30
IV. 결과 및 고찰 .....	34
V. 결론 .....	36
참 고 문 헌 .....	37

## LIST OF FIGURES

그림 1 덴마크 서부지역에서의 풍력발전시스템의 출력 변동률 누적도수분포도	8
그림 2 영국과 웨일즈지역의 1,000MW 풍력단지 출력 시뮬레이션	9
그림 3 제주지역 풍력단지별 출력 변동률 누적도수분포도	9
그림 4 한 지역 풍력단지와 전체 풍력단지 출력 변동률 비교	11
그림 5 한 지역 풍력단지와 전체 풍력단지의 출력 패턴 비교	12
그림 6 각각의 풍력단지 출력 패턴 비교	13
그림 7 제주계통 계절별 평균 전력수요량	16
그림 8 제주계통 계절별 풍력발전량	17
그림 9 제주계통 계절별 평균 설비이용률	17
그림 10 풍력발전단지 102MW 탈락 사고 시 계통 주파수	25
그림 11 풍력발전단지 102MW 탈락 사고 시 154kV 모선전압	27
그림 12 HVDC 연계선 2회선 탈락 시 계통 주파수	28
그림 13 HVDC 연계선 2회선 탈락 사고 시 154kV 모선전압	30
그림 14 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 시 계통 주파수	32
그림 15 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 시 154kV 모선전압	33

## LIST OF TABLES

표 1 제주지역 풍력발전단지 현황 및 허가 현황 .....	7
표 2 제주지역 풍력단지별 출력 변동률 누적도수분포빈도수 .....	10
표 3 전체 풍력발전단지 최대 출력 변동률 .....	11
표 4 2008~2009년 계절별 평균 전력수요량 및 풍력발전량 .....	16
표 5 제주 풍력발전시스템의 계절별 유효용량 .....	17
표 6 2011년 제주지역 부하배분 .....	18
표 7 제주계통의 UFR 단계별 차단 부하 .....	19
표 8 제주지역 발전기 공급 우선순위 .....	20
표 9 여름철 최저 부하의 발전기 배분 .....	21
표 10 여름철 최대 부하의 발전기 배분 .....	21
표 11 겨울철 최저 부하의 발전기 배분 .....	22
표 12 겨울철 최대 부하의 발전기 배분 .....	22
표 13 HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하의 발전기 배분 .....	23
표 14 HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하의 발전기 배분 .....	23

## SUMMARY

The large amount of green house gas emissions in the atmosphere has substantially led to global warming since the industrial revolution. To prevent the global warming, developed and developing countries adopted Kyoto protocol in 2005 in Kyoto, Japan. The world advanced countries and the European Union have already started some social activities such as energy saving technologies, environmentally friendly architectures and new renewable energy developments.

In August, 2008, Korea announced green growth policy for the purpose of establishing low energy consumption and low carbon society, developing fossil fuel energy alternatives, powering green energy growth and accomplishing energy independent and welfare. In particular, the new renewable energy activating plans have raised concerns about the construction of wind farm and large scale wind farms are going to be built in Jeju-do.

This paper is aimed to examine the current situation of wind power system in other countries compared with Jeju-do and analyze the wind power output fluctuation characteristics and its smoothing effects. It also evaluates capacity credit suitable for Jeju grid based on some methods of evaluating capacity credit of foreign countries.

With a view to seeking the operating methods of Jeju grid based on the increase in wind power facilities, Jeju wind power grid in 2011 is designed using PSS/E software. This is to implement the simulation of transient stability of wind power system on the peak and off-peak load period in summer, winter and HVDC overhaul period to investigate wind power, HVDC and Jeju thermal power generation out of service. This simulation is carried out to examine effects of out of service cases on Jeju grid frequency and voltage and find out the stable operation of Jeju grid.

## I. 서론

지구온난화를 방지하기 위하여 세계 선진국들과 유럽공동체 EU에서는 이미 에너지 절약, 친환경적 건축물 건설 및 신재생에너지 개발 등 사회적으로 많은 활동을 시작하였다. 우리나라에서는 2008년 에너지 저소비·저탄소사회 구현, 탈 화석에너지화, 그린에너지산업의 성장동력화 그리고 에너지 자립·에너지 복지 실현을 목표로 하는 녹색성장을 발표하였다. 특히, 신재생에너지 활성화 방안에 따라 대규모의 풍력단지 건설에 대한 관심이 높아지고 있으며, 바람자원이 풍부한 제주도에 도 대규모의 풍력단지가 조성되고 있다.

제주도는 수리적 위치, 난류의 영향, 해양상의 섬 등 이유로 해양성 기후를 나타내며 기온의 연교차나 일교차가 육지에 비하여 작고 해륙풍의 발생빈도가 높다. 제주도의 연평균풍속은 3~6m/s로 내륙보다 1~2m/s 강한 바람이 불며, 서부지역이 강한 6.9m/s이고, 북부가 3.8m/s, 동부와 남부지역은 연중 3m/s로 크게 나타난다. 제주도의 우수한 풍력자원을 이용하기 위하여 곳곳에 풍력발전시스템단지가 증설되고 있어 풍력설비의 출력 변동 특성 및 제주계통에 미치는 영향을 분석할 필요성이 크게 대두되고 있다.[2]

해외의 경우 대규모 전력계통 및 지리적으로 매우 넓게 분포되어진 풍력단지들에 대하여 평활 효과 분석하고 있다.[3] 풍력설비용량 전체가 전력수급에 기여할 수 없기 때문에 풍력발전설비 기여용량은 일반 발전설비와 다르게 평가되어야 하며, 이러한 풍력발전설비의 기여용량을 풍력설비 유효용량 혹은 용량가치(Capacity Credit)로 선정하여, 계통운영에 있어서 안정적이고 경제성 있는 전력수급을 할 수 있도록 해야 한다.[4] 해외의 풍력발전의 유효용량의 선정에는 ELCC(Effective Load Carrying Capability)와 피크기간에 대한 풍력 설비이용률(Peak Period Method)을 이용한 방법이 주로 이루어지고 있다.[5]

본 논문에서는 국내 및 해외 풍력발전시스템의 현황을 알아보고, 제주지역 풍력발전시스템의 출력 변동 특성에 대하여 분석하고자 한다. 제주지역의 경우 과거의 데이터가 충분하지 않고, 풍력설비의 용량이 해외의 용량에 비하여 매우 적기 때문에 ELCC의 방법으로 유효용량을 선정하기에 어려움이 있어 피크기간에

대한 풍력 설비이용률을 이용한 방법으로 유효용량을 선정하고자 한다. 또한 제주지역은 부하의 수요 및 바람의 세기가 계절에 따라 다르게 나타나기 때문에 이를 반영하여 계절별로 유효용량을 선정한다.[6]

2011년까지 제주계통에 풍력설비가 102MW까지 증설 허가되어 진 상황에서 풍력발전량의 변화에 따라 계통이 불안정 할 수 있기 때문에 PSS/E 소프트웨어를 이용하여 풍력발전시스템의 포함된 2011년 제주 전력계통을 구성하였다.[10] 최저, 최대 전력수요가 나타나는 여름철, 풍력발전량이 최대가 되는 겨울철 그리고 응답이 빠른 HVDC 연계선 없이 제주계통 내의 일반 발전기가 풍력설비용량을 담당 할 수 있는지를 알아보기 위하여 HVDC 연계선 정지기간을 중심으로 조건을 만들었다. 위 조건의 최대, 최저 부하기간동안 대규모 풍력발전단지 동시 탈락 사고, HVDC 2회선 탈락 사고 그리고 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고에 대하여 과도안정도 시뮬레이션을 모의 수행하였다. 위의 상정사고에 대하여 계통의 주파수와 전압에 어떠한 영향을 미치는지 과도안정도를 해석하여 풍력발전설비의 증가에 따른 제주계통의 안정적인 운영방안에 대하여 고려해 보았다.

## II. 풍력발전시스템 분석

### 1. 풍력 시장 현황

전 세계적으로 풍력발전기의 보급이 확산되고 있다. 2006년 말까지 전 세계 주요국의 풍력발전기 보급량은 74,000MW에 달하며, 현재 증가폭이 더욱 커지고 있다. 해외 풍력 시장의 대표국은 독일, 스페인, 미국, 인도 덴마크 등이고 후발국으로 러시아, 남아공, 브라질, 멕시코 등이 시장 진입을 앞두고 있다.[1]

#### 1) 국내 풍력 시장

정부는 2008년 8월 국가에너지기본계획에서 녹색성장을 기초로 하여 2030년의 전체 에너지원에서 신재생에너지가 차지하는 비중을 11% 목표로 국내 수요를 창출하고, 기술개발을 지원해 성장 동력으로 삼으려는 의지를 보이고 있다. 풍력 에너지도 이에 속해 지속적인 환경과 에너지 측면에서 높은 성장을 보이리라 예측된다.

2008년 기준으로 국내 풍력발전 누적규모는 194MW이며, 풍력에 의한 전기생산량은 399GWh로 나타나고 있다. 이는 전체 전력수요량의 0.1%에 해당하는 수준으로 미미하지만 정부는 향후 2012년까지 풍력발전 규모를 2,250MW로 확대시키는 목표를 가지고 있기 때문에 국내 풍력발전 시장은 본격적으로 확대될 가능성이 있다.

2012년 2,250MW 규모를 달성하려면 연간 약 500MW의 추가 증설이 필요한 것으로 보이며, 따라서 30개 단지는 2012년 이내에 모두 완공될 것으로 전망되며, 이외에도 추가적인 발전 단지가 조성될 것으로 보인다. 주요 풍력발전단지는 강원도와 동해, 제주도를 중심으로 개발 되고 있으며, 수도권 및 서해안으로는 난지도와 새만금지대가 있다. 해상풍력은 2020년까지 2GW를 목표로, 2015년 해상 풍력 30MW 단지조성을 계획하고 있다.

이러한 단지조성에는 국내 업체가 주도할 것으로 보여, 국내 풍력발전 업체들의 매출 증가가 예상된다. 하지만 연간 500MW 규모는 세계 시장에 비한다면 그 규모가 매우 작기 때문에 국내의 주요 업체들은 내수 보다는 수출 중심의 전략이 중요할 것으로 지적되고 있다. 이에 따라 풍력발전 설비 시장 역시 2005년 140억 달러에서 2006년 230억 달러로 64.3%나 성장했고, 2010년까지 390억 달러 수준으로 커질 것으로 전망하고 있다.

## 2) 해외 풍력 시장

### (1) 독일

독일은 세계에서 가장 많은 풍력발전기를 보유하고 있는 국가이다. 1974년도부터 1988년도까지 풍력발전시스템의 연구개발에 3억 DM을 투자하고, 대규모의 보급계획을 추진하였다.

1991년 독일은 신·재생에너지를 지원하는 정책으로 '전력공급법'을 제정한 이후 독일의 풍력발전기는 높이가 100~160M, 날개길이가 40~50M로 발전량 2.0~2.5MW를 낼 수 있는 기술을 가지고 있다.

2000년 말 기준으로 약 9,000기의 풍력발전은 독일 전체 전력공급량의 2.5%의 비중을 차지하고 있었으며 2005년 이후 약 18,000기로 2배 이상 증가하여 전체 전력공급량의 4.3%를 차지하고 있다. 또한 2010년까지 2,000MW~3,000MW의 해상 풍력발전시설이 들어설 예정이고, 앞으로 시장이 확대되면 25년 이내에 25,000MW의 발전시설을 갖춘 해상 풍력단지를 개발할 계획을 가지고 있다.

### (2) 스페인

스페인도 독일 다음으로 전 세계의 풍력발전의 20%를 차지하는 풍력 선진국이다. 이러한 발전은 스페인의 지리적인 특성으로 인한 풍부한 바람과 이를 발전시키기 위한 적극적인 지원으로 이루어진 것이다. 2007년까지 스페인에 설치된 풍력발전기 총 용량은 11,615MW로 2006년에 1,587MW가 새로 설치되었으며, 이는 2005년에 비해 15.8% 증가된 것이다. 매년 지속적인 풍력발전설비의 증가가 이루어지고 있으며, 이러한 증가를 바탕으로 스페인은 2010년에 대체에너지를 이용해 전체 에너지 소비량의 30%를 담당하는 목표를 세웠으며, 이 중 15%

(2.1GW)는 풍력발전기로 충당하겠다고 발표했다.

스페인의 에너지 산업은 환경과 밀접한 관련이 있어 대체에너지 이용에 적극적이다. 최근에는 풍력발전이 물을 이용해 수소를 발생시키는 연구가 진행 중인데 이 연구에 180,000유로가 책정되었으며, 이 연구를 통해 수소버스 공영화를 Albacete와 Hiqueruela지역에 계획하고 있다.

스페인 은 2015년까지 풍력발전량을 독립발전 운용지역에서는 약 37,000MW, 국가 전체적으로는 약 20,000MW를 목표로 세웠다.

### (3) 덴마크

덴마크는 바람이 많은 지리적 여건으로 인해 풍력발전시스템이 일찍부터 도입되었다. 특히, 해상의 풍력이 풍부해 1981년부터 해상 풍력발전이 도입되었다.

2006년에 덴마크 풍력발전은 3,137MW이며 이는 덴마크 전체 전력 수요 중 17%를 차지하고 있다. 2006년 이래로 환경 친화적 에너지 관련 연구 예산이 1억 800만DKK로 증가하였고, 그 이후에도 꾸준히 연구에 많은 예산을 투자하고 있다.

해상 풍력발전의 도입으로 덴마크는 전력공급체계의 전환점을 마련하게 되었고 덴마크 정부는 2025년까지 풍력발전 비중을 15%에서 30%까지 끌어 올릴 계획이며 2030년까지 이산화탄소 방출량의 50%를 저감한다는 목표로 4,000MW 이상의 해상 풍력단지를 건설할 예정이다.

### (4) 미국

과거 미국의 경우 풍력발전 보급량이 미비했으나 풍력발전의 중요성을 최근에 인식하여 정부의 에너지 정책에 힘입어 큰 시장으로 떠오르고 있다. 지난 25년 동안의 소형, 중형, 대형 풍력발전 기술은 대체에너지 분야의 DOE를 통해 발전을 거듭하고 있고, 이 풍력발전 혁신 프로그램을 통해 세계적으로 인정받는 풍력발전 토대 및 기술을 갖추게 되었고, 국가적 에너지 계획에 상당한 기여를 할 수 있게 되었다.

