



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

STATCOM에 의한 제주계통의
전력품질 분석

濟州大學校 大學院

電氣工學科

安 進 洪

2011 年 6 月

STATCOM에 의한 제주계통의 전력품질 분석

指導教授 金 一 煥

安 進 洪

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 6月

安進洪의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2011年 6月

Analysis of Power Quality in Jeju Power
Grid with STATCOM

Jin-Hong Ahn
(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

그림 목차	i
표 목차	iii
SUMMARY	iv
1. 서 론	1
2. STATCOM의 제어이론	3
2.1 전압 및 무효전력 제어	3
2.2 STATCOM의 모델링 및 제어원리	8
2.2.1 수학적 모델링	11
2.2.2 직류 컨버터 제어	13
2.2.3 STATCOM의 PSCAD/EMTDC 모델링	14
3. 제주계통 모의실험	17
3.1 제주계통 모델링	17
3.1.1 발전소 모델링	19
3.1.2 풍력발전단지 모델링	20
3.1.3 전류형HVDC 모델링	24
3.2 결과 및 고찰	25

3.2.1 STATCOM 설치 유·무에 따른 계통 분석	27
3.2.2 전체풍력발전에서 동부지역 풍력발전 탈락 시 계통 분석	30
3.2.3 제주 기력 2호기 탈락 시 계통 분석	32
4. 결론	35
참고문헌	36

그림 목 차

그림 1 단상 송전 계통	3
그림 2 전압과 무효전력의 특성	4
그림 3 3상 전압형 STATCOM 시스템 회로도	9
그림 4 3상 전압형 PWM DC 컨버터 등가회로	10
그림 5 3상 전압형 PWM DC 컨버터 제어도	13
그림 6 전압형 STATCOM 모델링	14
그림 7 PLL 제어기 모델링	14
그림 8 d-q 변환부 모델링	15
그림 9 PWM 발생부 모델링	16
그림 10 제주계통 모델링	17
그림 11 발전소 모델링	19
그림 12 역률개선용 콘덴서를 채용한 유도발전기	21
그림 13 농형 유도발전기 모델링	22
그림 14 이중 여자 유도발전기를 사용한 계통연계 풍력발전	23
그림 15 이중 여자 유도발전기 모델링	23
그림 16 전류형 HVDC 모델링	24
그림 17 동부지역 바람자원	27
그림 18 서부지역 바람자원	27
그림 19 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력	28
그림 20 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM 에서 발생하는 무효전력	28
그림 21 발전소의 유효전력 및 무효전력	29
그림 22 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력	30

그림 23 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM 에서 발생하는 무효전력	31
그림 24 발전소의 유효전력 및 무효전력	32
그림 25 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력	32
그림 26 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM 에서 발생하는 무효전력	33
그림 27 발전소의 유효전력 및 무효전력	34

표 목 차

표 118



Summary

This thesis presents the modeling and power quality analysis of Jeju power grid with STATCOM. In the study, five kinds of major components are modeled : a total of 172MW wind farms, 250MW HVDC system, thermal power plants, STATCOMs and Jeju power loads. To analyze the impact of the wind penetration to the Jeju power system, simulations are carried out for case studies by using PSCAD/EMTDC program. One is for the steady-state operation under variable speed, and the other is for transient-state operation when one of wind farms or power plants are disconnected from the Jeju power grid due to sudden problems.

These comparative studies have been effective in studies for Jeju Island power system stability with STATCOMs.

I. 서 론

최근 중국, 인도 등과 같은 신흥개발도상국의 에너지 사용 증가 및 전 세계적으로 화석연료 및 지구자원의 사용 증가에 따른 자원고갈이 심각한 상태이다. 그에 따른 국가별 새로운 에너지의 개발 및 확보 경쟁이 치열하다. 최근 일본 동북부 대지진으로 인한 후쿠시마 원전사고로 자국뿐만 아니라 주변국가에도 위협이 되고 있으며, 원자력에 대한 안전 불안감이 커짐에 따라 신재생에너지 분야가 각광 받고 있고 세계적인 추세를 보더라도 반드시 개척해야 할 분야이다.

2013년부터 기후변화협약에 따른 국가별 탄소의무 감축량 배정에 따라, 우리나라도 2013년부터 탄소배출 의무 감축 국가에 진입하여 탄소거래제가 시행될 예정이다, 2012년부터 발전사업자의 총발전량 가운데 일정비율 이상을 신재생에너지 전력으로 공급하도록 의무화하는 제도인 RPS(Renewable Portfolio Standards)를 도입하여 시행할 예정이다. 우리나라는 『2015년 5대 신재생 에너지 강국으로 도약』이란 신재생에너지산업 발전전략을 바탕으로 태양광을 제2의 반도체로, 풍력을 제2의 조선업으로 육성하는 것을 목표로 정부의 신 성장 동력산업으로 추진하고 있다. 이러한 국가 정책 및 추세에 맞물려 풍력산업이 급성장 하고 있다.

현재, 제주도는 한경, 표선, 구좌 지역(육상풍력)에 약 7~7.5m/s, 동북, 서북, 서남, 동남 지역 앞바다(해상풍력)에 약 8~8.5m/s의 세계 최고 수준의 바람자원을 확보하고 있으며, 2010년부터 제주지역의 전력거래 단가 인상으로 인해 육지 지방과의 차별화된 발전차익을 가지고 있다[1]. 그러나, 바람자원이 좋은 지역인 제주 동·서부 지역들은 전력부하가 적은 지역으로 변전 설비 용량이 크지 않다. 또한, 불확실한 출력 변화를 갖기 때문에 풍력발전 설비가 증가함에 따라 설비가 연계된 선로의 전력의 품질을 떨어뜨릴 수 있고, 나아가 제주계통 자체가 흔들릴 수 있다. 이러한 문제점들로 인해 한국전력에서는 2011년 말경에 신제주변전소와 한라변전소에 각각 50Mvar 용량인 동특성이 빠른 전압형 STATCOM(Static Synchronous Compensator) 2기를 설치할 예정이다.

STATCOM은 정지형 무효전력 보상장치로, 전기를 송배전할 때 손실전압을

보충해 안정성을 높이는 설비를 말한다. 특히 반도체 스위치를 이용한 전력전송 시스템의 핵심인 이 설비는 전기 흐름을 능동적으로 제어함으로써 풍력이나 태양광 등 신재생에너지 발전 시 기상상황에 따라 발전량이 급변하더라도 출력전압을 일정하게 유지해 안정적으로 전력을 공급할 수 있게 해준다.

따라서, 본 논문에서는 전력전자시스템응용과 전력계통 해석에 용이한 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하여, 제주도 발전운영계획에 명시된 2013년 10월 기저부하 351MW를 기준으로 연계선 #1은 overhaul 상태, 연계선 #2(250MW)는 주파수 운전을 하고, 제주내연 1호기 28MW, 남제주기력 3호기 55MW, 제주기력 2호기 45MW로 정격출력 운전을 하고, 제주내연 2호기, 남제주기력 4호기, 제주기력 3호기는 정지, 남제주내연 1, 2호기는 폐지하고, 육상풍력 172MW 및 전압형 STATCOM 50Mvar 용량 2기를 포함한 제주계통 운전조건을 먼저 컴퓨터 해석을 하여 전압, 주파수 및 유효, 무효 전력 상태를 가변풍속에서의 STATCOM 설치 전·후의 운전조건과 비교 분석하고 전체풍력에서 동부지역 풍력발전 탈락 시, 제주기력 2호기 탈락 시의 154KV 모선의 전압, 주파수 변동 및 유효, 무효전력의 상태를 컴퓨터 해석을 통하여 비교 분석하고자 한다.

II. STATCOM의 제어이론

2.1 전압·무효 전력 제어

수용가의 수전단 전압, 주파수를 정격으로 유지하고 양질의 전력을 공급을 공급하기 위해서는 전압과 무효 전력 제어가 필수이다. 일반적으로 수용가의 전기 기기는 정격 전압에서 사용할 경우에 가장 좋은 성능을 발휘하게끔 설계되어 있기 때문에 만일 전압이 정격에서 벗어나면 효율 저하, 수명 단축, 손실 증대 등의 나쁜 영향이 나타난다. 또한, 전력을 공급하고 있는 전력 회사측에서 보면 전력 계통의 각 지점에서 적절한 전압을 유지하지 못하면 전력 계통 전반에 걸쳐 나쁜 영향을 끼치게 되고 공급 신뢰도와 경제성이 저하한다.

그림 1을 보면 \dot{E} 는 발전기 기전력, \dot{V} 는 부하 단자 전압, $R+jX$ 는 발전기의 내부 리액턴스까지 포함한 송전계통의 임피던스이다. 일반적으로 송전 계통에서는 $R \ll X$ 가 성립한다. 이러한 경우 송전선상의 유효 전력은 \dot{E} 와 \dot{V} 의 위상차에, 무효전력 Q 는 송전 계통의 전압 강하에 밀접하게 관계한다.

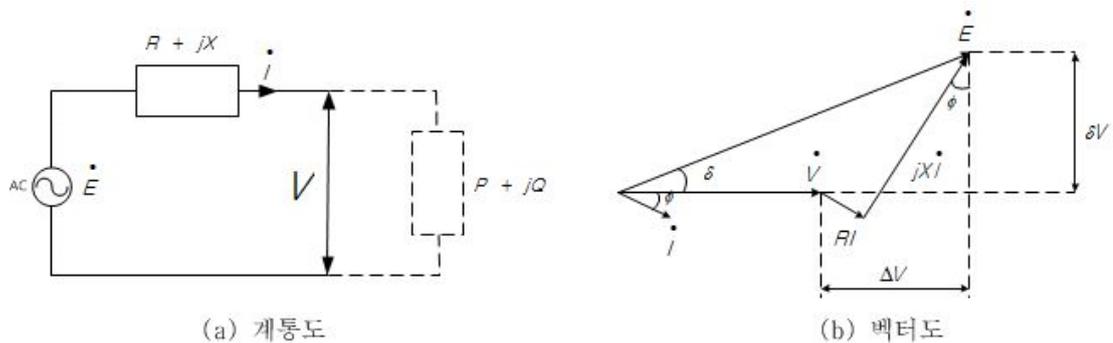


그림 1 단상 송전 계통도

부하 전력의 역률각을 ϕ 라 하면 \dot{V}, \dot{E} 및 \dot{I} 의 벡터도는 그림 (a)처럼 된다. 이 그림으로부터

$$\begin{aligned}
 E^2 &= (V + RI\cos\Phi + XI\sin\Phi)^2 + (XI\cos\Phi - RI\sin\Phi)^2 \\
 &= \left(V + \frac{VI\cos\Phi \cdot R + VI\sin\Phi \cdot X}{V} \right)^2 + \left(\frac{VI\cos\Phi \cdot X - VI\sin\Phi \cdot R}{V} \right)^2 \\
 &= \left(V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V} \right)^2 + \left(\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V} \right)^2 \\
 &= (V + \Delta V)^2 + (\delta V)^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

로 된다. 여기서

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}, \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V}$$

송전 계통에서는 $\delta V \ll V + \Delta V$, $R \ll X$ 가 성립하므로

$$\begin{aligned}
 Q &\doteq \frac{V}{X} \Delta V = \frac{V}{X} (E - V) \\
 P &\doteq \frac{V}{X} \delta V = \frac{VE\sin\delta}{X}
 \end{aligned} \tag{2}$$

로 되어 Q 는 전압 강하($E - V$)에 P 는 $\sin\delta$ 에 비례함을 알 수 있다.

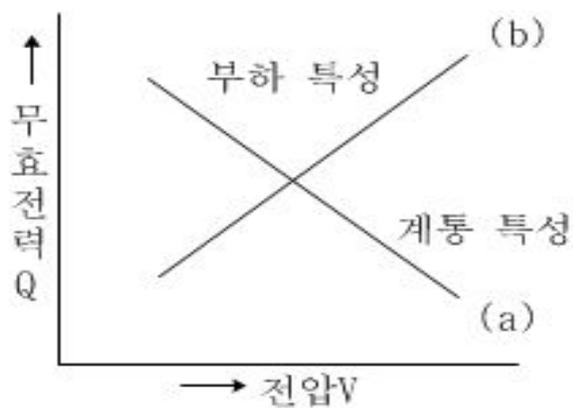


그림 2 전압과 무효전력의 특성

그림 2는 일반적인 전력 계통에서의 전압·무효 전력 특성을 나타낸 것으로 (a) 곡선은 계통 측 특성, 즉 계통 측에서는 무효 전력을 공급하면 그만큼 전압이 내려간다는 것을 가리키고 있다. 이에 대하여 (b) 곡선은 부하의 자기 제어 특성으로서 전압이 내려가면 무효 전력의 소비도 줄어들어 결국 (a), (b) 곡선의 양자가 교차하는 점에서 균형을 유지하게 된다.