1970~1980년대에는 PURPA가 재정되면서 공공발전회사들의 민간 풍력 개발자들과 장기구매계약을 맺도록 규정하였다. 기업에 대한 에너지세 공지혜택 소멸

로 신규 풍력발전사업이 활성화되지 못하였다. 1992년도에 연방정부에 의한 생산 세액 공제, 고속감가상각을 적용, RPS 규정, 자발적 녹색전력 구매제도 등의 영향으로 풍력보급을 촉진시켰다. 이 당시에는 100MW 이상의 발전량을 보이는 주가 4개주에 불과하였다. 2000년대에 들어 정부보조에 힘입어 260만 가구에 공급할 수 있는 11,600MW 이상의 풍력발전기가 설치되었으며 100MW 이상의 발전량을 보이는 주가 19개주로 증가하였다.

#### (5) 아시아 국가

인도의 풍력발전량은 독일과 스페인, 미국에 이은 세계 4위이며 2003년부터 2004년까지 풍력발전 용량은 35% 이상 증가하였다. 2006년에는 6,053MW의 발전 용량을 보였으며 이는 2005년에 비해 47%나 증가한 수치이다.

일본의 풍력발전 설비용량은 2006년 말 1,358기에서 총 1,574MW로 세계 8위를 차지하고 있으며, 2010년까지 총 3,000MW의 풍력발전설비를 건설할 계획이다.

중국의 풍력발전은 2006년 2,588MW이며 세계 6위이다. 2006년 말에 설치한 풍력설비 1,334MW는 중국을 세계 5위 풍력발전설비 국가로 끌어 올렸다.

## 2. 제주지역 풍력발전시스템 출력 특성 분석

현재 정부의 녹색성장 정책에 맞추어 제주지역에도 신·재생에너지의 설비가 증가하고 있다. 제주지역에서의 총 발전설비 용량은 HVDC(High Voltage Direct Current) 연계선을 포함하여 약 780MW이며, 여기서 신·재생에너지가 총 48,293kW이며 이 중 45,995kW가 풍력발전이 차지하고 있다. 제주지역의 전력수요는 평균적으로 420MW이며 여기서 신·재생에너지 비율은 약 1.1%정도로 매우 적은 비중을 차지하고 있다. 하지만 앞으로 풍력발전기가 증가됨에 따라 대체에너지원의 차지하는 비중이 크게 될 것이다. 이러한 신·재생에너지가 증가하게 되면 이에 따라서 계통에 영향을 미치게 되며, 특히 풍력발전의 경우 발전량의 변화가 불규칙하기 때문에 풍력발전시스템 분석이 매우 중요한 부분을 차지한다.

1) 풍력설비 현황

현재 제주도에서 운영 중인 풍력발전설비 현황은 제주도청에서 건설한 행원풍력단지(9,795kW, Vestas군 600kW, 660kW, 750kW 등 총 15기), 신창풍력단지(1,700kW, Vestas V52 850kW 2기), 남부발전에서 건설한 한경풍력단지 1단계(6,000kW, NM72 1,500kW 3기), 한경풍력단지 2단계(15,000kW, Vestas V90 3,000kW 5기), 올해 3월에 새롭게 건설된 성산풍력단지 1단계(12,000kW, Vestas V80 2,000kW 6기), 그리고 한국에너지기술연구원에서 건설한 월정풍력단지(1,500kW, 한진중공업 HJWT1500 1기) 총 45,995kW가 운영되고 있다. 또한, 제주도가 풍력발전의 최적지로 알려지면서 제주도에 허가신청이 급증하여 현재 성산풍력단지 2단계(8,000kW), 삼달풍력단지(33,000kW), 가시리풍력단지(15,000kW), 신창풍력단지 2단계(1,500kW), 김녕풍력단지(1,500kW), 그리고 제주해상풍력단지(30,000kW)까지 90,000kW가 허가된 상태이다. 그리고 난산풍력단지(10,500kW)가 법정 소송 중에 있지만 추가될 경우 앞으로 145,495kW까지 풍력발전설비가 증가될 것이다.

표 1 제주지역 풍력발전단지 현황 및 허가 현황

[단위 : kW]

구분	사업자명	발전소명	설비용량	준공일
운 전 중	제주도청	행원풍력	9,795	'03.04
	남부발전	한경풍력1	6,000	'04.04
	제주도청	신창풍력(1)	1,700	'06.02
	한국에너지	월정풍력	1,500	'06.07
	남부발전	한경풍력2	15,000	'07.10
	남부발전	성산풍력(1)	12,000	'09.03
	소계	6	45,995	-
건 설 및 허 가 중	남부발전	성산풍력(2)	8,000	'09.06
	한신에너지	삼달풍력	33,000	'09.08
	제주도청	가시리풍력	15,000	'10.02
		신창풍력(2)	1,500	'10.02
		김녕풍력	1,500	'10.02
	(주)NCE	제주해상풍력	30,000	'12.06
	유니슨	난산풍력	10,500	법정소송중
	소계	7	99,500	-
합 계	9	145,495		

## 2) 풍력발전 평활 효과 분석

풍력발전의 가장 큰 이슈는 바람의 영향이다. 바람은 자연적인 현상으로 직접 제어를 할 수 없는 것이며, 제어가 불가능한 바람의 변화가 풍력발전에 있어서 가장 핵심적인 부분이 되기 때문이다. 이러한 변화가 전체 계통에 영향을 미치게 될 것이고 이를 해결하기 위한 방법의 하나가 풍력발전단지를 여러 지역으로 분산 시키는 것이다. 이렇게 풍력발전단지를 여러 지역으로 분산시키는 것을 평활 효과라 한다. 특정 지역의 풍력발전 출력과 다른 지역의 출력의 변화를 비교하였을 경우 한 쪽의 풍력발전기가 크게 변하여도 다른 지역의 출력은 변화가 없이 일정한 출력을 내주어 모든 지역의 합한 출력량이 크게 변하지 않도록 하는 것을 말한다. 풍력발전 출력 변동률과 출력 패턴을 분석하여 제주지역에서의 풍력발전시스템을 분산시켰을 경우의 평활 효과를 검토하고자 한다.

출력 변동률이란 현재 풍력발전 출력과 일정시간 전의 풍력발전 출력의 차이에 대한 정격설비용량의 비이다. 그림 1은 덴마크 서부지역에서의 풍력발전시스템의 출력 변동률 누적도수분포도이며, 한 지역의 풍력단지와 전체지역의 풍력단지의 출력 변동률을 비교한 것이다. 한 지역의 경우에는 1시간동안 변화폭이  $\pm 100\%$ 까지 나타나고 있지만 전체지역의 경우에는 78%가  $\pm 3\%$ 이내로 변하고 있다. 한정된 한 지역에서의 변화폭은 매우 크지만 전체지역에서의 변화폭은 줄어들기 때문에 이러한 경우 풍력발전의 평활 효과가 좋게 나타나고 있음을 나타낸다.[7]

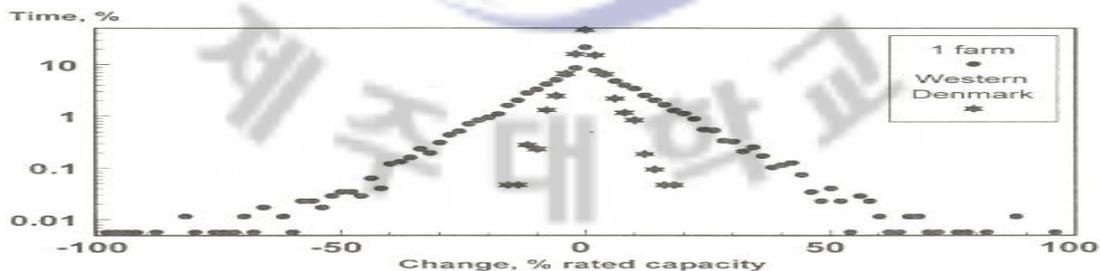


그림 1 덴마크 서부지역에서의 풍력발전시스템의 출력 변동률 누적도수분포도

다음의 그림 2는 영국과 웨일즈에서 한 지역 풍력단지 1,000MW일 때와 여러 지역에 분포되어진 풍력단지 1000MW의 출력에 대하여 24시간 동안 시뮬레이션

을 한 결과이다. 한 지역으로 한정된 풍력단지인 경우는 출력이 좋지만 출력 패턴이 급격하게 변하기 때문에 전력계통에 영향을 미칠 수도 있다. 반면에 다수의 지역으로 분산되어있을 경우 출력 패턴이 일정하게 나타나고 있으며, 계통에 안정된 전력공급을 할 수 있다.[7]

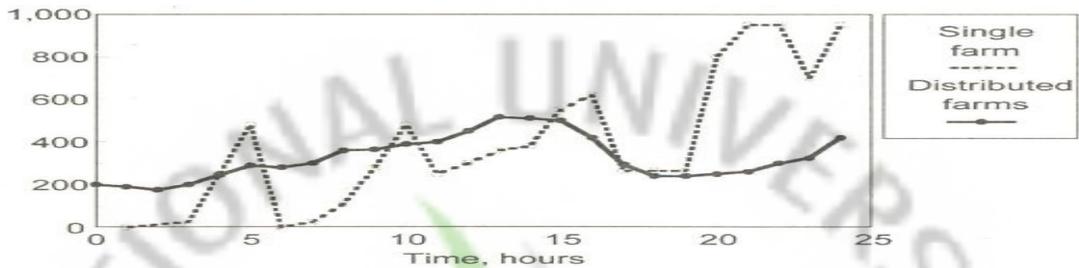


그림 2 영국과 웨일즈지역의 1,000MW 풍력단지 출력 시뮬레이션

(1) 풍력발전 출력 변동률 분석

제주지역의 풍력발전기는 한경, 행원 그리고 성산지역에 집중되어 있다. 세지역의 대표로 용량이 큰 한경풍력단지 1,2단계, 행원풍력단지, 그리고 성산풍력 1 단계에 대하여 출력 변동률과 출력 패턴을 분석하였다. 2009년 4월 성산풍력단지가 들어선 이후부터 2009년 7월까지의 1시간 단위 데이터를 가지고 분석하였다. 그림 3은 제주지역 풍력단지의 출력 변동률 누적도수분포도이다. 각 지역의 출력 변동률이 전체지역의 출력 변동률보다 변화폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 표 2에서  $\pm 5\%$ 이내의 경우가 성산은 59%, 한경은 76%, 행원은 81% 그리고 전체일 때 77%로 나타났다.

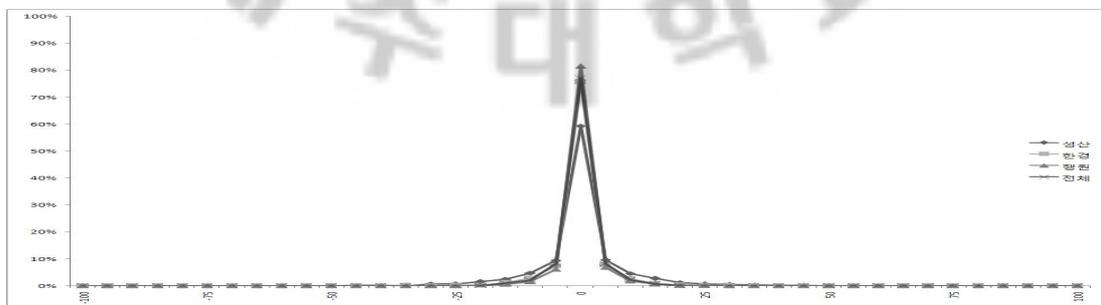


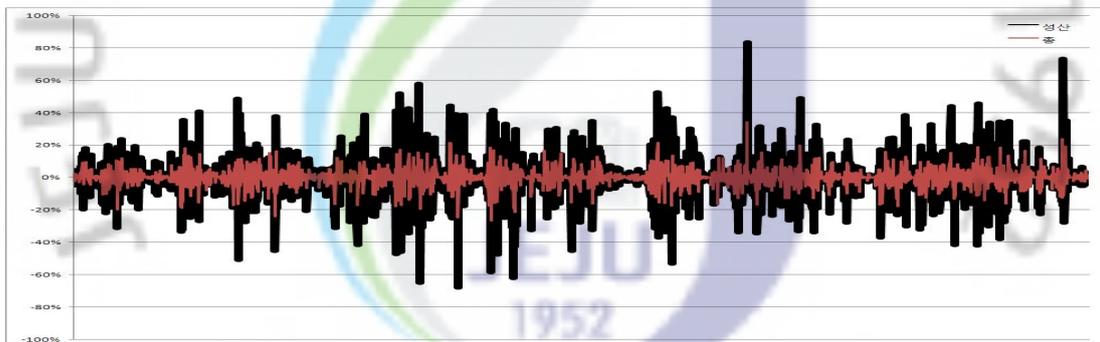
그림 3 제주지역 풍력단지별 출력 변동률 누적도수분포도

표 2 제주지역 풍력단지별 출력 변동률 누적도수분포빈도수

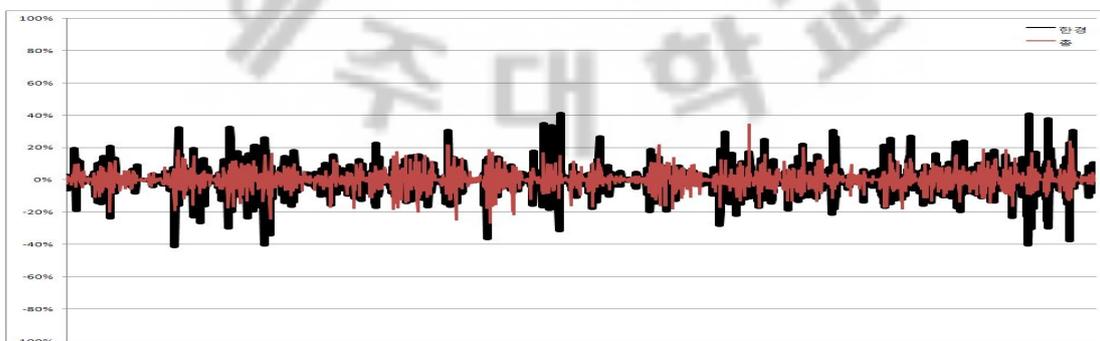
[단위 : %]

%	성산	한경	행원	전체	%	성산	한경	행원	전체
-50	0	0	0	0	5	10	8	7	8
-45	0	0	0	0	10	5	3	2	2
-40	0	0	0	0	15	3	1	1	1
-35	0	0	0	0	20	1	0	0	0
-30	1	0	0	0	25	1	0	0	0
-25	1	0	0	0	30	1	0	0	0
-20	2	0	0	0	35	0	0	0	0
-15	2	1	1	1	40	0	0	0	0
-10	5	3	2	2	45	0	0	0	0
-5	9	7	6	8	50	0	0	0	0
0	59	76	81	77					

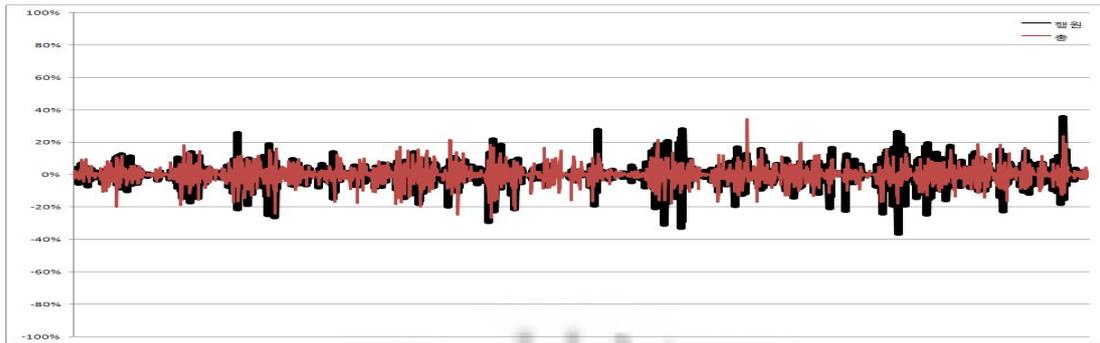
그림 4는 한 지역 풍력단지와 전체 풍력단지 출력 변동률을 비교한 것이다. 한 지역 풍력단지의 출력 변동률보다 전체 풍력단지의 출력 변동률이 더 변화가 적은 것을 알 수 있다.



(a) 성산풍력단지와 전체 풍력단지



(b) 한경풍력단지와 전체 풍력단지



(c) 행원풍력단지과 전체 풍력단지

그림 4 한 지역 풍력단지와 전체 풍력단지 출력 변동률 비교

풍력발전의 출력 변동률을 분석한 결과 한 지역의 경우보다 전체의 경우가 변화 폭이 줄어들고 있다. 따라서 출력 변동률에 의한 평활 효과가 좋다고 할 수 있다.

그리고 풍력발전 출력 변동률에서 계통을 해석하는데 있어서 다른 중요한 부분은 최대 출력 변동률을 분석하는 것이다. 최대 출력 변동률에 의해서 풍력발전 설비의 운전예비력 혹은 운전한계용량을 선정하는데 영향을 미치게 된다. 운전예비력은 보통의 경우 전력수요량의 10%를 선정하는데 풍력과 같은 신·재생에너지원이 계통에 추가되었을 경우 그 값은 다른 방법으로 선정하게 된다.

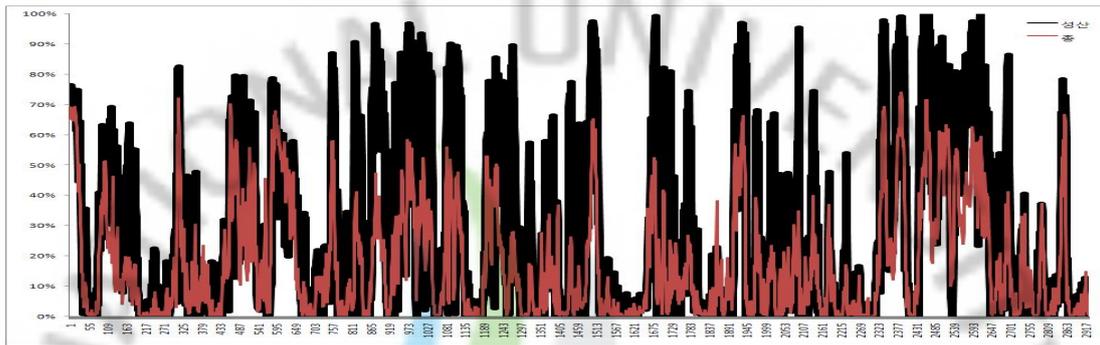
표 3에서 보면 최대 출력 변동률은 6월 20일 21시에 발생한 전체 발전량의 34%, 14,600kW로 나타났다. 이에 따라 계통의 운전예비력을 선정하는데 있어서 15,000kW의 풍력출력 변동률을 확보하여야 안정된 계통운영을 할 수 있을 것이다.

표 3 전체 풍력발전단지 최대 출력 변동률 [단위 : %]

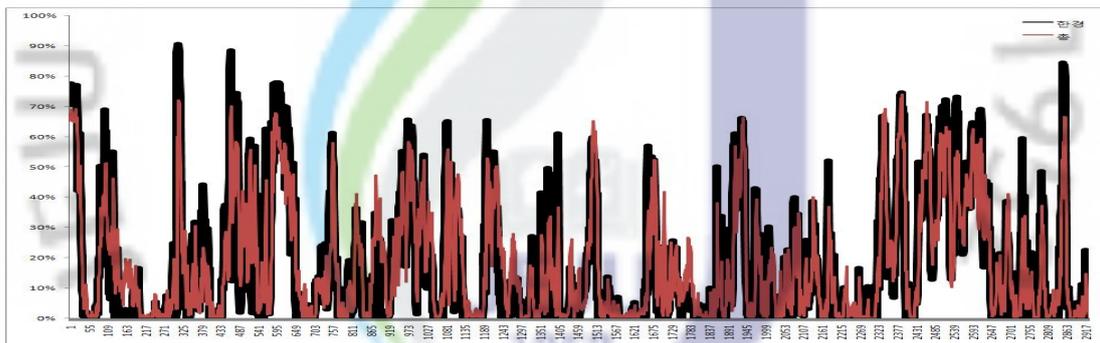
발생 시각	출력 변동률	발생 시각	출력 변동률
2009-06-20 21시	34	2009-05-21 03시	-27
2009-07-28 20시	24	2009-05-17 03시	-25
2009-05-16 04시	22	2009-04-25 03시	-24
2009-06-10 03시	21	2009-05-23 23시	-22
2009-05-16 05시	21	2009-04-06 03시	-20
2009-06-27 07시	20	2009-05-12 14시	-20

(2) 풍력발전 출력 패턴 분석

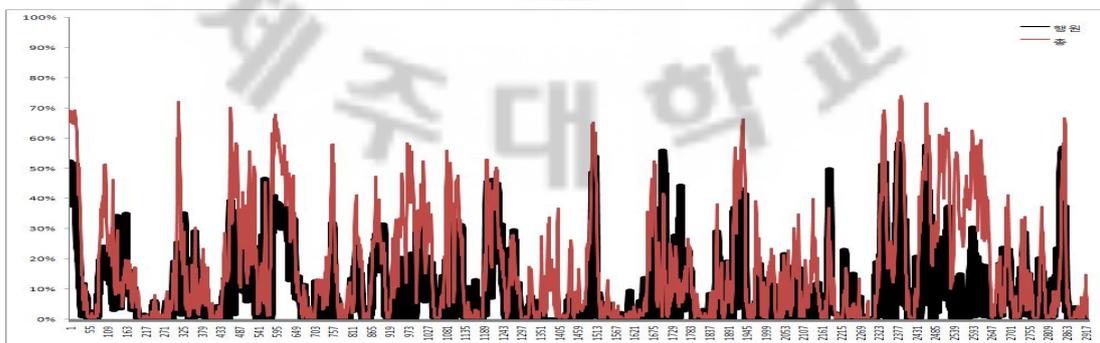
그림 5는 2009년 4월~7월까지 한 지역 풍력단지과 전체 풍력단지의 출력 패턴을 비교한 것이고, 그림 6은 각각의 풍력단지 출력 패턴을 비교한 것이다. 모두 출력 패턴이 유사하게 나타나고 있지만, 전체의 경우가 출력 변화폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.



(a) 성산풍력단지와 전체 풍력단지

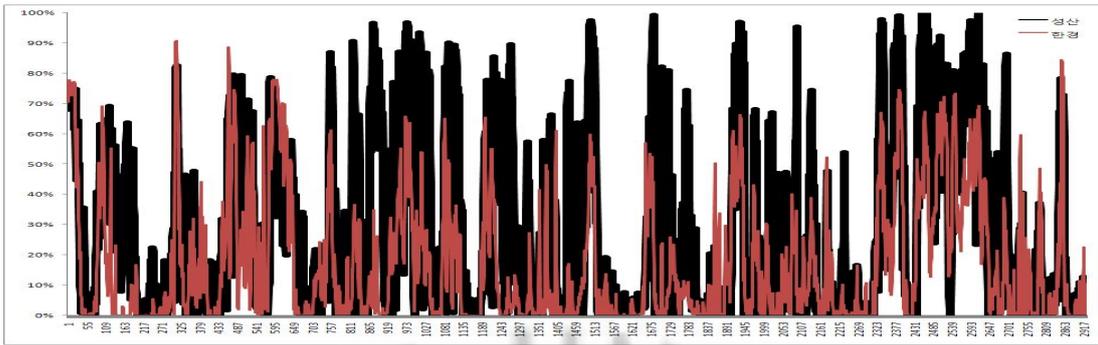


(b) 한경풍력단지와 전체 풍력단지

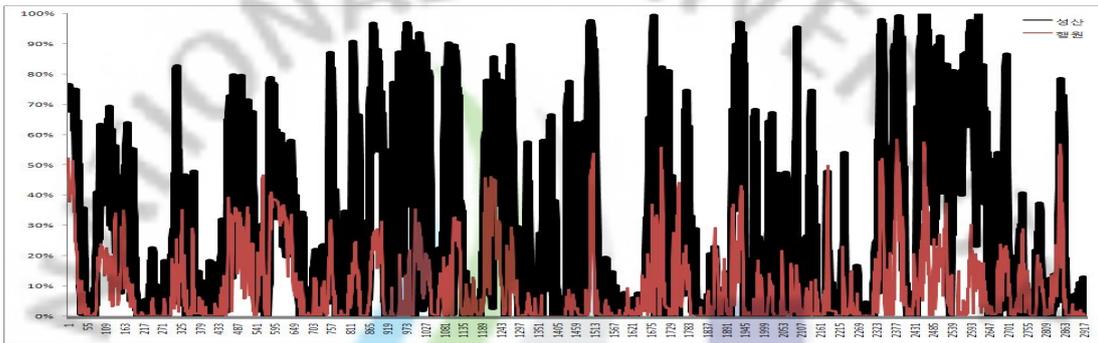


(c) 행원풍력단지와 전체 풍력단지

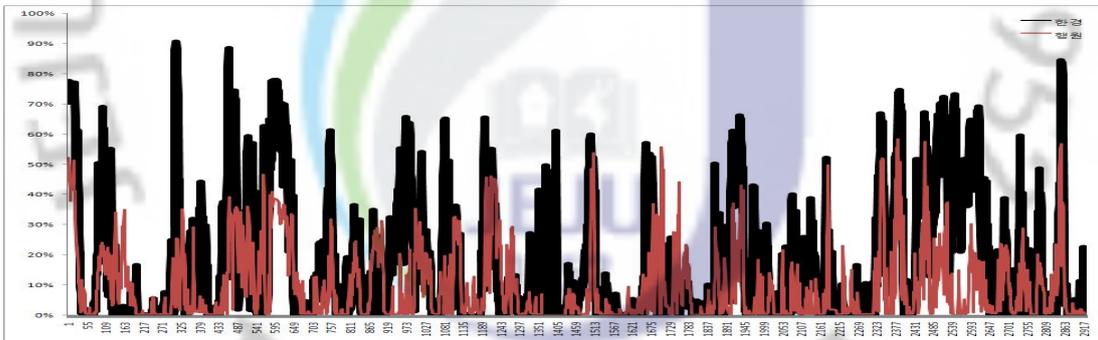
그림 5 한 지역 풍력단지와 전체 풍력단지의 출력 패턴 비교



(a) 성산풍력단지과 행원풍력단지



(b) 성산풍력단지과 행원풍력단지



(c) 한경풍력단지과 행원풍력단지

그림 6 각각의 풍력단지 출력 패턴 비교

풍력발전의 출력 패턴을 분석한 결과 한 지역의 경우보다 전체의 경우가 출력 변동률에서와 같이 변화폭이 줄어들고 있지만, 모두 비슷한 출력 패턴을 보이고 있기 때문에 평활 효과가 미미하다고 할 수 있다. 이는 현재 제주도는 지역 특성상 매우 좁은 지역에 해당하며 동쪽과 서쪽의 바람이 비슷하게 불기 때문이다.

### 3) 풍력발전 유효용량

해외 주요연구사례에서는 풍력발전기가 전력계통의 일반발전기의 전력생산량 중에서 대치 할 수 있는 발전량을 유효용량으로 보고 있다. 즉, 풍력발전량이 계통에 기여하는 정도를 알기 위하여 유효용량을 선정한다. 또한, 앞으로 풍력설비가 증설됨에 따라 전력수급에 있어서 안정적인가 경제적인가를 판별할 수 있다.

#### (1) 해외 풍력설비 유효용량

해외의 여러 지역의 대표적인 유효용량을 선정하는 방법으로는 최대부하시간 동안의 풍력발전기의 설비이용률과 계통의 기여도로써 유효용량을 선정하는 방법이 많이 사용되고 있다.

미국의 PJM(Pennsylvania-Jersey-Maryland) 인터커넥션에서 연구한 풍력에너지의 유효용량은 이 지역의 전력수요피크기간인 6월 1일에서 8월 31일에 걸친, 오후 3시부터 7시 사이의 풍력발전기의 설비이용률 변동추이를 바탕으로 하고 있다. 유효용량은 3년에 걸친 평균치로 산정되며, 가장 최근의 데이터가 가장 오랜 데이터를 교체하는 방식으로 진행된다. 풍력발전에 관한 데이터가 충분하지 않기 때문에 PJM 인터커넥션에서는 20%의 전력용량 신뢰도를 새로운 풍력 프로젝트에 적용하였고, 풍력설비 운영 실적이 1년 이상 실행되어질 경우 풍력발전설비의 유효용량으로 대체하였다.

그리고 북미 중부 전력 풀에서는 피크 대비 풍력자원의 활성화 타이밍을 기준으로 풍력발전의 월별 유효용량을 추정한다. 가능하다면 10년 이상의 풍력과 부하에 관한 데이터를 활용한다. 북미 중부 전력 풀에서는 매달 최대 수요시간을 포함한 연속적인 4시간 단위를 선택하여 유효용량을 산정한다. 한 달 30일 동안 피크시간을 포함한 4시간 단위의 풍력발전량 평균이 해당 월의 유효용량이 된다.