부하의 자기 제어 특성은 계통의 전압 제어상 기울기가 클수록 좋지만 최근에는 부하 역률이 나쁘고 또한 정전력 특성을 지닌 유도 전동기의 비율이 늘어나고 있어서 전압 조정을 어렵게 하고 있다.

전력 계통의 부하는 이와 같은 단시간의 변동 외에 하루 사이에서도 큰 변화를 보인다. 부하가 변화한다는 것은 수용가에서 소비될 무효 전력도 거의 비슷하게 변한다는 것이며, 또한 송전선 등의 무효 전력 손실은 통과 전류의 제곱에 비례하기 때문에 종합적으로 본 무효 전력 변화는 아주 큰 것으로 된다[2].

무효 전력의 공급은 에너지인 유효 전력의 공급과 달라서 그 공급원은 여러 가지가 있고, 또 그 설치 장소도 자유로이 선정할 수가 있어서 다양한 반면에 그만큼 이들의 합리적인 배분은 어려운 편이며, 무효 전력의 공급원은 다음과 같다.

1) 발전기

발전기는 전기 에너지를 발생함과 동시에 전력 계통의 전압을 유지하는 데 기여한다. 발전기는 일반적으로 정격 출력에서 85~90%정도의 역률에 상당하는 무효 전력을 공급할 수가 있다. 이 무효 전력은 여자 전류를 가감해서 제어할 수가 있는 것으로서, 가령 여자 전류를 증가시키면 무효 전력의 발생이 증가되어서 발전기 단자 전압이 상승하게 되고, 반대로 여자 전류를 줄이면 무효 전력의 발생이 감소되어서 발전기 단자 전압이 저하하게 된다. 또한, 여기서 여자 전류를 더 줄이면 발전기 단자에 있어서의 역률은 진상으로 되어 이번에는 계통으로부터 무효 전력을 흡수해서 소비함과 동시에 단자 전압을 더욱더 저하시키게 된다.

2) 부하 시 탭 조정 장치

변압기에는 기준으로 될 전압에 대응한 탭의 앞뒤에 $\pm 2.5\%$ 또는 $\pm 1.5\%$ 간격

으로 수 개의 탭을 설치하고 있다. 이 탭을 조작하면 변압기의 한 쪽의 전압을 일정하게 유지한 채 자유로이 다른 쪽의 전압을 바꿀 수가 있으므로 이에 의해서 전압 제어를 실시 할 수 있다.

3) 동기 조상기

무부하로 동기 전동기를 운전해서 여자 전류를 가감함으로써 계통으로부터 흡수하는 진상 또는 지상의 무효 전력을 조정해서 계통의 역률을 조정하는 것이다. 즉, 과여자로 운전하면 선로로부터 진상 전류를 흡수해서 지상 역률의 송전선의 역률을 1에 접근시켜 전압 강하를 감소시킨다. 반대로 부족 여자로 운전하면 지상 전류를 선로로부터 흡수하게 되므로 전압을 저하시킬 수가 있다.

동기 조상기는 속용도가 높고, 또 연속적인 제어가 가능하다는 점에서 다른 전압 제어용 기기보다 우수하다는 장점이 있으나, 반면 회전 기계이므로 운전 보수가 번거롭고 전력용 콘덴서나 분로 리액터에 비해 전력 손실이 많고, 또 건설비도 비싸다는 것이 결점으로 되어 있다.

4) 전력용 콘덴서

전력용 콘덴서는 동기 조상기와 비교해서 설비가 싸고 전력 손실이 작으며 운전 보수가 용이하다는 것 등으로부터 현재 무효 전력 공급원으로서 널리 사용되고 있다. 다만 전압이나 주파수가 저하하면 무효 전력 공급량도 적어지므로 계통 동요시에 동기 조상기와 같은 효과는 기대할 수 없고, 또 무효 전력을 흡수할 수 없다는 결점도 없지 않다.

5) 분로 리액터

분로 리액터는 전력용 콘덴서와 전혀 반대의 기능을 가지고 무효 전력의 공급이 소비를 넘어설 경우에 무효 전력을 소비하게 된다. 전력용 콘덴서와 같은 장·단점을 가지고 있으나, 야간 등의 경부하시에 계통 전압이 상승하는 것을 억제하기 위해서 초고압 송전선이나 지중 선로 계통이 집중하고 있는 지점에 설치되는 경우가 많다. 최근 우리나라에서도 심야 경부하시에 나타나는 과도한 진상 운전을 방지하기 위하여 이 분로 리액터를 주요 변전소에 설치 운용하고 있다.

6) 직렬 콘덴서

직렬 콘덴서는 선로에 직렬로 콘덴서를 삽입해서 선로 리액턴스를 감소하는 것으로 송·배전선의 전압 개선, 송전 용량 증대용, 환상 계통의 조류 제어용, 제강용 아크로 또는 교류 전차선에 있어서의 전압 변동 경감용 등으로 사용되고 있다.

7) 유도 전압 조정기

유도 전압 조정기는 전력 계통 내에서 가장 수용단에 근접한 장소에서 전압 제어를 하는 기기이다. 변압기의 탭 절체가 계단적 제어를 수행하는데 반하여 유도 전압 조정기는 변전소의 주변압기와 종합해서 생각할 때 변압비를 연속적으로 변화시키는 장치라고 할 수 있다.

8) 부하 시 탭 절체 장치부 변압기

부하에 전력을 공급하면서 권선의 탭을 절체하여 권선간의 권수비를 단계적으로 바꾸어서 전압을 조정하는 변압기로서 탭 절체 시 권선의 일부가 단락되더라도 과대한 단락 전류가 접촉자에 흐르지 않게끔 설계된 특수한 탭 절체 장치를 지니고 있다.

9) 정지형 무효 전력 보상 장치

정지형 무효 전력 보상장치로, 전기를 송배전할 때 손실전압을 보충해 안정성을 높이는 설비를 말한다. 특히 반도체 스위치를 이용한 전력전송 시스템의 핵심인 이 설비는 전기 흐름을 능동적으로 제어함으로써 풍력이나 태양광 등 신재생 에너지 발전 시 기상상황에 따라 발전량이 급변하더라도 출력전압을 일정하게 유지해 안정적으로 전력을 공급할 수 있게 해준다[2].

2.2 STATCOM의 모델링 및 제어원리

STATCOM은 크게 전류형과 전압형 두 가지로 나눌 수 있다. 전류형 컨버터는 출력전류가 제어회로에서 주어지는 기준파형을 추종하도록 직류측 전류를 PWM 방식으로 chopping, 출력단의 커패시터 필터를 거쳐 스위칭 리플 전류를 제거한 다음 계통에 주입하는 방식으로 제어된다. 반면에 전압형 컨버터는 교류측 순시전류를 검출하여 이 파형이 기준전류를 추종하게끔 컨버터의 스위칭 상태를 결정해 준다. 전류제어의 동특성에 두 방식을 비교해 보면 통상적으로 전류형 방식이 전압형에 비해 응답 특성이 좋은 것으로 알려져 있으나 커패시터 필터까지 포함한 전체적인 응답을 비교할 때는 큰 차이가 없는 것으로 생각된다.

전류형이 갖는 가장 큰 약점은 직류측에 비교적 큰 유도용량을 갖는 인덕터가 사용되어야 한다는 데에 있다. 직류 인덕터는 그 자체로 시스템의 비용을 상승시키는 요인이 된다. 그리고 인덕터 내에는 보상하고자 하는 부하전류의 순시 최대치 보다 큰 전류가 항상 흐르고 있어야 하는데 그 결과 인덕터 내의 저항성분에 의해 손실이 발생, 전체적인 시스템의 효율이 낮아진다. 최근에 이에 대한 보완책으로 직류단 전류의 크기를 부하전류의 크기에 연동하여 저부하시 효율을 향상시키는 가변전류방식이 제안되고 있으나 어느 정도의 손실은 피할 수 없다.

반면 전압형에서는 직류측 커패시터의 유전손실은 거의 무시할 수 있을 정도에 불과하며 스위칭 주파수를 충분히 크게 하면 교류측 인덕터를 작게 할 수 있으므로 여기에서의 손실은 전류형에 비하여 훨씬 작다. 그리고 경우에 따라서는 필터를 계통에 연계하기 위해 사용되는 변압기의 누설 인덕턴스로 교류측 인덕턴스를 대신할 수도 있다. 전압형이 전류형에 비해 불리한 점이라면 교류측 단락 등 사고시에 전류제한 능력이 떨어진다는 점이 있으나 이는 근래에 보편적으로 사용되는 전압형 PWM 인버터의 보호기술로써 충분히 감당할 수 있다. 따라서 현재 실용적인 측면에서 전압형 STATCOM이 주로 채택되고 있다[3][4].

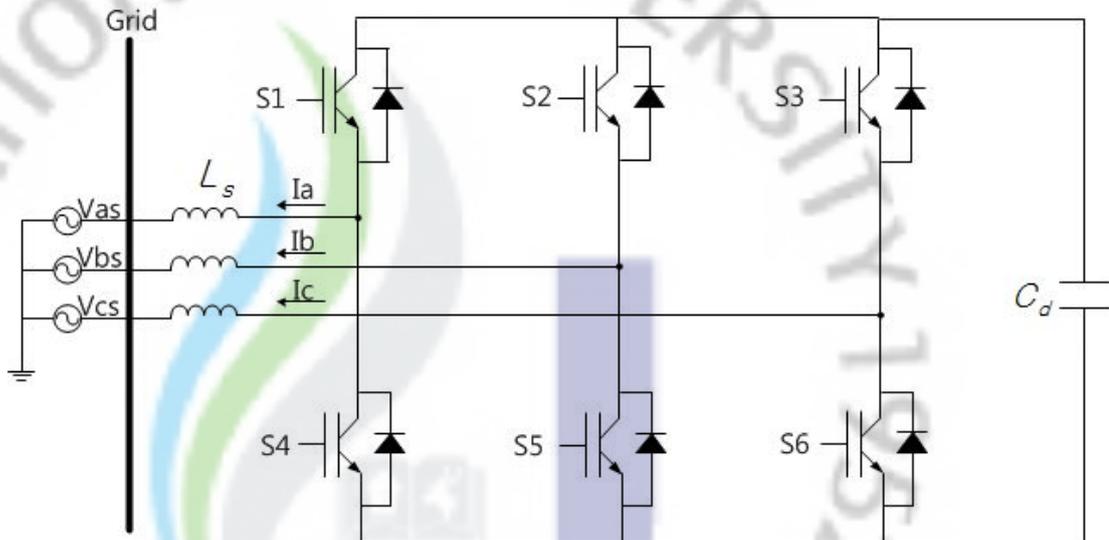


그림 3 전압형 STATCOM 시스템 회로도

그림 3은 3상 전압형 STATCOM 시스템의 전력회로도이다. 이 회로에서 6개의 IGBT, 6개의 역병렬 다이오드, 외부 삽입용 교류 입력측 리액터 L_s 및 평활용 캐패시터 C_d 로 구성되어 있다

이 전압형 PWM 직류 컨버터는 교류 입력측 리액터 L_s 를 매개로 AC/DC 승압 기능에 의하여 직류 출력전압을 상승시키는 승압형 컨버터의 개념과 같다. 또한 IGBT 소자를 점호하는데 사용되는 PWM 파형은 기준신호와 피드백된 직류 출력 전압과의 오차를 이용해 입력단 전압 및 전류의 처리를 통해 만들어진 공간전압 벡터방식에 의해 발생된다. 이 때 교류측 리액터의 승압기능에 의해 직류 출력측 캐패시터의 양단 전압은 전압형 PWM 직류 컨버터의 전원 전압보다 높은 전압을 가지기 때문에 어느 한 순간에 어떤 IGBT 소자 한쌍을 턴-온 시키면 리액터 L_s 에 걸리는 전위차만큼 전류가 리액터와 캐패시터 사이를 흐른다.

3상 교류 전원으로부터 교류측 리액터 L_s 를 매개로 전압형 PWM 직류 컨버터 입력단에 교류전력이 전달되며 그 교류전력은 전압 PWM 직류 컨버터에 의해서 직류전력으로 변환되어 출력 측 직류 전압용 평활용 캐패시터 C_d 에 에너지를 축적하며 부하에 이 에너지를 공급한다. 만약 운전중에 부하가 감소하여 회생운전을 하는 경우는 일단 직류전압 평활용 캐패시터 C_d 에 회생에너지를 축적한 후

전압형 PWM 직류 컨버터의 IGBT 소자에 의해서 교류전력으로 변환되어 전원측 회생에너지를 되돌려 준다[5][6].

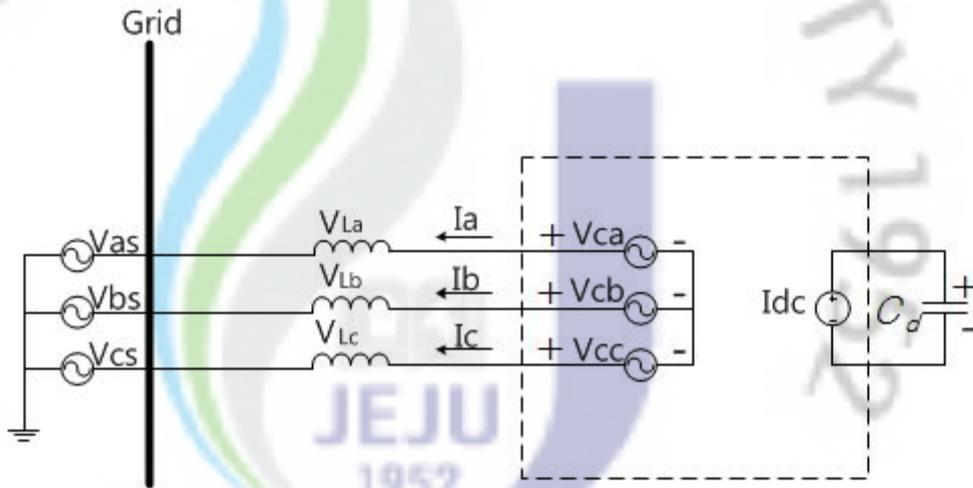


그림 4 3상 전압형 PWM DC 컨버터 등가회로

그림 4는 3상 전압형 PWM 직류 컨버터의 등가회로이다. 각 상의 전압은 다음 식을 만족한다.

$$V_{abcs} = V_{Labc} + V_{Cabc} \quad (3)$$

또한 교류측 입력전류 i_{abcs} 와 교류 입력측 리액터 L_s 에 걸리는 전압 V_{Labc} 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$V_{Labc} = j\omega_e L_s i_{abcs} \quad (4)$$

여기서, ω_e : 전원 각주파수

식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 리액터 전압 V_{Labc} 를 증대시키면 교류측 입력전류 i_{abcs} 가 증가하게 되며, 역으로 V_{Labc} 값이 음의 값으로 감소하면 i_{abcs} 의 방

향이 반전되어 에너지가 직류부하에서 평활용 캐패시터 C_d 와 IGBT 소자를 경유하여 교류 전원 측으로 반환되는 회생동작이 일어난다[7][8].

2.2.1 수학적 모델링

3상 전원 전압과 리액터 L_s 로 구성된 AC/DC 전압형 PWM 직류 컨버터는 그림4에 나타나 있고 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_{as} = L_s \frac{di_a}{dt} + V_a \quad (5)$$

$$V_{bs} = L_s \frac{di_b}{dt} + V_b \quad (6)$$

$$V_{cs} = L_s \frac{di_c}{dt} + V_c \quad (7)$$

여기서, V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 는 입력 전원전압, i_a , i_b , i_c 는 상전류이고, V_a , V_b , V_c 는 제어전압이다. 위의 방정식을 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$V_{abs} = L_s \frac{di_{abc}}{dt} + V_{abc} \quad (8)$$

여기서, $V_{abs} = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T$

$$I_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$$

$$V_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$$

임의의 속도로 회전하는 좌표계에서 3상 전압형 PWM 직류 컨버터의 d-q전압

방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_{sdse} = L_s \frac{di_{dse}}{dt} + \omega_e L_s i_{dse} + V_{dse} \quad (9)$$

$$V_{sqse} = L_s \frac{di_{qse}}{dt} + \omega_e L_s i_{qse} + V_{qse} \quad (10)$$

정지좌표계에서의 d-q전압방정식은 식 (10)에 $\omega_e = 0$ 를 대입함으로써 다음 식 (11)과 같이 된다.

$$V_{sdse} = L_s \frac{di_{dse}}{dt} + V_{dse} \quad (11)$$

$$V_{sqse} = L_s \frac{di_{qse}}{dt} + V_{qse} \quad (12)$$

동기좌표계에서의 d-q전압방정식은 식 (10)에서 $\omega_e (=2\pi f)$ 를 대입하여 다음과 같이 구해진다.

$$0 = L_s \frac{di_{dse}}{dt} - \omega_e L_s i_{qse} + V_{dse} \quad (13)$$

$$E = L_s \frac{di_{qse}}{dt} - \omega_e L_s i_{dse} + V_{qse} \quad (14)$$

식 (14)에서 q축 전압은 상수값 E를 가진다. 또한 전원 측에서 직류컨버터로 공급되는 유효전력은 다음 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} (V_{qse} i_{qse} + V_{dse} i_{dse}) = \frac{3}{2} V_{qse} \cdot i_{qse}$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_{qse} i_{dse} - V_{dse} i_{qse}) = \frac{3}{2} V_{qse} \cdot i_{dse} \quad (15)$$

식 (15)에서 알 수 있듯이 직류컨버터에 유입되는 전력과 관계된 전류는 동기좌표계 q축 전류이며, 동기좌표계 d축 전류와는 무관하다. q축전류를 제어하면 유효전력을 제어할 수 있음을 나타내고 있다. 따라서 동기좌표계 q축 전류는 무효 전력분, d축 전류는 유효 전력분 전류라 볼 수 있으므로 역률은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$Pf = \frac{i_{qse}}{\sqrt{i_{qse}^2 + i_{dse}^2}} \quad (16)$$

따라서 q축과 d축 전류를 제어하면 역률을 제어할 수 있음을 알 수 있다[7][8].

2.2.2 직류 컨버터 제어

그림 5는 3상 전압형 PWM 직류 컨버터의 전체 제어도를 나타낸 것이다. 직류전압 V_{dc} 및 교류 입력전류 i_{abc} 의 제어동작은 다음과 같이 행해진다. 우선 직류전압의 기준치와 검출된 직류전압과의 편차가 PI제어기에 의해 수행된다.

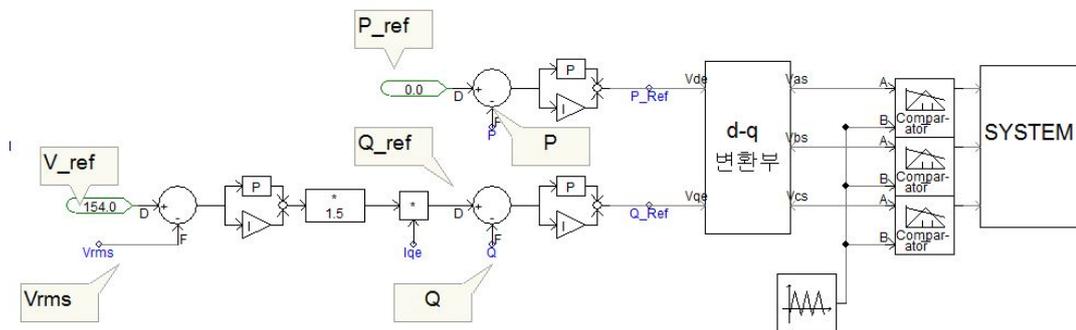


그림 5 3상 전압형 PWM DC 컨버터 제어도

수행되어 나온 결과는 식 (14)에서 알 수 있듯이 무효성분 전류의 기준 지령치 i_{dse}^* 가 되고 여기에 교류 입력측 무효성분 전류의 검출치 i_{dsc} 비교된 편차는 PI 제어기에 의해 실행되어 유효성분 전압의 기준 지령치 V_{qse}^* 를 얻는다. 이 기준 지령치를 d-q 정지 좌표계로 변환하고 공간벡터 변조기법에 의해 PWM을 발생시켜, 전압형 PWM 직류 컨버터를 제어한다. 식 (16)에서 알 수 있듯이 $i_{dse}^* = 0$ 으로 제어함으로써 기본파 역률이 1로 유지됨을 알 수 있다.

2.2.3 STATCOM 모델링

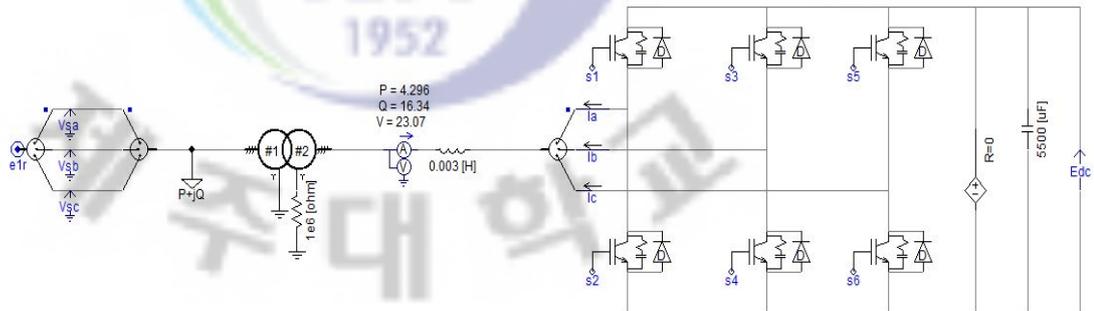


그림 6 전압형 STATCOM 모델링

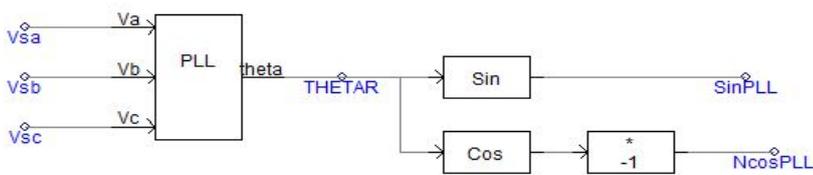


그림 7 PLL 제어기 모델링

그림 6은 전압형 STATCOM을 모델링한 그림이다. 2.2절에 설명했듯이 이 회로에서 6개의 IGBT, 6개의 역병렬 다이오드, 외부 삼입용 교류 입력측 리액터 L_s 및 평활용 캐패시터 C_d 로 구성되어 있으며, 단상 전압원 모델을 사용하여

STATCOM의 무효전력 50Mvar용량을 만들었다.

그림 7은 PLL(Phase Loked Loop)제어기 모델로 계통의 3상 전압을 실시간으로 읽어 θ 를 추종하여 d-q변환 시 필요한 SinPLL 과 NcosPLL을 만들어낸다.