텍사스 주 전기신뢰성 협회에서는 풍력발전의 용량 기여도를 측정하기 위해 현재 가동 중인 풍력발전소를 분석하였다. 이 연구는 텍사스 주의 피크 시기인 7,8월 오후 4시부터 6시 사이의 풍력발전량을 토대로 하였다. 그 시기의 풍력설비의 평균발전량은 정격용량의 16.8% 수준이었다. 이때의 풍력설비의 평균발전량을 유효용량으로 선정하였다.

미 캘리포니아 ISO에서는 풍력발전의 유효용량을 측정하기 위하여 최근 3년간의 피크 기간의 풍력발전량을 토대로 하였다. 여기에서는 피크 부하기간인 5월부터 9월까지 12시부터 18시까지의 풍력발전량을 측정하여 전체 정격용량의 약 24%를 유효용량으로 선정하였다.[8]

영국의 옥스퍼드대학 연구보고서에 따르면 최대계통수요가 70GW이고 일반 발전기 설비용량이 81GW, 풍력발전 설비용량은 13GW를 보유하고 풍력발전량 점유율이 10%인 영국의 풍력설비 유효용량은 다음과 같이 선정하였다. 먼저 13GW의 풍력설비의 풍력발전량으로 설비이용률 35%를 적용한 5.3GW를 일반 발전기에 해당하는 에너지 생산용량으로 보고 여기에 풍력발전의 출력변동 특성을 반영하기 위하여 설비용량의 17%인 2.3GW를 유효용량으로 선정하였다. 또한 공급신뢰성을 확보하기 위하여 일반발전기의 운전예비력으로 풍력설비 용량의 5%인 0.7GW를 적용하였다.

## (2) 제주계통의 풍력설비 유효용량

해외 각국의 사례를 고려하여 제주지역 특성에 맞는 풍력설비 유효용량을 평가하였다. 제주지역의 경우 과거의 데이터가 충분하지 않고, 풍력설비의 용량이 해외의 용량에 비하여 매우 적기 때문에 ELCC의 방법으로 유효용량을 선정하기에 어려움이 있어 피크기간에 대한 풍력 설비이용률을 이용한 방법으로 유효용량을 선정하였다. 또한 제주지역은 부하의 수요 및 바람의 세기가 계절에 따라 다르게 나타나기 때문에 이를 반영하여 계절별로 유효용량을 선정한다. 피크기간을 이용하여 유효용량을 선정했을 경우 다음의 식으로 그 값을 구한다. 식 (1)에 옥스퍼드대학의 연구에서 발표한 풍력발전기 출력 변동에 대비한 운전예비력으로 5%를 반영하여서 제주계통의 실제 유효용량을 선정한다.

$$\text{풍력설비유효용량} = \frac{\text{최대부하기간의 풍력발전 평균발전량}}{\text{풍력발전기의 정격용량}} \times 100\% \quad (1)$$

겨울철에는 바람이 많아 풍력발전량이 증가하고 난방전력에 기인하여 전력수요도 증가함으로 풍력설비의 유효용량은 풍력설비의 평균전력량을 상회할 것이

고, 여름철에는 바람이 적은 날이 많아 풍력발전량은 감소하고 냉방전력으로 인한 수요가 증가함으로 풍력설비의 유효용량은 풍력설비의 평균전력량을 밑돌 가능성이 높다.

표 4와 그림 7에서와 같이 겨울철에는 19시~20시와 23시~24시, 여름철에는 20시~22시 그리고 봄과 가을에는 20시~22시에 가장 많은 전력수요가 발생했다. 그림 8은 계절별 풍력발전량을 시간별로 나타낸 것이며, 시간에 관계없이 일정하게 출력이 발생하고 있다.

표 4 2008~2009년 계절별 평균 전력수요량 및 풍력발전량 [단위 : MW]

	계통수요				풍력 발전량			
	겨울	봄	여름	가을	겨울	봄	여름	가을
12시	432.02	395.83	441.47	396.24	10.89	7.33	5.48	6.42
13시	419.92	386.65	438.03	389.33	11.03	7.51	5.56	6.35
14시	424.76	392.62	447.37	396.92	11.30	7.47	5.63	6.39
15시	423.59	391.92	448.20	397.60	11.42	7.44	5.64	6.06
16시	420.71	388.06	445.41	396.34	11.80	7.52	5.54	6.02
17시	424.50	386.10	443.34	397.73	11.73	7.52	5.46	5.92
18시	444.83	388.56	441.73	409.67	11.60	7.23	5.09	5.71
19시	<b>471.42</b>	400.18	437.92	<b>431.53</b>	<b>11.69</b>	6.79	4.82	<b>5.59</b>
20시	<b>471.98</b>	<b>430.60</b>	<b>452.73</b>	<b>439.04</b>	<b>11.52</b>	<b>6.88</b>	<b>4.60</b>	<b>5.77</b>
21시	462.86	<b>435.15</b>	<b>467.77</b>	<b>430.86</b>	11.23	<b>6.94</b>	<b>4.46</b>	<b>5.31</b>
22시	452.21	<b>427.32</b>	<b>452.50</b>	416.42	11.12	<b>7.17</b>	<b>4.82</b>	5.34
23시	460.09	426.19	429.96	403.53	11.12	7.15	5.04	5.31
24시	<b>475.76</b>	424.32	409.23	396.21	<b>11.27</b>	7.14	5.46	5.50

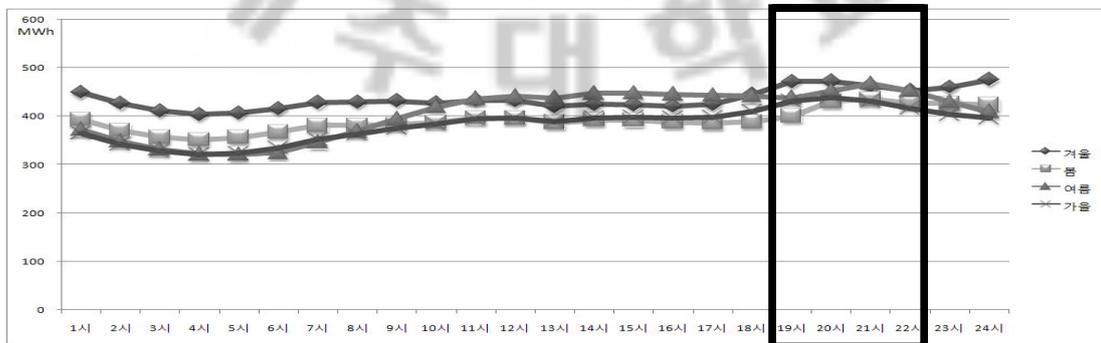


그림 7 제주계통 계절별 평균 전력수요량

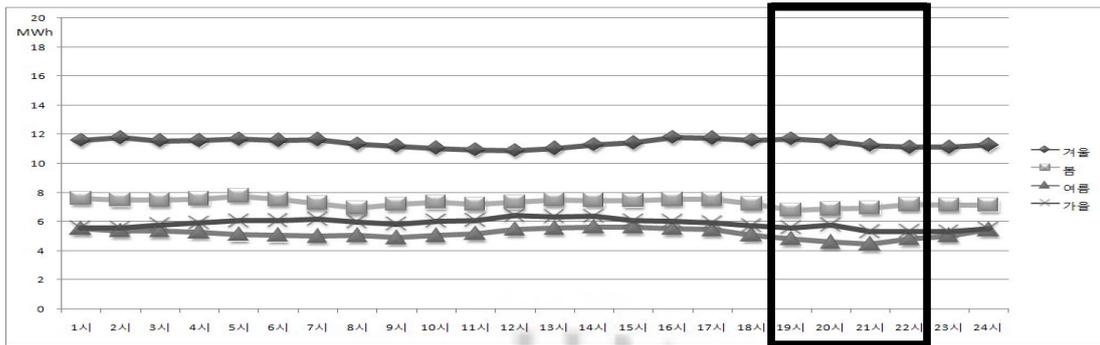


그림 8 제주계통 계절별 풍력발전량

그림 9에서 나타나듯이 최대 전력수요가 나타나는 시점의 풍력설비이용률이 겨울철에는 33%, 봄에는 12%, 여름에는 10%, 가을에는 14%이며 여기에 운전예비력으로 풍력설비 정격용량의 5%를 감하여 표 5와 같이 제주지역의 풍력설비 유효용량을 선정하였다.

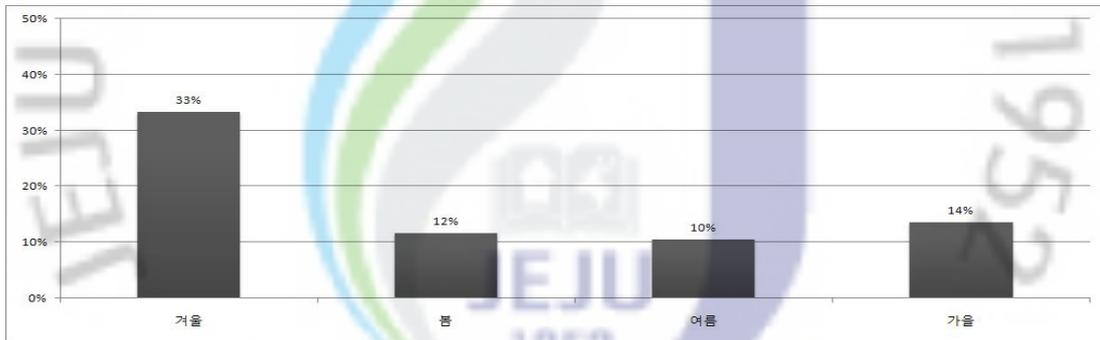


그림 9 제주계통 계절별 평균 설비이용률

표 5 제주 풍력발전시스템의 계절별 유효용량

겨울		봄		여름		가을	
MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
8.3	27	2.1	7	1.5	5	2.7	9

### Ⅲ. 제주 전력계통 해석

#### 1. 해석모델

제주계통에 해석을 위하여 PSS/E 프로그램을 사용하였다. 계통모델은 전력거래소에서 제공한 파일을 참고하고 PSS/E 31.1 버전에서 제공된 풍력발전기 모델을 추가시켜 시뮬레이션을 하였으며, 2011년 제주계통을 기준으로 선정하였다.

과도안정도 해석을 위하여 제주계통의 2011년 부하를 배분하고 UFR 부하차단 설정을 하였으며, 현재 운영 중인 HVDC 연계선과 발전기의 우선순위를 정하였다.

##### 1) 부하배분 및 UFR 부하차단 설정

부하배분은 제4차 전력수급기본계획상의 부하배분 증가율을 가지고 표 6과 같이 선정하였다.

표 6 2011년 제주지역 부하배분

[단위 : MW]

겨울		봄		여름		가을	
최저	최대	최저	최대	최저	최대	최저	최대
401	585	357	526	330	656	337	526

어떠한 사고에 의하여 주파수가 떨어질 경우 부하를 차단하여 주파수를 유지하기 위하여 제주계통에서는 표 7과 같이 부하를 차단한다. 총 6단계로 나누며 차단되는 부하는 평소 소요가 적은 곳부터 차단하기 시작한다. 1단계는 59.2Hz에서 동작하며 6단계는 57.6Hz에서 동작한다. 6단계가 동작할 경우에는 제주도 전역에 전력공급의 사실상 중단된다.

표 7 제주계통의 UFR 단계별 차단 부하

단계별	차단부하량	변전소명
1 단계 (59.2Hz)	10 개 D/L, 10.5% (누계: 10개D/L, 10.5%)	한림S/S, 안덕S/S 산지S/S, 성산S/S 신제주S/S
2 단계 (59.0Hz)	10 개 D/L, 10.5% (누계: 20개D/L, 21.0%)	성산S/S, 한림C/C 동제주S/S, 안덕S/S 신제주S/S
3 단계 (58.6Hz)	9 개 D/L, 10.5% (누계: 29개D/L, 31.5%)	한라S/S, 성산S/S 산지S/S, 동제주S/S
4 단계 (58.4Hz)	9 개 D/L, 10.5% (누계: 38개D/L, 42.0%)	신서귀S/S, 한라S/S 동제주S/S
5 단계 (58.0Hz)	7 개 D/L, 7.5% (누계: 45개D/L, 49.5%)	한라S/S, 한림S/S 한림C/C, 신서귀S/S
6 단계 (57.6Hz)	6 개 D/L, 5.5% (누계: 51개D/L, 55.0%)	신서귀S/S, 산지S/S 신제주S/S

2) 발전기배분

일일 운영발전계획은 요구되는 전력수요를 충족하기 위하여 기저발전기를 중심으로 공급 우선순위에 의해서 결정된다. 2009년 6월 제주내연 #2 준공이후 2011년 12월까지의 제주지역 발전설비 변동내역이 없으며, SMP를 기준으로 하는 HVDC 연계선이 최우선으로 공급이 되며, 나머지 발전기들은 연료비와 효율에 따라 바뀔 수도 있으나 대체적으로 표 8과 같다.

표 8 제주지역 발전기 공급 우선순위

[단위 : MW]

구 분	공급능력	공급력 누 계	우선 순위	최대 배분량	발전량 누계	최소운전 부하
연계선(HVDC)	150	150	1	150	150	30
제주내연#1	40	190	2	38	188	28
제주내연#2	40	230	2	38	226	28
남제내연#1	20	250	3	18	244	7
남제내연#2	20	270	3	17	261	7
남제주기력#3	100	370	4	85	346	55
남제주기력#4	100	470	4	85	431	55
제주기력#2	79	549	5	75	506	45
제주기력#3	79	628	5	75	581	45
한림복합	105	733	6	90	671	41
발전량 합계	733	-	-	671	-	-

## 2. 2011년 제주계통 PSS/E 과도안정도 시뮬레이션 결과

2011년 제주계통을 해석하기 위하여 다음과 같은 조건으로 시뮬레이션을 시행하였다. 최대 부하가 나타나는 여름철과 풍력발전량이 최대가 되는 겨울철, 그리고 HVDC 연계선 정지기간을 중심으로 시나리오를 정하였으며 전력거래소의 2011년 발전운영계획을 참조하여 발전기를 배분시켰다. 그리고 풍력발전기는 모든 조건에서 100% 출력을 한다는 가정하였다.

모든 조건에서 다음과 같은 상정사고에 대하여 모의수행을 하였다.

- 정상상태 운전 중 1초 후, 모든 풍력단지 동시 탈락
- 정상상태 운전 중 1초 후, HVDC 연계선 2회선 동시 탈락(HVDC 연계선 정지기간 제외)
- 정상상태 운전 중 1초 후, 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락

2011년의 여름철의 수요는 표 6에서 최저 330MW, 최대 656MW이며, 이에 따

른 발전기 배분은 표 9, 표 10에 나타내었다. 수요의 변화가 심하기 때문에 기동하기 어려운 기력발전은 항상 운전하고, HVDC 연계선의 운전량을 조절하여 발전량을 수요에 맞게 조절하며, HVDC 연계선의 용량이 초과되기 전에 내연 발전기를 운전시켜 최대 부하에 맞추어 발전기를 운전할 수 있도록 하였다.