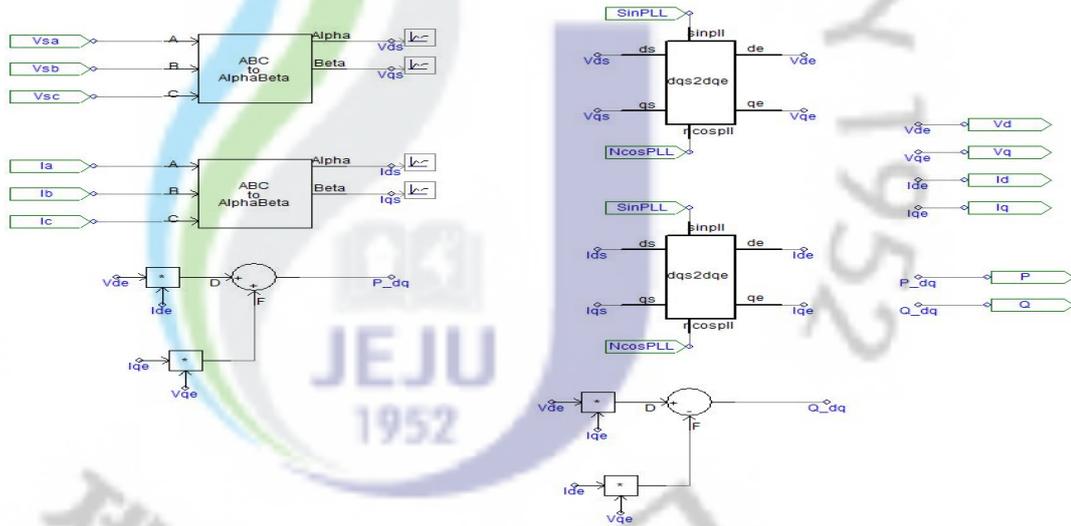


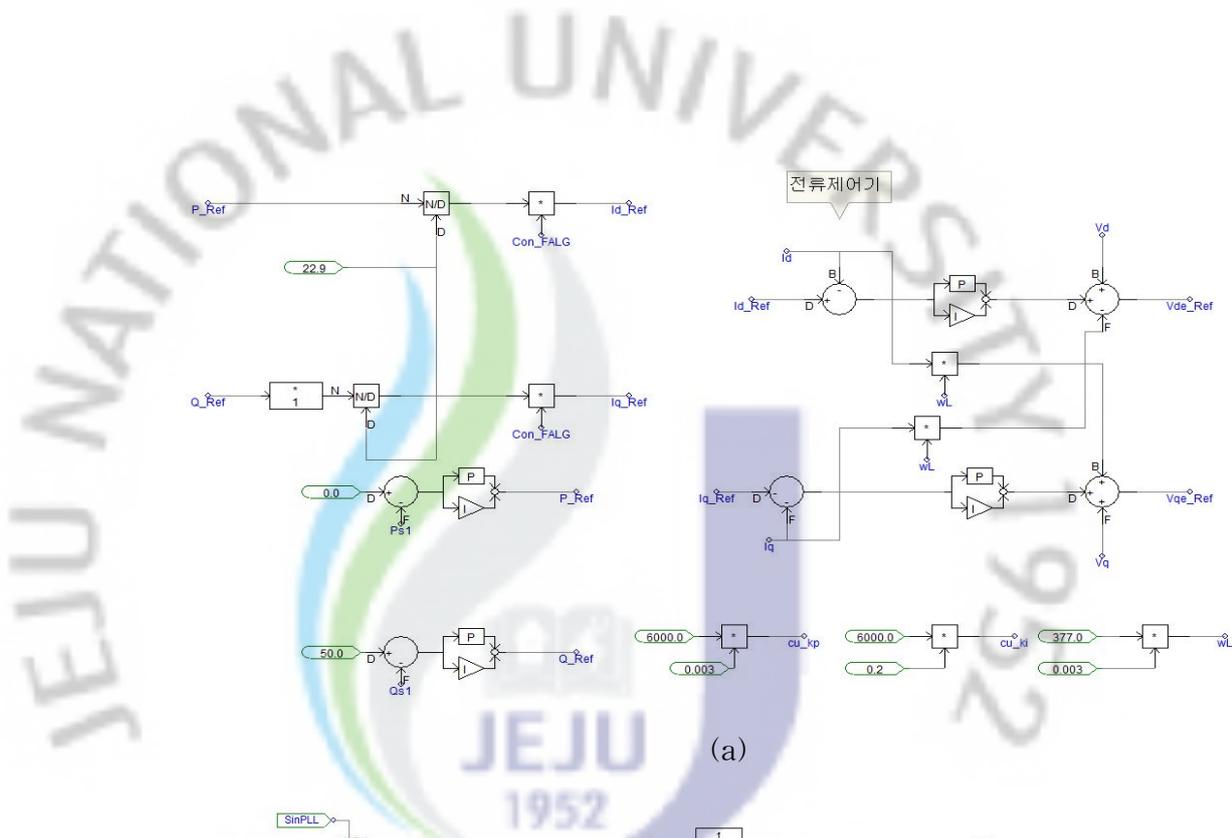
그림 8 d-q 컨버터 모델링

그림 8은 d-q변환부를 모델링한 그림이다. 3상 전압이 PSCAD/EMTDC 프로그램의 ABC to AlphaBeta 라이브러리를 거쳐서 동기좌표계 Vds와 Vqs로 변환되어 나온 2상을 dqs 2 dqe 라이브러리를 통과할 때, PLL 제어기에서 발생한 SinPLL과 NcosPLL을 이용하여 동기좌표계 Vde, Vqe를 가진 직류 성분으로 변환되어 나온다.

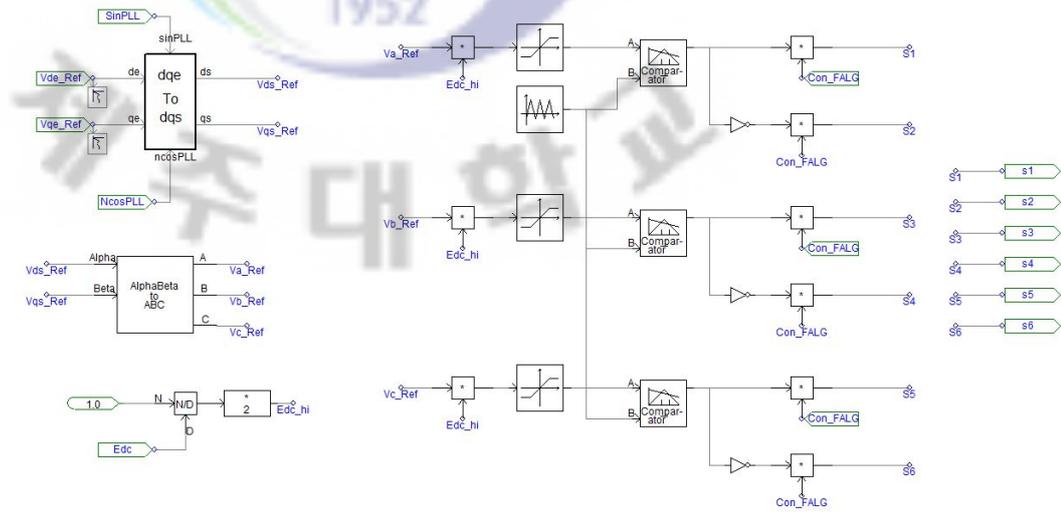
전류측도 전압 d-q변환과 같은 방법으로 직류성분을 가진 Ide, Iqe 값으로 변환된다. 직류 성분을 가진 전압, 전류를 유효·무효 성분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{dq} = V_{de} \times I_{de} + V_{qe} \times I_{qe} \quad (17)$$

$$Q_{dq} = V_{de} \times I_{de} - V_{qe} \times I_{qe} \quad (18)$$



(a)



(b)

그림 9 PWM 발생부 모델링

그림 9는 PWM 발생부를 모델링한 그림이다. d-q변환부에서 변환된 직류성분과 계통 및 HVDC에서 나오는 무효전력을 실시간으로 검출한 값을 (a)에 구성된 제어기를 거쳐 (b)에 나타난 dqe to dqs와 AlphaBeta to ABC라이브러리를 거쳐 나온 V_{a_ref} , V_{b_ref} , V_{c_ref} 의 3상 전압 기준값과 삼각파를 비교기를 통과하여 각각의 IGBT Gate에 스위칭 신호로 변환되어 보낸다.

3. 제주계통 모의실험

3.1 제주계통 모델링

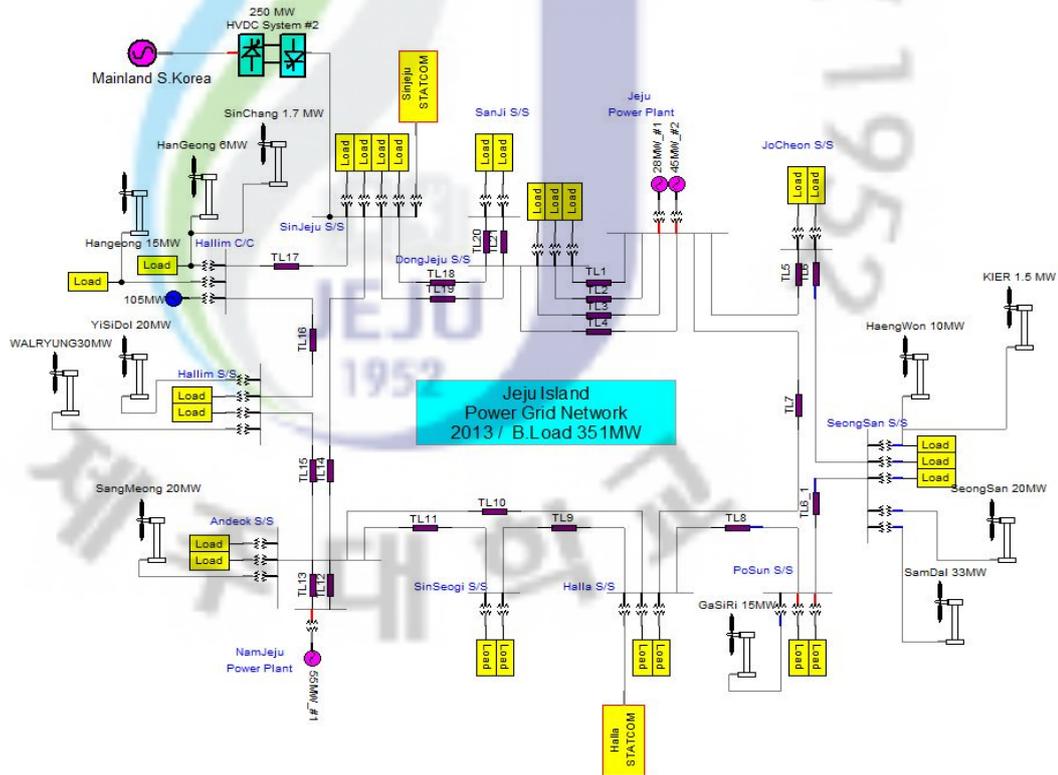


그림 10 제주계통 모델링

그림 10은 2013년 제주지역 계통도이다. 제주도는 도서지역이면서도, 제주화력의 기력발전과 내연발전, 남제주발전소의 내연과 기력발전, 한림발전소의 복합발전 그리고 육지 계통과 연계된 직류고압 송전 시스템HVDC, 뿐만 아니라 풍력발전, 태양광발전 등 다양한 종류의 발전원을 가지고 있다.

표 1은 2013년 제주도 발전운영계획표이다. 표 1의 10월 기저부하 351MW를 기준으로 제주화력의 기력발전 45MW, 내연발전 28MW, 남제주발전소의 기력발전 55MW, 그리고 육상풍력 약 172MW, 전압형 STATCOM 50Mvar 2기, 전류형 송전 시스템 HVDC 250MW를 모델링 하였다.

표 1 2013 제주계통 전력 수급계획

발전기	공급능력 (MW)	누계	1월(겨울)			5월(봄)		
			최저	평균	최대	최저	평균	최대
계통수요			450	542	631	369	444	518
풍력 120~250			120	120	120	120	120	120
연계선#2	200	450	124	200	200	100	145	200
제주내연#1	40	490	28	38	38	28	28	38
제주내연#2	40	530	DSS	DSS	38	DSS	28	35
남제주내연#1	18	548	18	18	18	폐지	폐지	폐지
남제주내연#2	17	565	17	17	17	폐지	폐지	폐지
남제주기력#3	100	665	55	55	66	55	55	55
남제주기력#4	100	765	55	55	65	정지	정지	정지
제주기력#2	79	844	45	45	45	45	45	45
제주기력#3	79	923	정지	정지	정지	정지	정지	정지
한림복합	90	1013						
예상부하용량			462	548	607	348	421	493
발전기	공급능력 (MW)	누계	8월(여름)			10월(가을)		
			최저	평균	최대	최저	평균	최대
계통수요			396	565	703	351	451	538
풍력 120~250			120	120	120	250	250	250
연계선#2	200	450	72	200	200	50	50	75
제주내연#1	40	490	28	28	38	28	28	38
제주내연#2	40	530	DSS	28	38	정지	정지	정지
남제주내연#1	18	548	폐지	폐지	폐지	폐지	폐지	폐지
남제주내연#2	17	565	폐지	폐지	폐지	폐지	폐지	폐지
남제주기력#3	100	665	55	55	80	55	55	91
남제주기력#4	100	765	55	55	79	정지	정지	정지
제주기력#2	79	844	45	45	45	45	45	45
제주기력#3	79	923	정지	정지	정지	정지	정지	정지
한림복합	90	1013			41			
예상부하용량			375	531	641	428	428	499

3.1.1 발전소 모델링

계통규모가 작은 제주지역은 출력이 불규칙한 풍력발전기의 확대 시 계통주파수 및 전압변동에 영향을 줄 수 있다.

전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 제 4장 발전설비 신뢰도 규정 제23조 (발전기의 무효전력 출력)를 보면,

- ① 전력시장에서 참여하는 발전기는 정격출력(MW) 기준으로 지상역률 0.9에서 진상역률 0.95 범위에 해당하는 무효전력을 정격출력 범위 내에서 공급할 수 있는 성능을 갖추어야 한다.
- ② 발전기의 성능이 제1항의 성능을 유지하지 못할 경우 지식경제부장관은 전기위원회 소속공무원의 현장 확인을 통하여 예외를 인정할 수 있다.
- ③ 발전기의 무효전력 출력은 전력거래소에 등록된 발전기별 특성범위 내에서 운영할 수 있어야 한다.

①의 규정을 보면 지상역률 0.9에서 진상역률 0.95 범위 해당하는 무효전력을 공급해야하기 때문에 발전소는 유효전력과 무효전력을 일정비율로 내야한다[9].

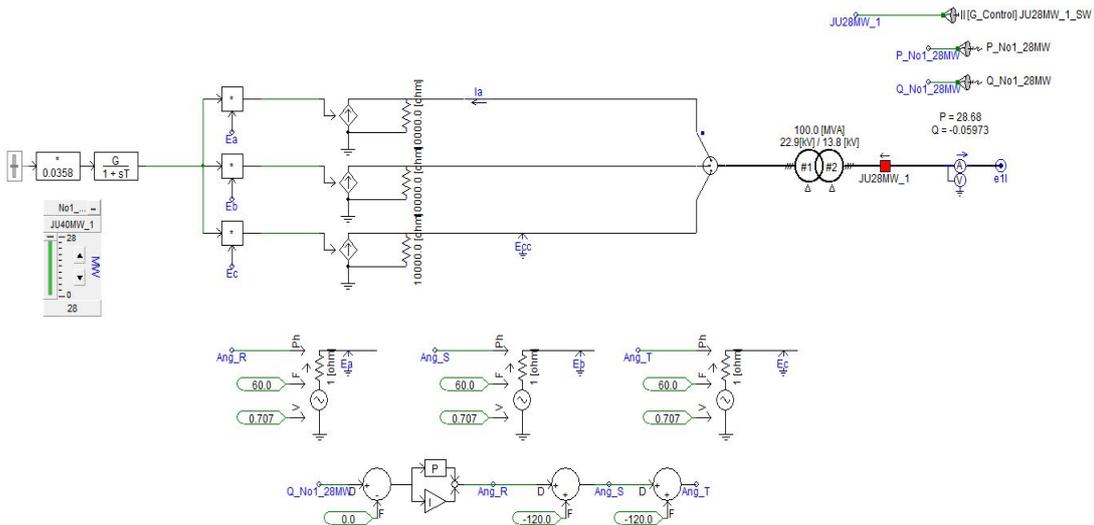


그림 11 발전소 모델링

그림 11은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 제주도 발전소를 모델링을 하였다. PSCAD/EMTDC 프로그램에서 제공하는 전류원 라이브러리를 사용하여 각 발전소별 정격출력을 만들고 무효전력의 출력은 계통상황에 따라 다르지만 본 논문에서는 유효전력의 약 13%를 기준으로 내야 하므로 제주내연 1호기는 유효전력 28MW, 무효전력 4MW, 제주기력 2호기는 유효전력 45MW, 무효전력 6MW, 남제주기력 3호기는 유효전력 55MW, 무효전력 7MW를 보낼 수 있게 모델링 하였다.

3.1.2 풍력 발전단지 모델링

제주도의 풍력 발전단지는 크게 동부와 서부지역으로 나눌 수 있는데, 먼저 한림변소가 위치한 서부지역은 제주 154kV 환상망 계통에서 제주 서부지역 부하를 담당한다고 볼 수 있다. 154kV/23kV 변압기 2대에 연계된 부하선로는 22.9kV 정격전압을 갖는 애월 등 6개 DL에 연계되어 있다. 또한, 공장 17.3km의 한경풍력 전용선로 2회선을 통해 각각 한경1단계, 한경2단계 풍력단지가 접속되어 있다.

추가로 들어설 이시돌, 월령지역 풍력 발전단지는 한림변전소에 접속되었고, 상명풍력 발전단지는 안덕변전소에 접속하여 구성하였다. 다음으로 성산 변전소가 위치한 동부지역은 제주계통에서 말단 부하에 속한다고 볼 수 있다. 여기에 연계된 송전 선로는 154kV 정격전압을 갖는 3곳에서 연계되어 있다. 천 번째는 공장 33.1km를 갖는 북성 TL, 공장 24km를 갖는 조천·성산 TL, 공장 46.46km를 갖는 한성 TL이 연계되어 있다. 이들 송전선로와 그 부속설비를 PSCAD/EMTDC로 모델링하는 것은 이 프로그램에서 제공하고 있는 송전선 라이브러리를 이용하는데 그 중에서도 시퀀스 컴포넌트 방법을 이용하였고, 한경풍력, KIER, 성산풍력, 삼달풍력이 접속하여 있고, 가시풍력은 앞으로 들어설 표선변전소에 접속하였다.

현재 제주에 설치되어 있는 풍력발전기는 주로 프로토 타입의 수평축 3 Blade

형식이다. 대부분 외국산으로 덴마크의 VESTAS사 제품으로 구성되었다. 또한 시스템의 용량들은 225kW에서부터 3MW까지 다양한 형태로 되어 있다. 이러한 형태를 전부 실제 데이터를 가지고 모델링하는 것은 어렵다. 그리고 제주계통 측면에서 보면 1개의 풍력발전 시스템 출력이 나오는 것이 아니라 여러 시스템의 출력이 하나로 모여져서 단지 출력으로 계통에 공급되기 때문에 제주 전 계통을 모델링하여 여러 가지의 과도 특성이나 정상상태 특성을 해석하는 경우에는 모든 시스템을 가지고 해석하는 것 보다는 대표적인 시스템을 하나 선정하여 풍력발전 시스템을 모델링하고 이를 이용하여 단지를 모델링하는 것이 효과적으로 볼 수 있다[10].

본 논문에서는 행원풍력과 한경1단계 풍력은 콘덴서 보상을 통한 유도발전기로 운전되고, 나머지 풍력발전단지는 PSCAD/EMTDC 프로그램에서 제공하고 있는 전류원 라이브러리를 이용하여 출력역률이 1이 되도록 PI 제어를 수행하고 또한 가변풍속에 대응하는 유효 출력이 발생하도록 DFIG 시스템으로 구성하였다.

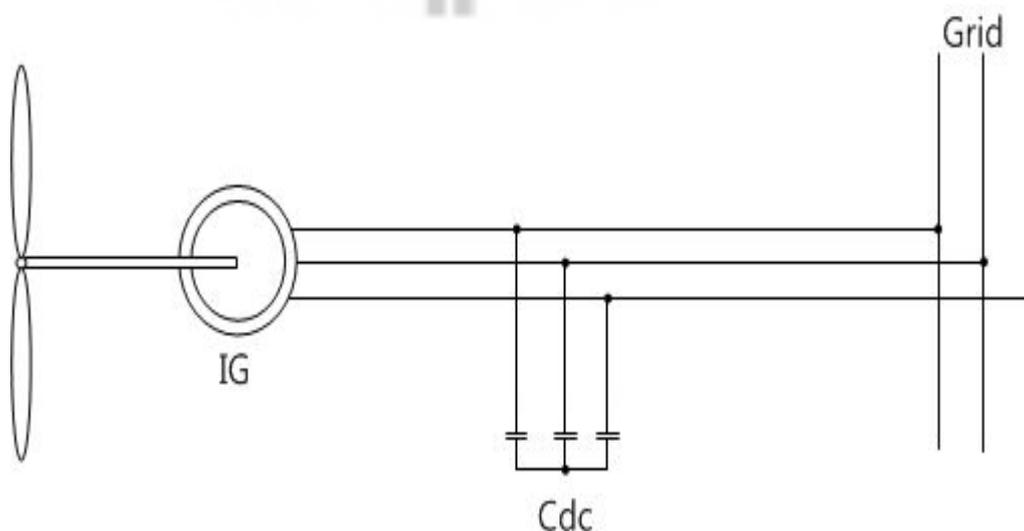


그림 12 역률개선용 콘덴서를 채용한 유도발전기

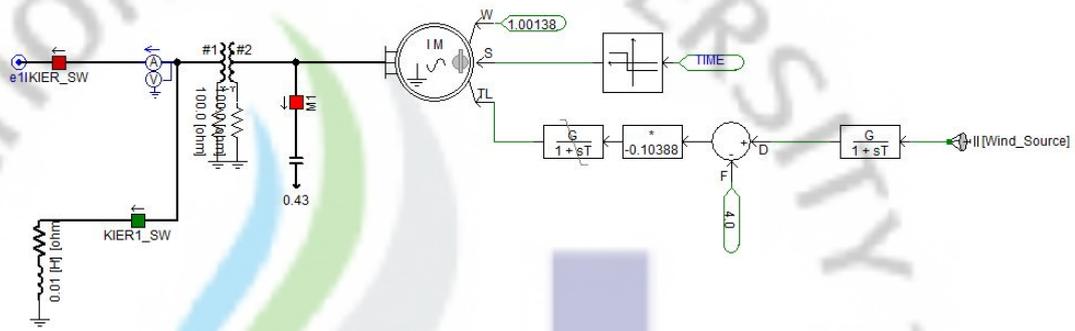


그림 13 농형 유도발전기 모델링

그림 12는 역률개선용 콘덴서를 채용한 유도발전기를 사용한 풍력발전시스템이다. 농형 유도 발전기는 회전자에 브러쉬가 없어 구조가 간단하고 견고하며 가격도 저렴하다. 반면에 회전자에 슬립링을 갖지 않아 외부전원에 의해 여자 시킬 수 없고, 출력을 제어 할 수가 없다. 그러므로 여자전류를 계통에서 공급 받아야 하기 때문에 고정자에 병렬로 여자용 캐패시터를 부착하여 운전해야 한다. 이때 부하, 회전속도, 캐패시터의 용량 및 여자 회로의 특성에 따라 출력 전압과 주파수가 변동하여 안정된 전압을 얻을 수 없다는 취약점을 가진다. 이 발전기는 발전기의 회전자 속도를 제어하는 것이 불가능하다. 단, 출력에 따라서 발전기의 슬립을 0에서 0.03, 최대 0.08 까지 스스로 변동되며, 운전속도는 정격의 100~108% 범위 내에서 운전된다. 또한 발전기의 역률을 제어할 수 없기 때문에 발전기에서 발생한 유도성 무효전력이 계통에 영향을 준다[10].