표 9 여름철 최저 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>330</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	30
제주내연#1	40	-
제주내연#2	40	-
남제내연#1	18	-
남제내연#2	17	-
남제주기력#3	100	55
남제주기력#4	100	55
제주기력#2	79	50
제주기력#3	79	50
한림복합	90	-
합 계	835	<b>342</b>

표 10 여름철 최대 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>656</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	150
제주내연#1	40	28
제주내연#2	40	28
남제내연#1	18	-
남제내연#2	17	-
남제주기력#3	100	80
남제주기력#4	100	80
제주기력#2	79	70
제주기력#3	79	70
한림복합	90	65
합 계	835	<b>673</b>

2011년의 겨울철의 수요는 표 6에서 최저 401MW, 최대 585MW이며, 이에 따른 발전기 배분은 표 11, 표 12에 나타내었다. 여름철과 마찬가지로 기동하기 어려운 기력발전은 항상 운전하고, HVDC의 운전량을 조절하여 발전량을 수요에 맞게 조절하였다.

표 11 겨울철 최저 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>401</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	75
제주내연#1	40	-
제주내연#2	40	-
남제내연#1	18	18
남제내연#2	17	18
남제주기력#3	100	55
남제주기력#4	100	55
제주기력#2	79	45
제주기력#3	79	45
한림복합	90	-
합 계	835	<b>413</b>

표 12 겨울철 최대 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>585</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	150
제주내연#1	40	-
제주내연#2	40	-
남제내연#1	18	18
남제내연#2	17	18
남제주기력#3	100	85
남제주기력#4	100	85
제주기력#2	79	70
제주기력#3	79	70
한림복합	90	-
합 계	835	<b>598</b>

HVDC 연계선 정지기간은 5월이며, 이 시기의 수요는 봄철의 수요와 비슷하기 때문에 표 6의 봄에 해당하는 최저 357MW, 최대 526MW로 정하였으며, 이에 따른 발전기 배분은 표 13, 표 14에 나타내었다. HVDC 연계선 정지기간에는 기력발전이 풍력발전량의 예비력을 위하여 항상 운전하고 기동이 빠른 한림복합을 부하 증가 시 가동시켜 수요에 맞게 조절한다.

표 13 HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

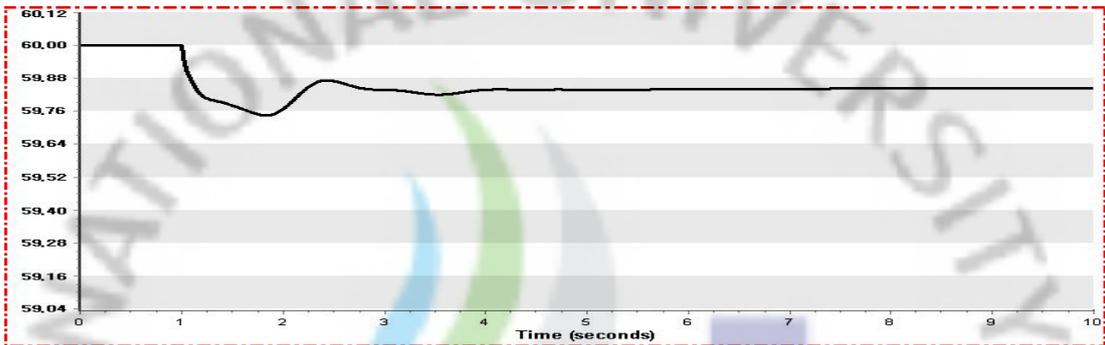
발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>357</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	-
제주내연#1	40	28
제주내연#2	40	28
남제내연#1	18	-
남제내연#2	17	-
남제주기력#3	100	55
남제주기력#4	100	55
제주기력#2	79	45
제주기력#3	79	45
한림복합	90	-
합 계	835	<b>368</b>

표 14 HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하의 발전기 배분 [단위 : MW]

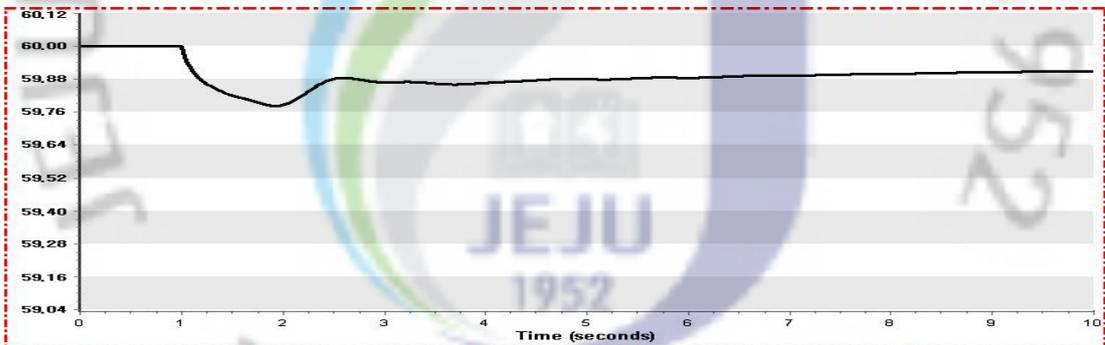
발전기	공급능력	발전량
계 통 수 요		<b>526</b>
풍력발전량	102	102
연계선#1	150	-
제주내연#1	40	28
제주내연#2	40	28
남제내연#1	18	-
남제내연#2	17	-
남제주기력#3	100	85
남제주기력#4	100	85
제주기력#2	79	70
제주기력#3	79	70
한림복합	90	65
합 계	835	<b>533</b>

1) 풍력발전단지 102MW 탈락 사고

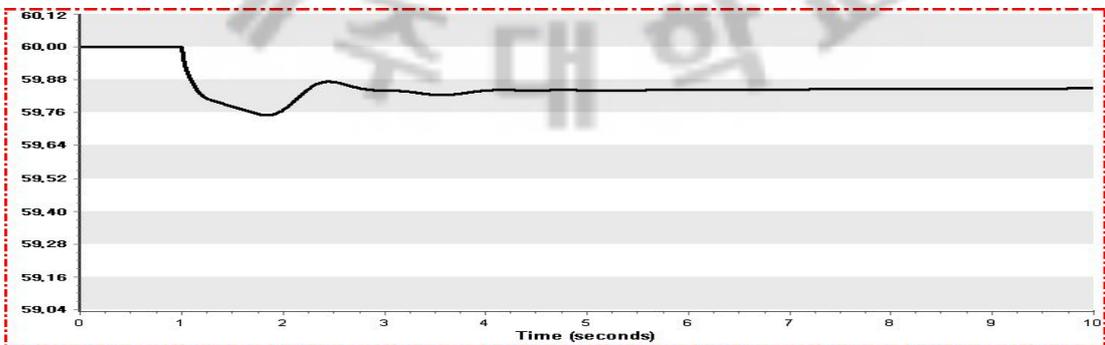
각각의 부하조건에서 풍력발전단지 102MW를 동시에 모두 탈락시켰다. 제주계통 주파수변동을 그림 10에 표시하였다. 풍력발전기의 탈락의 경우에는 HVDC 연계선이 운전 중에 있을 경우에는 주파수가 약 59.7Hz로 유지할 수 있었지만, HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하일 때에 주파수가 59.1Hz으로 낮아 졌으며 UFR 부하 차단 1단계가 동작하였다.



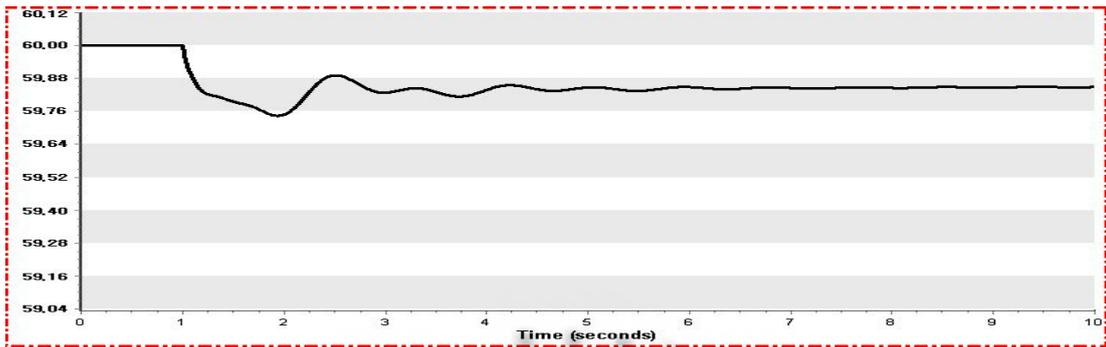
(a) 여름철 최저 부하



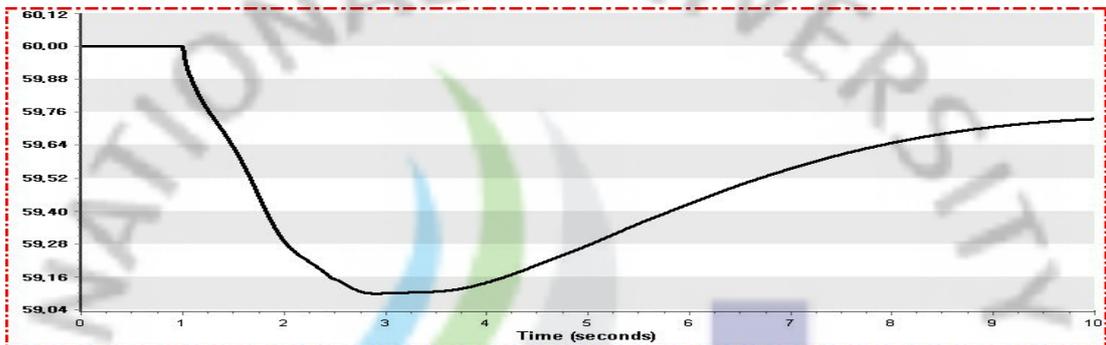
(b) 여름철 최대 부하



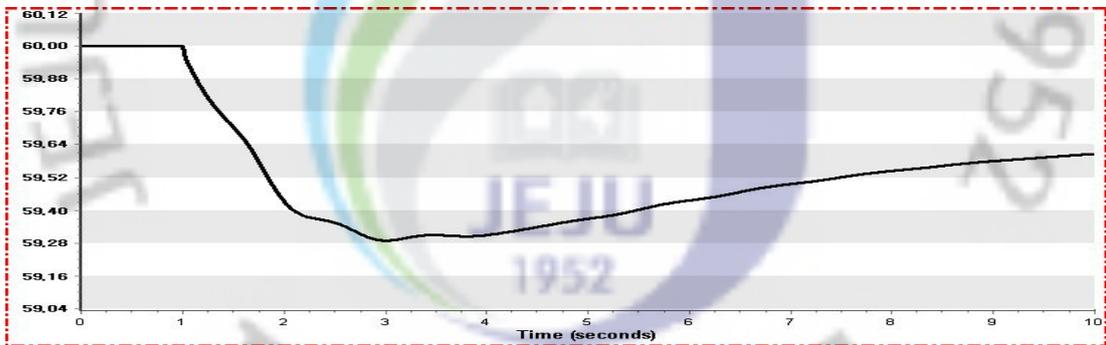
(c) 겨울철 최저 부하



(d) 겨울철 최대 부하



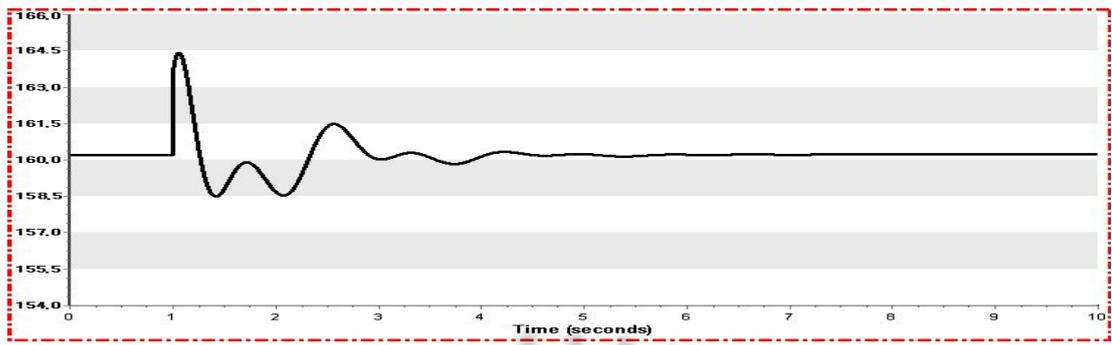
(e) HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하



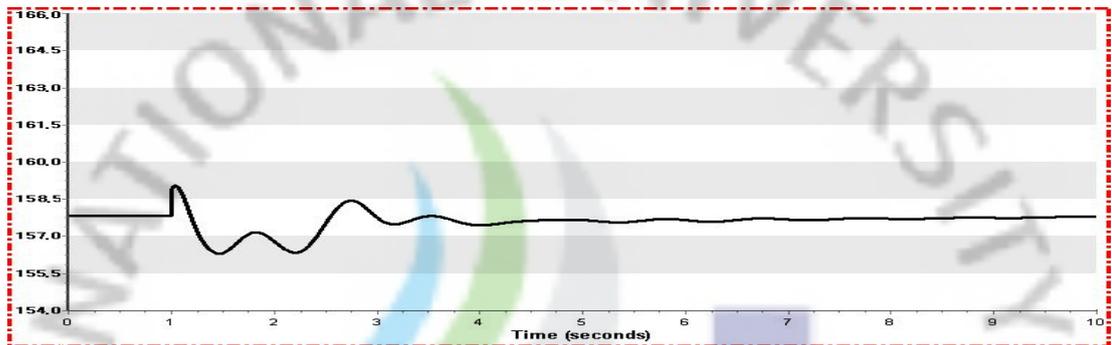
(e) HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하

그림 10 풍력발전단지 102MW 탈락 사고 시 계통 주파수

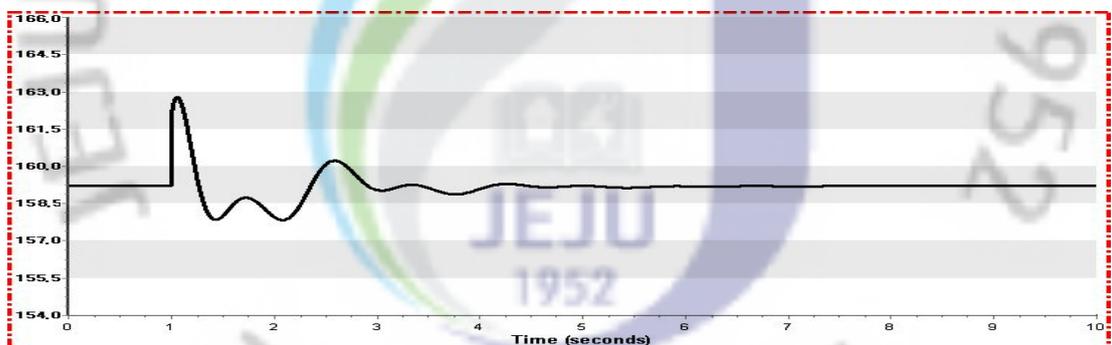
그림 11은 풍력발전기가 탈락했을 때의 154kV 모선전압이다. 부하가 적을 경우 부하가 많을 경우보다 전압 변화가 더 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 HVDC 정지기간 동안에는 전압이 상승한 후 시간이 지나도 원래 계통의 전압으로 복구가 되지 못하였다.