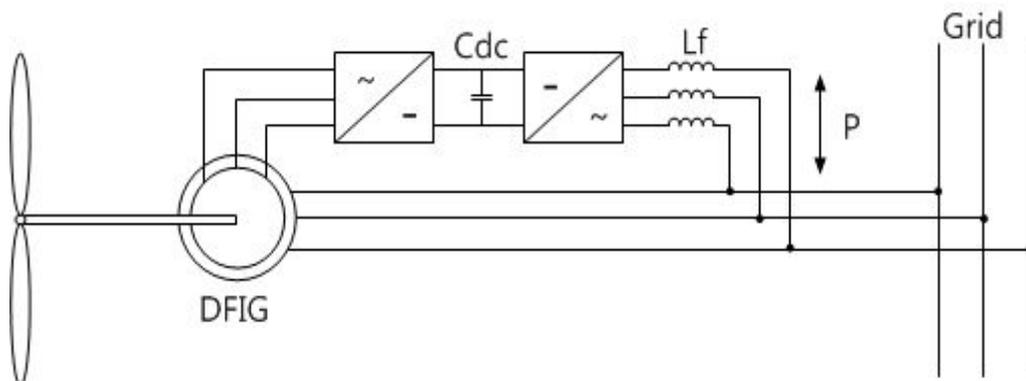


그림 14 이중 여자 유도발전기를 사용한 계통연계 풍력발전

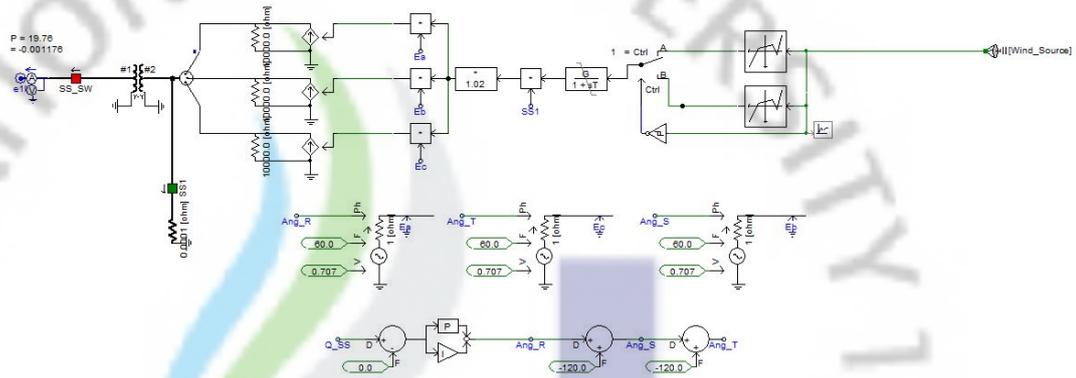


그림 15 이중 여자 유도발전기 모델링

그림 14는 이중 여자 유도 발전기를 사용한 계통연계 풍력 발전 시스템이다. 주로 계통과 연계되는 중대형 용량의 풍력발전 시스템에서 사용되며, 농형에 비하여 구조가 복잡하고 비싸다는 단점이 있지만, 슬립링에 의한 회전자 축의 슬립 전력을 제어하여 역률을 항상 1로 할 수 있다는 큰 장점을 가진다.

DFIG는 발전기의 1차 축(고정자축)을 주로 계통에 직접 연결하는 시스템을 사용한다. 1차 축을 통하여 발전된 전력을 계통에 공급하지만, 1차 축 출력보다 큰 토크가 회전자축으로 입력되면 발전기의 운전 속도가 증가하고 평소에는 농형과 유사하게 동작하지만 여분의 전력이 있을 때는 2차 축에 설치된 인버터-컨버터를 사용하여 회전자 전력을 제어 하는 시스템이다.

인버터-컨버터를 사용하였지만, 2차 축에 설치하였기 때문에 인버터-컨버터 설계 용량이 정격 출력의 25~30%정도이며 작은 만큼 가격과 부피가 줄어들고, 인버터-컨버터에서 소비되는 손실이 줄어들어 시스템의 전체적인 효율이 개선된다. 또한, 인버터에 설치하는 고조파 제거용 필터 설계용량도 인버터의 용량에 비례하여 감소하며, 2차 축을 제어하여 1차 축의 출력과 운전속도, 그리고 역률을 제어 할 수 있고 1차 축으로 추출할 수 없는 여분의 전력을 2차 축으로 추출할 수 있어서 시스템의 효율을 높일 수 있다. 하지만 2차 축을 제어하기 위해서 3상을 2상으로 변환하는 d-q변환을 사용하기 때문에 제어 알고리즘이 복잡해진다[11].

3.1.3 HVDC 모델링

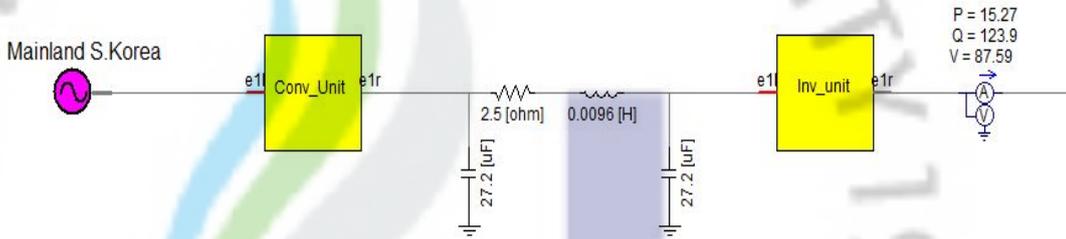


그림 16 전류형 HVDC 모델링

그림 16은 육지계통과 제주계통의 다리역할을 하는 전류형 HVDC 250MW를 모델링 한 그림이다. HVDC는 초고압 직류송전으로서 발전소에서 생산되는 교류 전력을 공급하는 방식이다. 이러한 송전방식은 기존 교류 송전기술의 장점인 전압 승압을 통한 효율적이며 경제적인 전력전송을 가능하게 한다.

HVDC의 구성요소를 살펴보면 다음과 같다.

① 교류 차단기

HVDC 시스템이 고장이거나 변압기 고장 일 경우 동작하여 계통을 보호하는데 사용된다.

② 고조파 필터 및 무효전력 공급치

컨버터는 직류 측과 교류측 양쪽의 전압과 전류의 고조파를 발생시키는데, 이러한 고조파 성분을 제거하는 역할을 하고 캐패시터 뱅크는 무효전력 공급을 설치하여 전력변환 시 필요한 무효전력을 공급한다.

③ 컨버터 변압기

교류 계통의 전압을 변환하여 전력 변환설비에 공급하며 직류 계통을 분리하는 역할을 한다.

④ 사이리스터 컨버터

AC/DC와 DC/DC 변환을 수행하는 역할을 하며 밸브 브리지와 탭 전환기가 있는 변압기로 구성되어 있다.

⑤ 평활 리액터

컨버터에서 정류되어 직류 선로로 공급되는 전압과 전류의 고조파를 줄이며 인버터의 정류 실패 시 컨버터로 유입되는 전류를 제한하여 컨버터 밸브를 보호하는 역할을 한다[12][13].

3.2 결과 및 고찰

2013년 10월 기저부하 351MW를 기준으로 한 제주계통의 해석을 위하여 육상 풍력 172MW, 발전소 정·출력 128MW, 제2연계선 전류형 HVDC 250MW, 50Mvar 용량의 전압형 STATCOM 2기를 모델링하여 서론에 기술한 바와 같이, 가변풍속의 조건으로 풍력발전을 운전하고 신제주 STATCOM은 HVDC에서 계통으로 나오는 전압을 검출하여 154kV의 기준전압과의 오차를 통한 계통의 전압을 안정화하며, 한라 STATCOM은 20Mvar의 무효전력을 항상 일정하게 발생하도록 하여 계통에 필요한 무효전력을 공급하도록 한다. 먼저, 가변풍속 조건하에 STATCOM 설치 전·후의 계통을 비교 분석하고, 전체풍력에서 10초 후 동부지역 풍력탈락 시, 제주 기력 2호기 10초 후 탈락 시 조건일 때 계통의 전압, 주파수, 유효전력, 무효전력 및 발전소와 풍력발전단지 유효전력 및 무효전력의 변화를 분석하고 고찰하도록 하겠다.

현재 제주계통에서 발생하는 무효전력을 보면, 부하역률은 항상 0.99로 유지되어 있으므로 하나의 부하설비 1상당 4.5MW의 유효전력과 0.015Mvar의 무효전력이 소비되므로 26개의 부하설비를 기준으로 보면, 유효전력은 351MW, 무효전력은 1.17Mvar이 소비되고 있고, 선로와 각 변압기에서 발생하는 무효전력은 약 29Mvar 정도가 나오므로 제주계통에서 약 30Mvar의 무효전력이 발생하고 있다.

제주내연 1호기에서 28MW의 유효전력과 정격에 약13%에 해당하는 4Mvar의 무효전력이 발전되고, 남제주기력 3호기에서 55MW의 유효전력과 6Mvar의 무효전력이 발전하며 제주기력 2호기에서 45MW의 유효전력과 7Mvar의 무효전력이 발전되며, 제주발전소에서 발생하는 무효전력은 총 17Mvar가 발생한다. 발전소에서 발생하는 무효전력 이외에 부족한 무효전력을 보상하도록 하는데 현재 성산변전소에 5Mvar의 전력용 콘덴서 3기가 22.9kV선로에 직렬로 설치되어 있지만 본 논문에서는 전력용 콘덴서를 제거하여 해석을 하도록 하겠다. 왜냐하면 전압강하 또는 주파수 하락 시 진상 역률이 되어 이를 보상하기 위해서 별도의 리액터가 필요로 하고 추가 비용도 많이 들고 계통의 전력품질도 떨어지므로 전력용 콘덴서의 무효전력 보상을 STATCOM에서 하도록 하여 한라 S/S에 설치될 STATCOM이 항상 20Mvar의 무효전력을 정·출력으로 발생하여 제주계통의 무효전력을 보상하도록 한다. 모든 모의실험은 HVDC의 초기 기동상태인 약 5초 이후의 파형을 기준이다.

3.2.1 STATCOM 설치 유·무에 따른 계통 해석

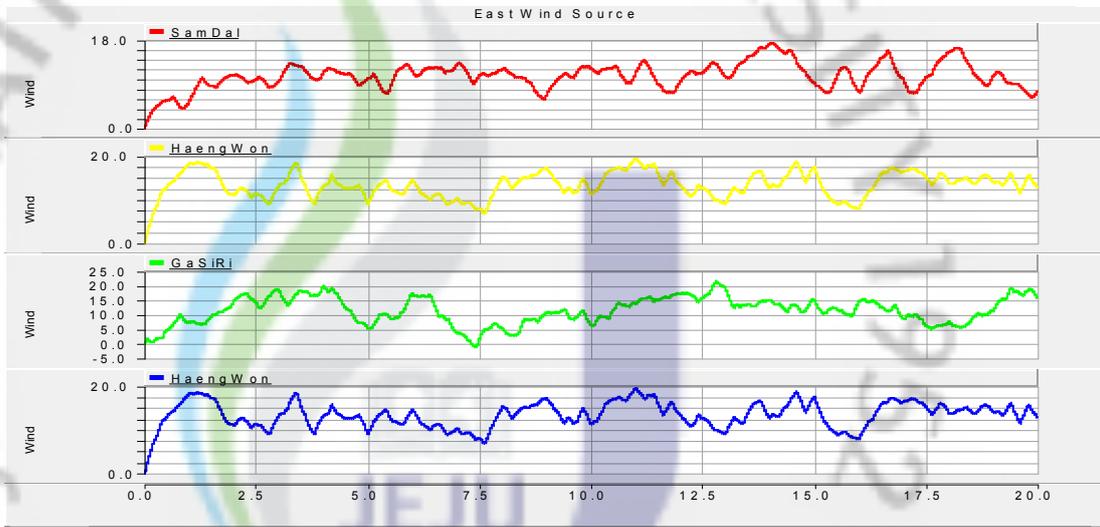


그림 19 동부지역 바람자원

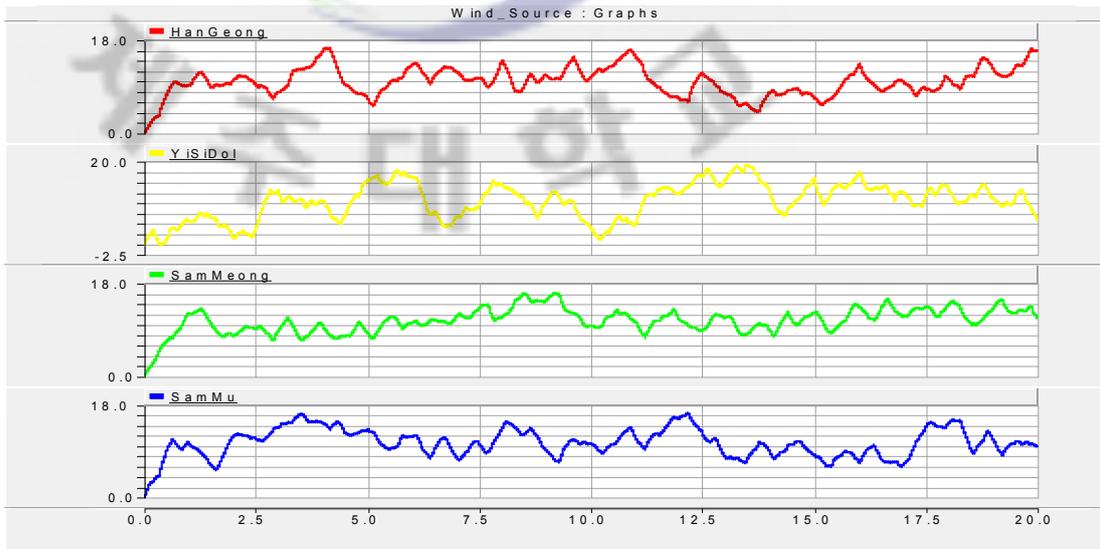


그림 18 서부지역 바람자원

그림 17과 18은 각각 동부지역과 서부지역의 실제 각 풍력발전 단지에 적용할 가변풍속을 나타낸 것이다. 이러한 가변풍속을 기준으로 전력품질을 해석하고자 한다.