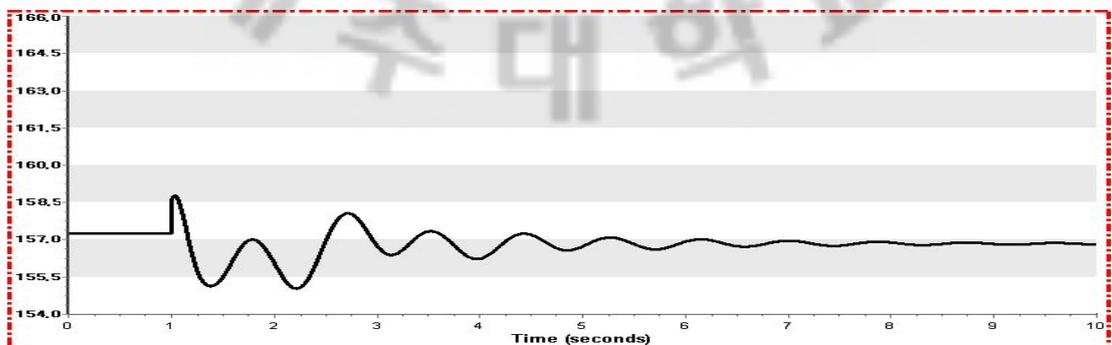
(a) 여름철 최저 부하



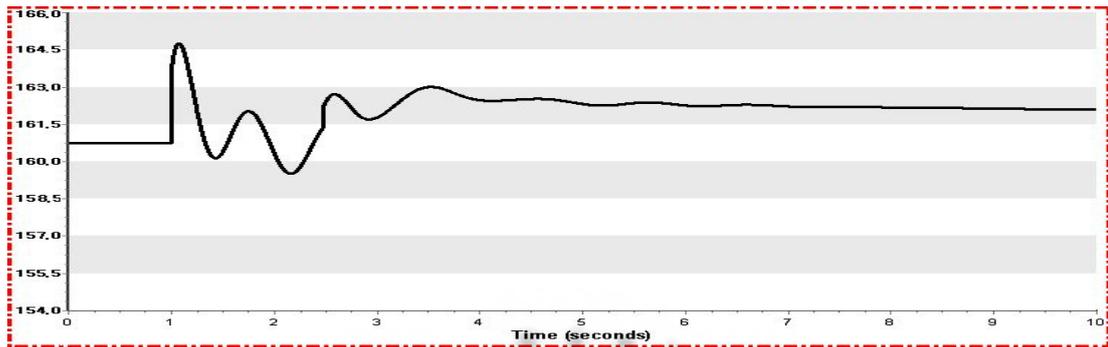
(b) 여름철 최대 부하



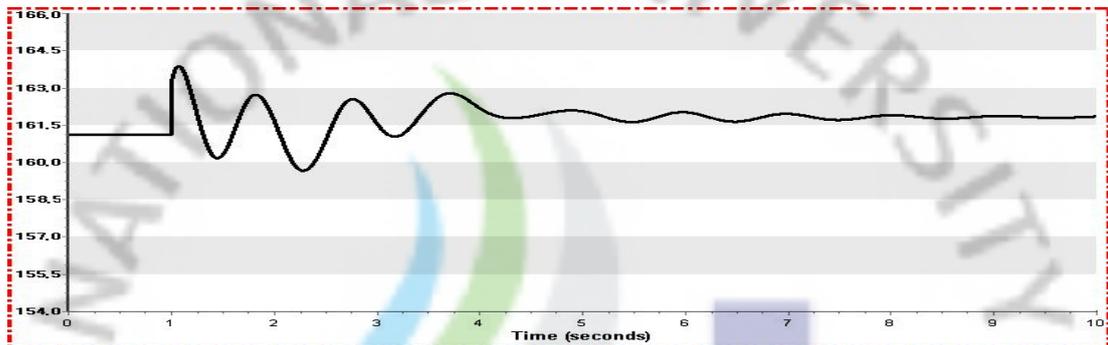
(c) 겨울철 최저 부하



(d) 겨울철 최대 부하



(e) HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하



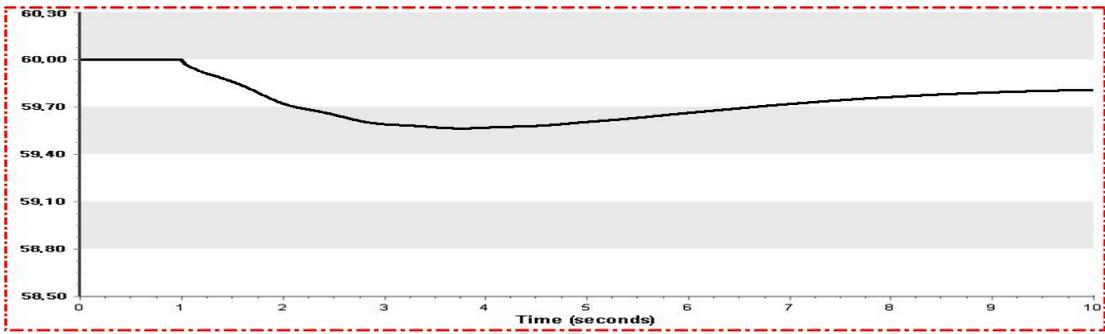
(f) HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하

그림 11 풍력발전단지 102MW 탈락 사고 시 154kV 모선전압

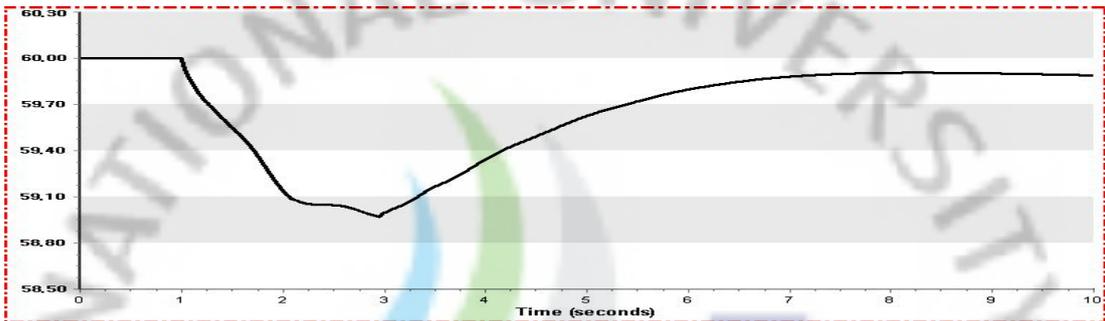
## 2) HVDC 연계선 2회선 탈락 사고

HVDC 연계선 정지기간을 제외한 각각의 부하조건에서 HVDC 연계선 2회선 탈락 사고를 내었다. 표 9~10처럼 계통 수요의 비율에 맞추어 HVDC 연계선의 출력량을 조절하였다.

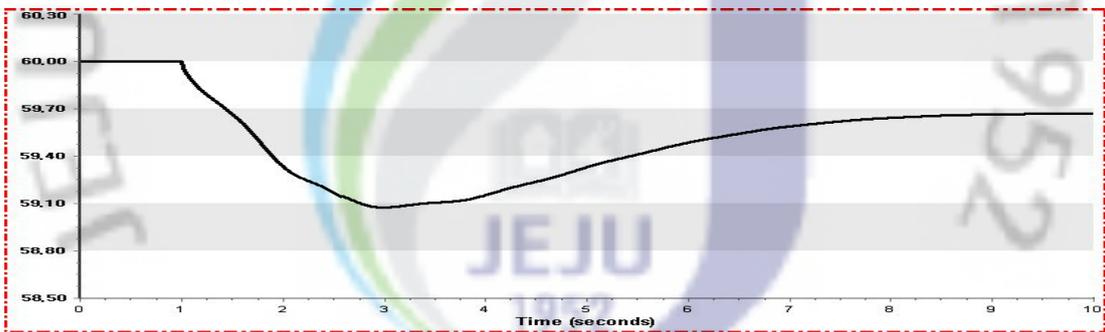
그림 12는 HVDC 연계선 2회선 탈락 시 계통 주파수이다. 여름철 최저 부하일 때 HVDC 연계선이 최저 출력량인 30MW로 운전 중일 경우는 59.56Hz로 UFR 부하 차단이 발생하지 않았다. 겨울철 최저 부하일 때 HVDC 연계선이 75MW로 운전 중일 경우는 계통 주파수가 59.08Hz로 UFR 1단계 부하 차단이 발생하였다. HVDC 연계선 출력이 150MW인 최대 부하일 때는 여름철에는 UFR 2단계, 겨울철에는 UFR 3단계가 동작하였다.



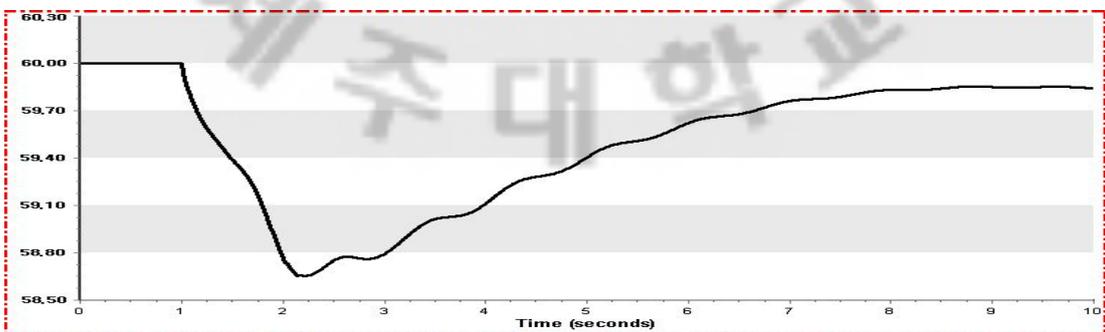
(a) 여름철 최저 부하



(b) 여름철 최대 부하



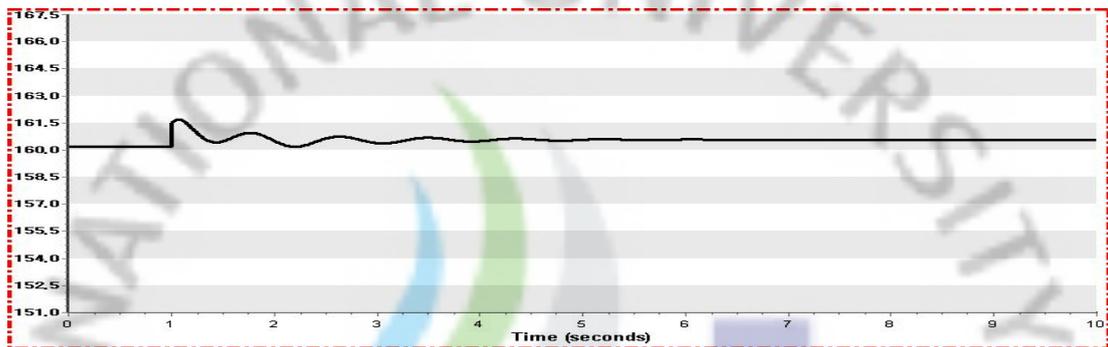
(c) 겨울철 최저 부하



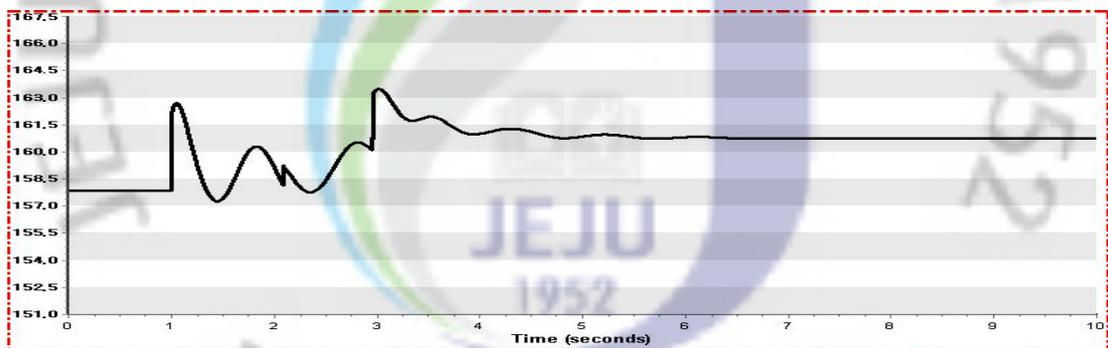
(d) 겨울철 최대 부하

그림 12 HVDC 연계선 2회선 탈락 시 계통 주파수

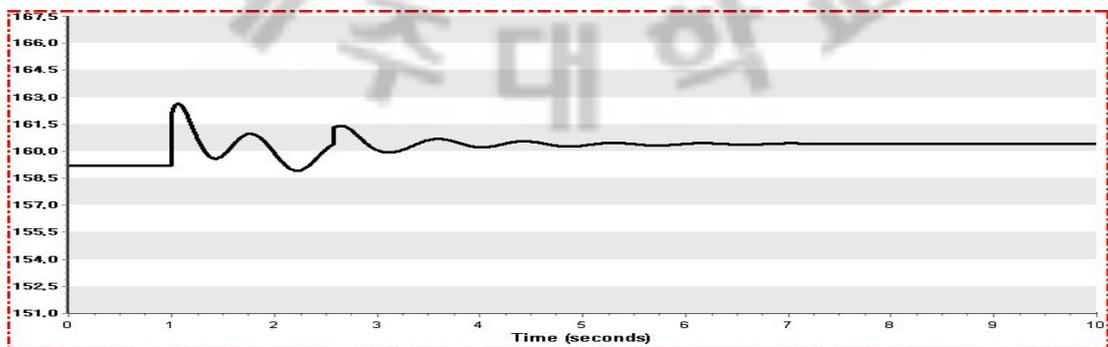
HVDC 연계선 2회선 탈락 사고가 발생했을 경우의 154kV 모선전압을 그림 13에 나타내었다. HVDC 연계선이 탈락 할 경우 무효전력에 의한 전압변동이 다른 발전기 탈락 사고에 비하여 크게 나타난다. 여름철과 겨울철 최저 부하일 경우에는 HVDC 연계선의 수전량이 적어서 전압변동이 적었지만 최대 부하기간일 경우에는 전압 상승이 크게 나타나고 있으며, 특히 겨울철에는 전압 붕괴가 일어날 수 있는 상황까지 발생하였고, 계통의 전압이 원래의 상태로 돌아오지 못하였다.



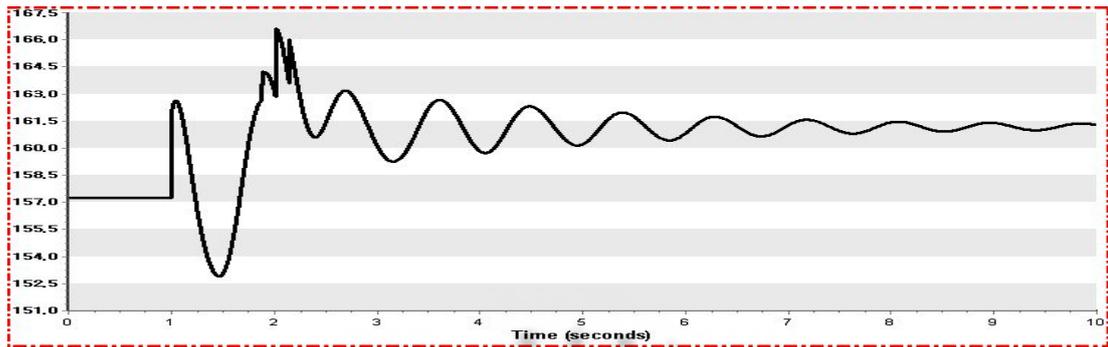
(a) 여름철 최저 부하



(b) 여름철 최대 부하



(c) 겨울철 최저 부하

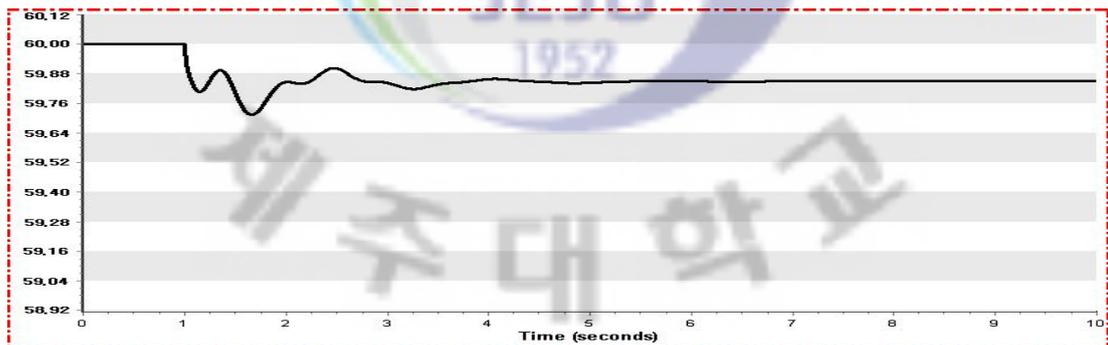


(d) 겨울철 최대 부하

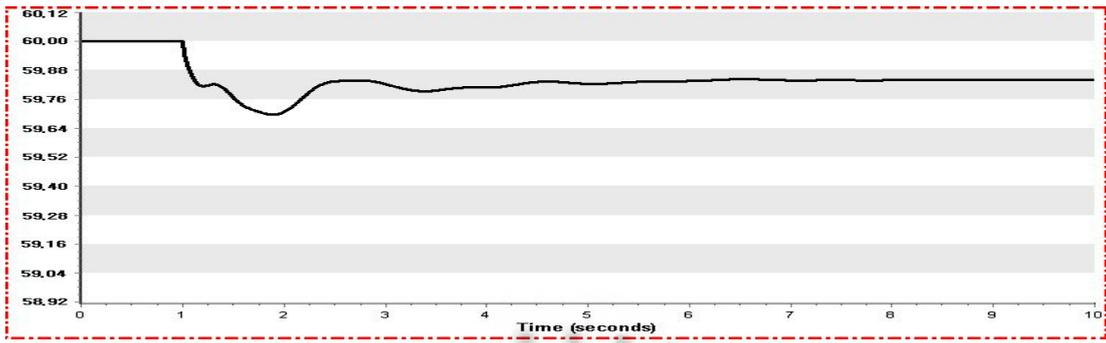
그림 13 HVDC 연계선 2회선 탈락 사고 시 154kV 모선전압

### 3) 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고

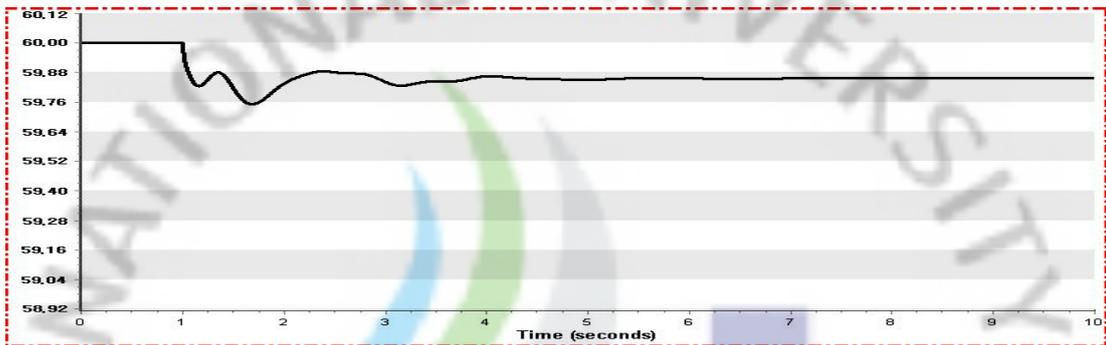
각각의 부하조건에서 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 모의 수행을 하였다. 이때의 계통 주파수를 그림 14에 나타내었으며, HVDC 연계선 정지기간을 제외한 모든 부하조건에서 계통 주파수는 59.6Hz~59.75Hz 범위 안에서 유지 되었으며 UFR 부하 차단은 발생하지 않았다. 최대 부하일 때에는 제주기력발전의 출력이 크기 때문에 최저 부하일 때보다 주파수가 더 많이 떨어졌다. HVDC 연계선 정지기간에는 최저, 최대 부하일 때 모두 주파수가 59.0Hz 이하로 낮아져 UFR 2단계 부하 차단이 동작하였다.



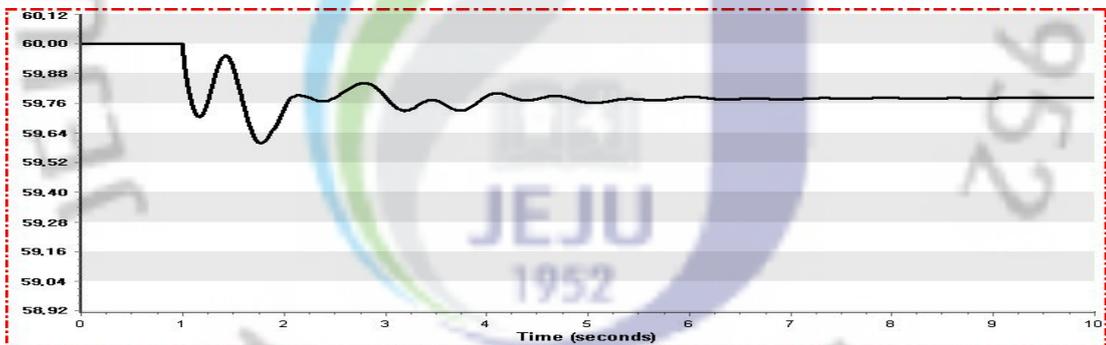
(a) 여름철 최저 부하



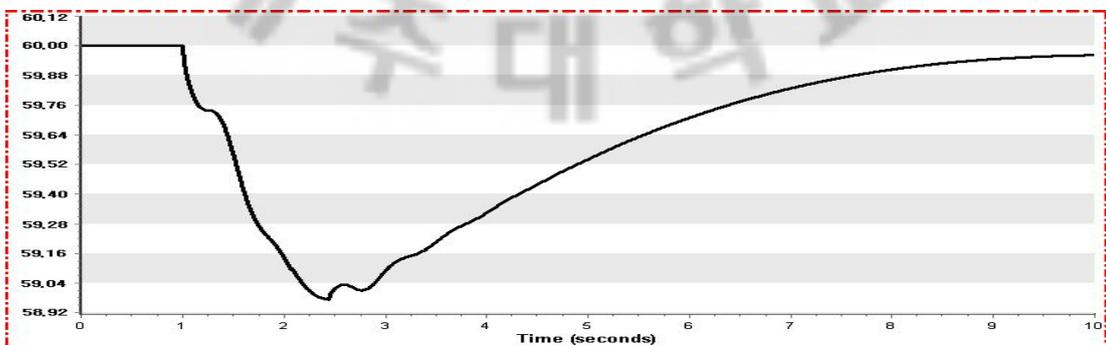
(b) 여름철 최대 부하



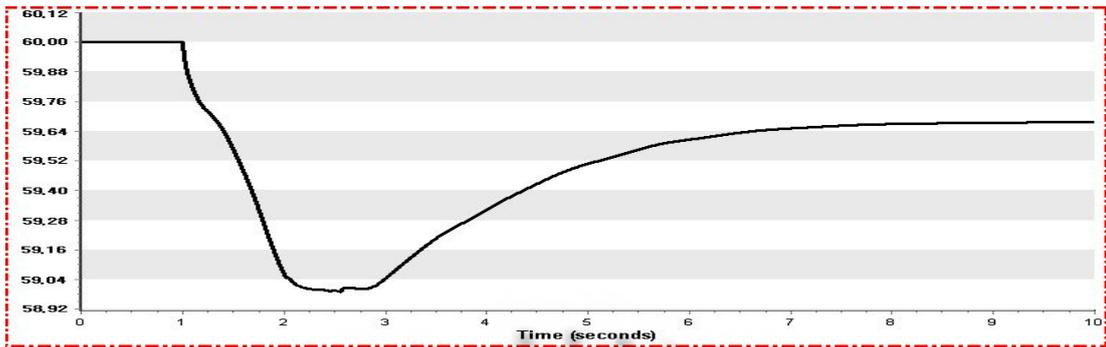
(c) 겨울철 최저 부하



(d) 겨울철 최대 부하



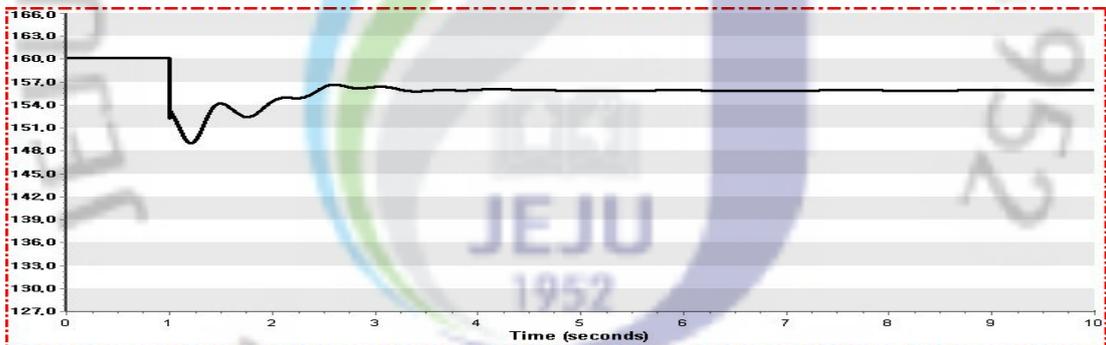
(e) HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하



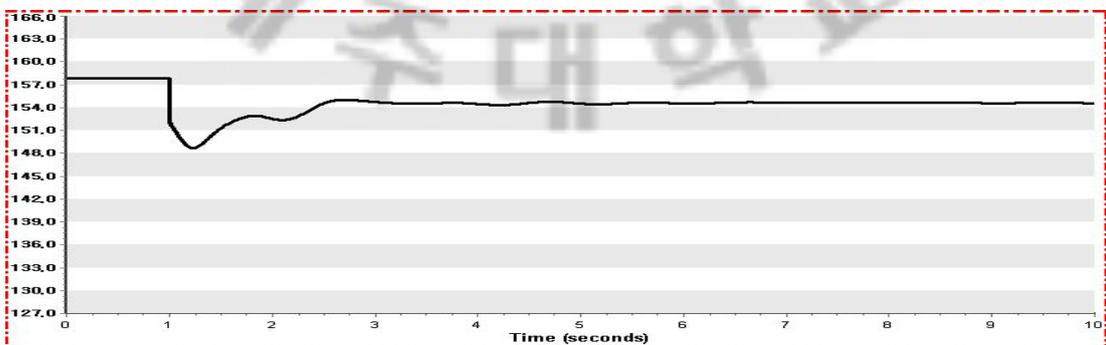
(f) HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하

그림 14 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 시 계통 주파수

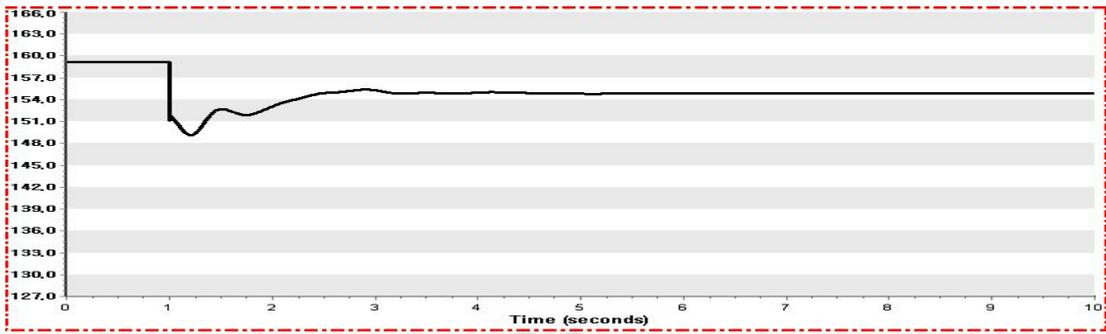
그림 15는 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 시 154kV 모선 전압을 나타낸 것이다. 제주기력발전 탈락 사고일 경우에는 모든 조건에서 모선 전압이 불안정하였다. 전압강하가 큰 폭으로 일어났으며, 사고 발생 전의 전압으로의 복귀가 되지 못하였다. 특히 겨울철 최대 부하 시에는 전압강하가 약 126kV까지 나타났다.