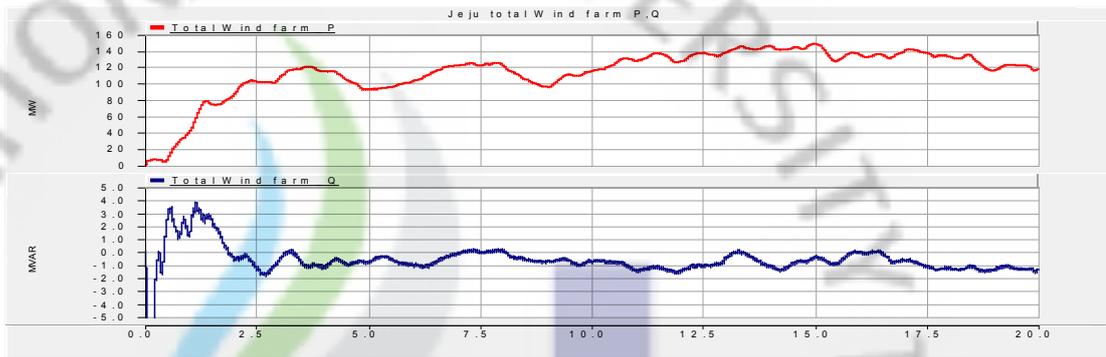


그림 19 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력

그림 19는 그림 17과 18의 가변풍속 조건을 적용하였을 경우 제주도 전체 풍력발전단지의 유효전력 및 무효전력을 나타낸 것이다.

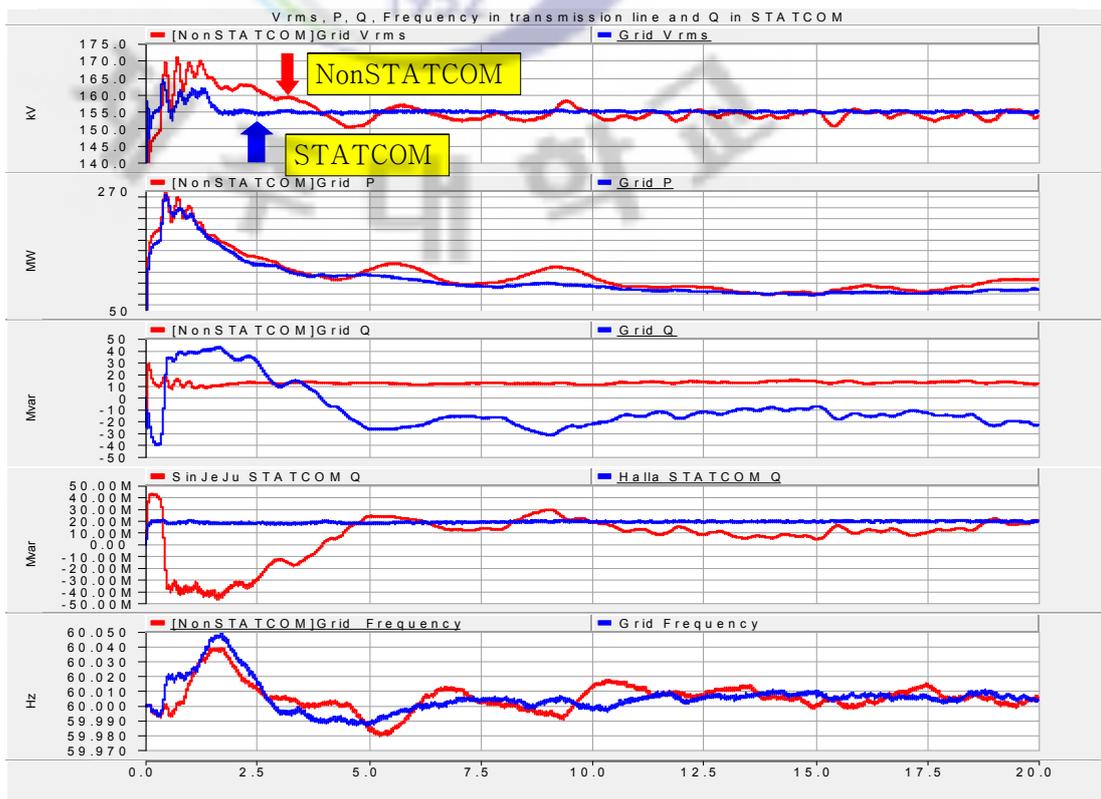


그림 20 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM에서 발생하는 무효전력

그림 20은 STATCOM의 유·무에 따른 HVDC와 연계된 154kV 모선에 대한 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM에서 나오는 무효전력을 나타낸 그래프이다. 먼저 전압을 비교해 보면, STATCOM을 설치한 경우의 전압을 154kV를 기준으로 거의 흔들림 없이 수렴하고 있으며, 그렇지 않은 경우는 가변 풍속에 따른 전압 변동이 심하다는 것을 알 수 있었고, 유효전력의 경우 STATCOM을 설치했을 때 가변풍력에 대한 흔들림 없이 계통에 필요한 전력을 보내주지만 설치하지 않았을 경우는 가변풍력에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. 또한, STATCOM 설치 시 초기 과도상태를 제외하면 신제주 변전소의 STATCOM이 HVDC에서 계통으로 흐르는 전압을 검출하여 필요한 무효전력을 보상, 또는 흡수하고 있으며, STATCOM을 설치하지 않았을 때는 계통으로 무효전력을 보내주어 전압이 불안정했으며, 한라 변전소의 STATCOM은 항상 20Mvar의 무효전력을 정·출력으로 내보내어 제주계통에서 발생하는 무효전력의 수요를 보상하고 있다. 주파수 또한 STATCOM 설치 후가 60Hz에 더 잘 수렴하는 것을 알 수 있었다.

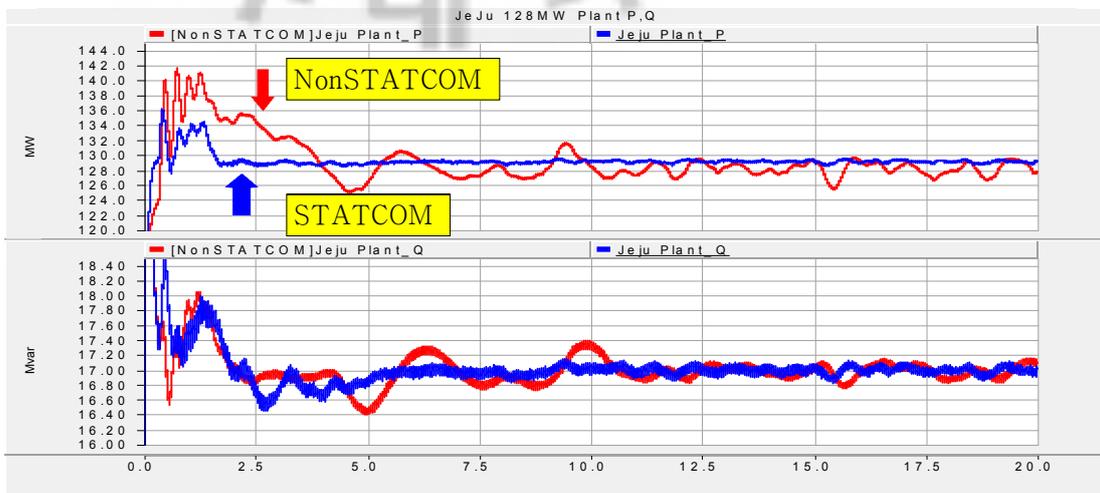


그림 21 발전소의 유효전력 및 무효전력

그림 21은 STATCOM의 설치 유·무에 따른 제주지역 발전소의 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프이며, STATCOM이 있으므로 인해 발전소의 출력이 보다 안정적으로 정·출력 운전을 할 수 있었다. 2013년 10월의 기저부하인

351MW를 기준으로 보면, 발전소는 유효전력의 13%에 해당하는 무효전력을 발생하는데, 제주내연2호기는 28MW의 유효전력과 4MW의 무효전력을 출력하고 남제주기력3호기는 55MW의 유효전력과 7MW의 무효전력을 출력하며, 제주기력2호기는 45MW의 유효전력과 6MW의 무효전력을 발생하여, 3지역의 발전소에서 나오는 유효전력은 약 128MW, 무효전력은 약17MW가 발생한다.

3.2.2 전체풍력발전에서 동부지역 풍력발전 탈락 시 계통 해석

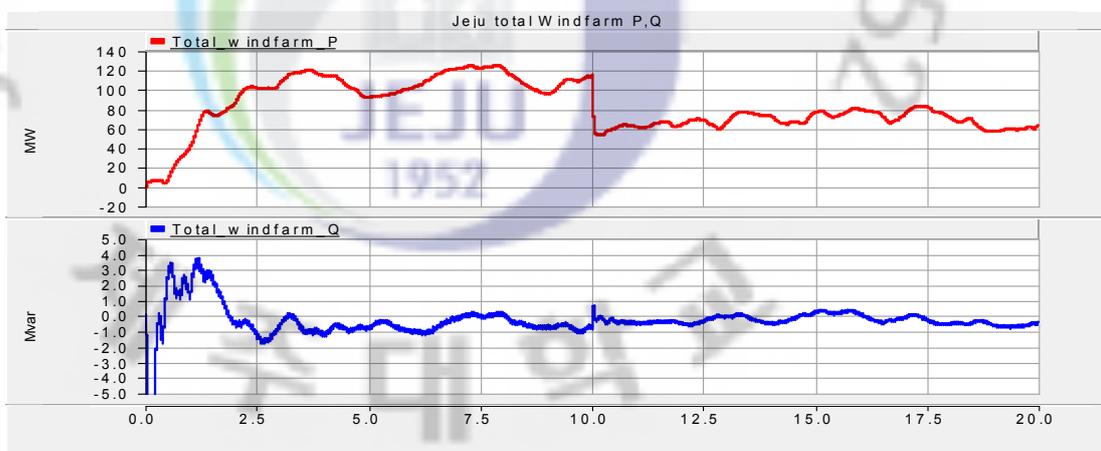


그림 22 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력

그림 22는 동부지역 풍력발전 탈락 시 전체 풍력발전의 유효 및 무효 전력을 나타낸 그림이다. 탈락 시점을 기점으로 제주도 풍력발전단지에서 나오는 유효전력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 제주도 풍력의 대부분이 역률이 1을 갖는 DFIG 시스템이므로 탈락해도 무효전력의 변화는 거의 0을 수렴하였다.