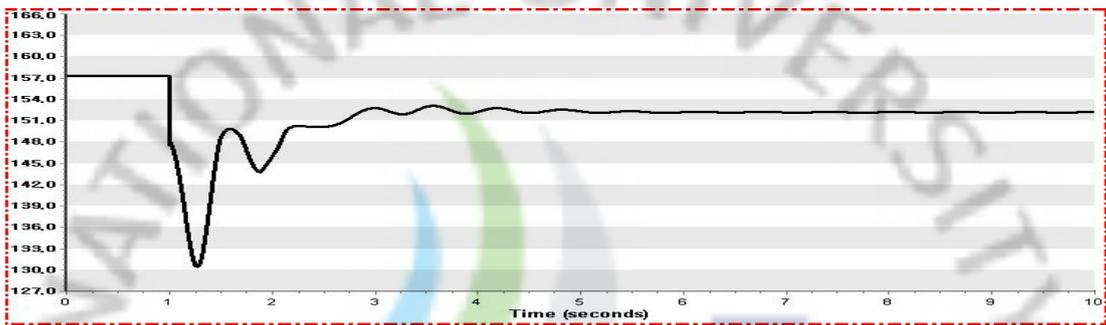
(a) 여름철 최저 부하



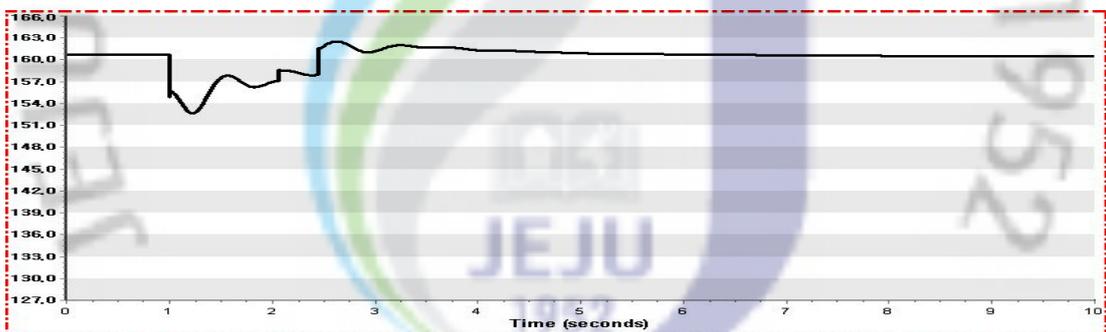
(b) 여름철 최대 부하



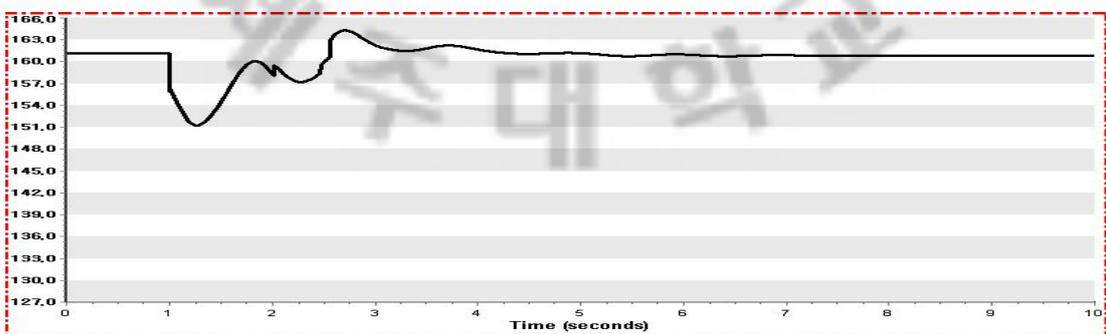
(c) 겨울철 최저 부하



(d) 겨울철 최대 부하



(e) HVDC 연계선 정지기간 중 최저 부하



(f) HVDC 연계선 정지기간 중 최대 부하

그림 15 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고 시 154kV 모선전압

## IV. 결과 및 고찰

제주지역의 풍력발전의 평활 효과는 출력 변동률에 있어서는 좋게 나타나고 있지만, 출력 패턴의 비슷한 것으로 보아서 제주지역에서는 분포의 효과가 크게 없는 것으로 나타났다. 또한, 최대 출력 변동률은 정격설비용량의 34%까지 나타났으며, 이에 대한 운전예비력을 확보하여 계통을 운영해야 할 것이다.

풍력발전의 유효용량은 해외의 사례를 토대로 제주계통에 맞는 방법으로 선정하였으며, 각 계절별 피크부하시간의 풍력 설비용량을 활용하여 풍력발전의 유효용량을 선정하였으며, 계절별 유효용량은 겨울 8.3MW(27%), 봄 2.1MW(7%), 여름 1.5MW(5%), 가을 2.7MW(9%)으로 선정하였다. 이에 맞추어 발전기 운영 계획을 세우는데 있어서 풍력 발전기에 대한 운전 예비력을 선정하여 계통을 효율적으로 운영할 수 있다.

제주계통의 다음의 세 가지 상정사고 조건에 대하여 과도안정도를 시뮬레이션 한 결과의 계통 주파수와 154kV 모선전압의 변화에 정리하면 다음과 같다.

풍력단지 102MW 동시 탈락 사고가 발생했을 경우 HVDC 연계선이 있는 경우에는 UFR 부하 차단 동작 상황은 발생하지 않았지만, HVDC 연계선 정지 시간 중에는 부하가 적을 경우에 UFR 1단계 부하 차단이 동작하였다. 이는 HVDC 연계선이 계통에 연결 되었을 경우에는 HVDC 연계선이 빠른 전력공급을 해주어 주파수가 유지할 수 있었지만, HVDC 정지기간 중에는 전력공급이 빠르게 이루어질 수 없어 주파수가 더 많이 낮아져 UFR 부하 차단 동작이 발생한 것이다.

전압의 경우에는 풍력발전시스템의 무효전력의 소모로 인하여 부하 측 모선 전압이 순간적으로 급격히 증가하였다. 그리고 HVDC 연계선 정지기간 동안에는 전압의 상승한 후 시간이 지나도 원래 계통의 전압으로 복구가 되지 못하였다.

HVDC 연계선 2회선 탈락 사고에서는 HVDC 연계선의 출력량을 전체 수요량에 맞추어 조절하였다. 여름철 최저 부하일 때는 UFR 부하 차단이 발생하지 않았고, 겨울철 최저 부하일 때는 계통 주파수가 59.08Hz로 UFR 1단계 부하 차단

이 발생하였다. 여름철 최대 부하일 경우는 UFR 2단계, 겨울철 최대 부하일 경우는 UFR 3단계가 동작하였다. 또한 HVDC 연계선 탈락 사고의 경우에는 주파수 회복이 느렸다.

HVDC 연계선이 탈락 할 경우 무효전력에 의한 전압변동이 다른 발전기 탈락 사고에 비하여 크게 나타났다. 이 원인은 HVDC 연계선에서 소비되는 무효전력을 동기조상기, 다른 일반발전기 그리고 부하 측에서 보상을 해주어야 하지만 무효전력이 커서 모두 보상해 주는 여력이 부족하기 때문이다. 최저 부하일 경우에는 전압변동이 적었지만 최대 부하일 경우에는 전압 상승이 크게 나타났으며 HVDC 연계선의 출력량에 비례하여 무효전력을 소비하기 때문이다.

제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고인 경우 HVDC 연계선 정지기간을 제외한 모든 부하조건에서 계통 주파수는 59.6Hz~59.75Hz로 UFR 부하 차단은 동작하지 않았다. HVDC 연계선 정지기간 중에는 주파수가 59.0Hz 이하로 낮아져 UFR 2단계 부하 차단이 동작하였다.

제주기력발전 탈락 사고일 경우에는 모든 조건에서 모선 전압이 불안정 하였다. 전압강하가 큰 폭으로 일어났으며, 사고 발생 전의 전압으로의 복귀가 되지 못하였다. 특히 겨울철 최대 부하일 때에는 전압강하가 약 126kV까지 나타났다.

## V. 결론

본 논문에서는 제주지역의 풍력발전이 대규모 증가에 대한 안정적인 계통 운영 방안을 모색하고자 풍력발전시스템의 특성 분석과 풍력발전의 유효용량을 선정하였다. 그리고 풍력설비가 포함된 상황에서의 과도안정도 해석을 통하여 제주 계통의 주파수와 전압 특성을 분석하여 계통 안정화 방안을 검토한 결과는 다음과 같다.

풍력발전의 평활 효과는 출력 변동률 면에서는 좋게 나타나고 있었지만, 출력 페턴이 거의 비슷하게 나타났다. 제주지역의 좁은 지역적 환경에 의해서 풍력발전의 평활 효과는 적다. 풍력설비의 유효용량은 계절별로 겨울 8.3MW(27%), 봄 2.1MW(7%), 여름 1.5MW(5%), 가을 2.7MW(9%)으로 선정하였다.

상정사고의 과도안정도 해석 결과 HVDC 연계선 운영 상황에 따라 주파수의 변화가 나타나고 있었다. 운전 중인 경우에는 UFR 부하 차단 동작이 발생하지 않았지만 운영 정지기간과 HVDC 연계선 사고인 경우에는 UFR 부하 차단이 동작하였다. 이를 방지하기 위해서는 풍력발전설비에 대한 운전 예비력을 확보하기 위하여 한림복합발전 및 제주내연 그리고 남제주내연까지 항상 운전 대기하여야 할 것이다.

모든 사고에 있어서 전압의 변화가 크게 나타나고 있다. 풍력발전단지 탈락 사고와 HVDC 연계선 탈락 사고에는 무효전력에 의한 전압 상승이 발생하였다. 제주기력발전 2, 3호기 동시 탈락 사고가 발생하면 무효전력의 공급원이 줄어 전압 강하가 나타났다. 이를 대비하기 위해서는 풍력발전기 측은 출력을 제어하고, 일반발전기 측에서는 충분한 운전예비력을 갖추어 운영을 해야 할 것이다. 또한, 전압붕괴를 막기 위해서 무효전력 보상 장치인 SVC, FACTS, 그리고 STATCOM 등의 설치가 필요하다. 이러한 설비가 들어오면 풍력발전기와 부하 모선에 대하여 충분히 무효전력을 공급하여 계통이 안정적으로 운영할 수 있을 것이며, 상정사고들에 대해서도 대규모 정전이나 전압붕괴를 막을 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈 - 풍력, 2008
- [2] 김영환, 풍력설비의 제주 전력계통 운영에 미치는 영향에 관한 연구, 석사학위논문, 2006
- [3] Masahiro Asari, Toshiya Nanahara, Tsutomu Maejima, Koji Yamaguchi, Takamitsu Sato, A Study on Smoothing Effect on Output Fluctuation of Distributed Wind Power Generation, IEEE, 2002
- [4] Rajesh Karki, Po Hu, Impact of Wind Power Growth on Capacity Credit, IEEE, 2007
- [5] Michael Milligan, Wind Capacity Credit in the United States, 2008 IEEE
- [6] 한국전력거래소, 신재생에너지 전원접속에 따른 계통영향 분석 및 운영방안 연구, 2006
- [7] Godfrey Boyle, "Renewable Electricity and the Grid", January 2007.
- [8] 이상호, 미국 풍력발전의 전력가치, 해외전력정보, 2006
- [9] Brendan Fox, Damian Flynn, Leslie Bryans, Nick Jenkins, David Milborrow, Mark O'Mally, Richard Watson and Olimpo Anaya-Lara, Wind Power Integration-connection and system operational aspects, 2007
- [10] 고성민, 풍력발전시스템 증가에 따른 제주 전력계통 특성 해석, 석사학위논문, 2006

## 감사의 글

대학원 생활을 시작한지 어느덧 2년이라는 시간이 흘렀습니다. 이 기간 동안에 학부 시절에 배우지 못하였던 많은 지식들을 얻을 수 있었고, 학교 수업 이외에 세미나에 참석하여 강연을 들으며 새로운 정보와 이슈들을 알게 되었습니다. 또한 논문과 보고서를 쓰면서 깊이 있는 전공 지식들을 습득할 수도 있었습니다. 그리고 대학원 생활을 통하여 학문에 접근하는 방법을 조금이나마 경험할 수 있는 기회가 되었고, 이 모든 경험들이 나의 생활에 많은 도움이 되었습니다.

저에게 배움에 대한 겸손한 접근과 경험을 얻을 수 있는 많은 기회를 주시고 부족한 저를 믿고 배려해 주신 김세호 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 또한 대학원 생활에 있어서 전공 지식들과 관심과 사랑을 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데에도 항상 곁에서 많은 조언과 격려를 해주시는 전력거래소 김영환 과장님과 한국전력공사 변균익 선배님께도 감사드립니다.

연구실에서 아무런 불평불만 없이 같이 생활해 온 영준이형과 현철, 승협, 상훈 그리고 대학원 생활 동안 서로 도우며 배움을 같이한 도진이형, 재홍이형, 석훈이형, 창호형, 태영이형, 상수형, 완석이형, 형규형, 진홍이형, 대현이형 그리고 멀리 베트남에서 온 호환에게 감사드립니다. 대학원 생활을 하는 데 도움을 많이 준 창진이형, 진협이형, 김상연, 이진재 조교 선생님과 학부를 졸업한 후에도 도움을 주신 많은 졸업 동기 형들에게도 감사드립니다.

끝으로 저를 믿고 사랑하고 아껴주시는 부모님과 형에게 사랑하고 고맙다는 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 내 곁에서 기쁠 때나 슬플 때나 응원해주는 소중한 친구들 문형, 현호, 대준, 우용, 지훈에게 고마운 마음을 전합니다.

많은 사랑과 감사를 주신 보답으로 이제 막 시작의 길을 걷는 각오로 열심히 생활하는 사람이 되기를 약속드립니다. 계속 지켜봐 주십시오. 감사합니다.

2009년 12월

강지윤 드림