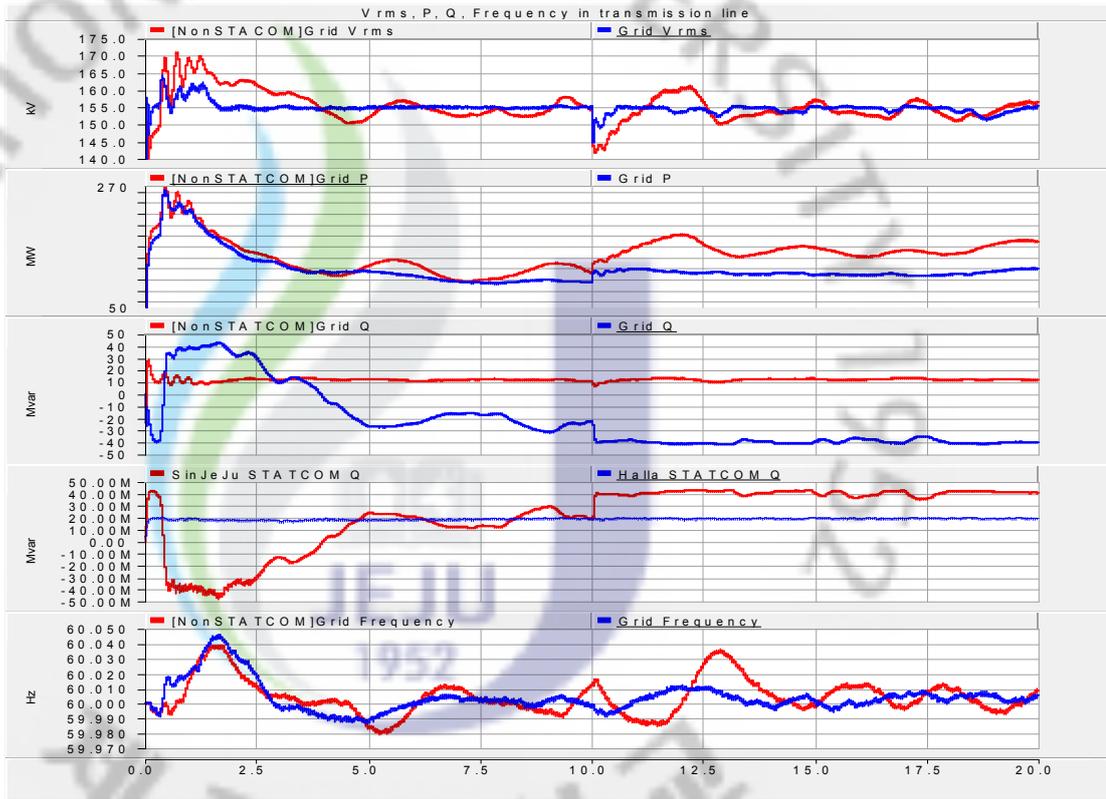


그림 23 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM에서 발생하는 무효전력

그림 23은 동부지역의 KIER 1.5MW, 행원 10MW, 성산 20MW, 삼달 33MW, 가시 15MW, 총 79.5 MW가 시뮬레이션 10초 후 탈락에 따른 계통의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수의 대한 그래프이다.

컴퓨터 해석 10초 후, 동부지역 풍력발전 탈락 시 제주계통의 154kV모선의 전압은 탈락 시간을 기점으로 전압강하 현상이 나타는데, STATCOM 설치의 경우가 탈락 시 전압강하가 조금 일어났으며 정상상태로 보다 더 안정적으로 복귀하였고, 유효전력은 STATCOM을 없을 경우 가변풍속에 많은 영향을 받아 탈락 후에도 안정화가 전력품질의 안정화가 더디었다.

동부지역 풍력발전 탈락 후 손실된 유효전력만큼 HVDC에서 보상해주고 있으며, 풍력발전이 탈락하여도 무효전력은 한라 STATCOM에서 HVDC의 무효전력을 개별제어로 보상해 주고 있고, 주파수 또한 STATCOM의 설치 시 60Hz를 보다 안정적으로 유지하고 있다.

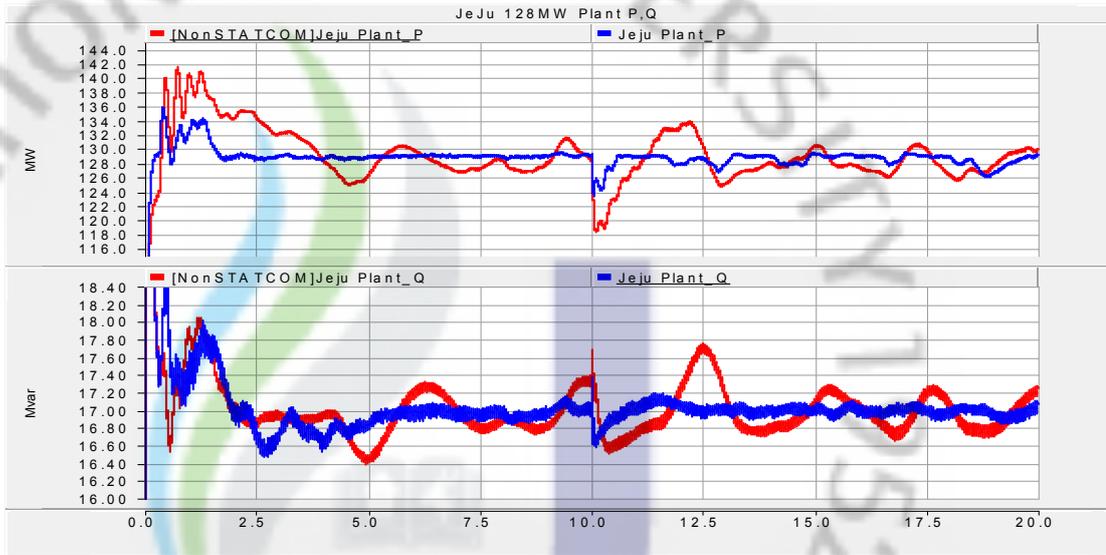


그림 24 발전소의 유효전력 및 무효전력

그림 24는 동부지역 풍력발전 탈락 시 제주도 발전소의 유효 및 무효 전력의 변화를 나타내는 그래프이다. 탈락 후 정상상태의 복귀 및 평상시 전력품질도 STATCOM의 설치 시 보다 안정적이었다.

3.2.3 제주 기력 2호기 탈락 시 계통 해석

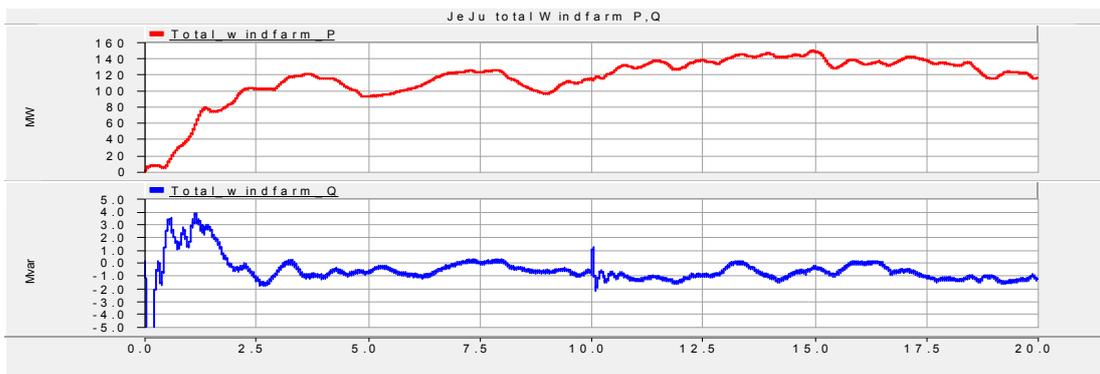


그림 25 풍력발전 단지의 유효전력 및 무효전력

그림 25는 제주기력 2호기 45MW 탈락 시 풍력발전의 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프이다. 발전소 탈락 시 HVDC의 빠른 보상으로 제주도 풍력발전 단지에서 발생하는 유효 및 무효전력의 거의 변동은 없었다.

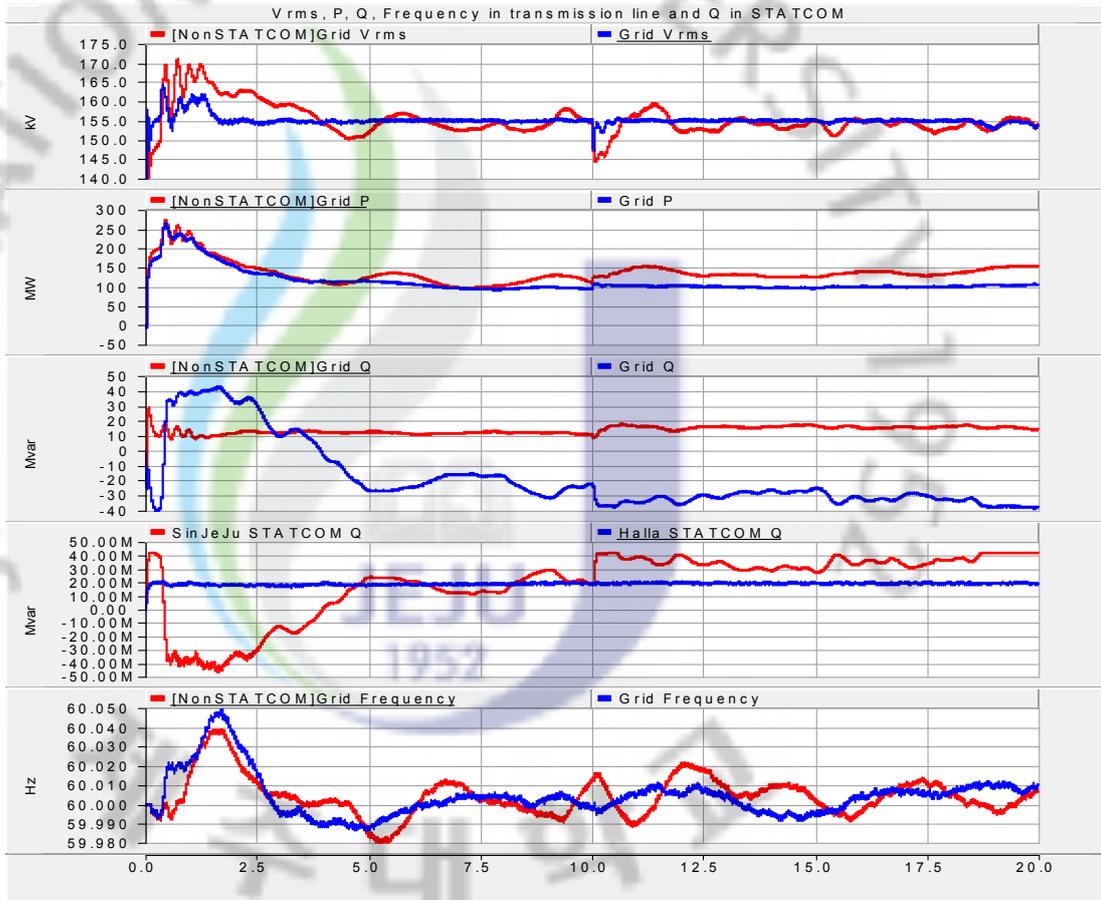


그림 26 계통에서의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 STATCOM에서 발생하는 무효전력

그림 26은 제주기력 2호기 탈락 시 제주계통의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 변동을 나타낸 것으로 탈락시점을 기점으로 STATCOM 설치했을 경우가 그렇지 않은 경우보다 전압강하가 적었으며 정상상태 도달 시 안정적이고 도달시간도 STATCOM이 없는 경우보다 빠른 특성을 보여주고 있다. 유효전력의 경우도 STATCOM이 있음으로써 HVDC에서 기력 2호기의 발생했던 유효 전력만큼 보상하고 거의 흔들림 없이 안정적으로 계통으로 보내고 있으며, HVDC에서 필요한 무효전력을 신제주 STATCOM에서 보상해주어 계통에서 필요한 무효전력은 한라 STATCOM에서 보내주어 안정적으로 무효전력 관리를 하고 있으며, 제주계통의 주파수도 STATCOM이 있을 때 더욱 효율적으로 60Hz를 유지하고 있다.

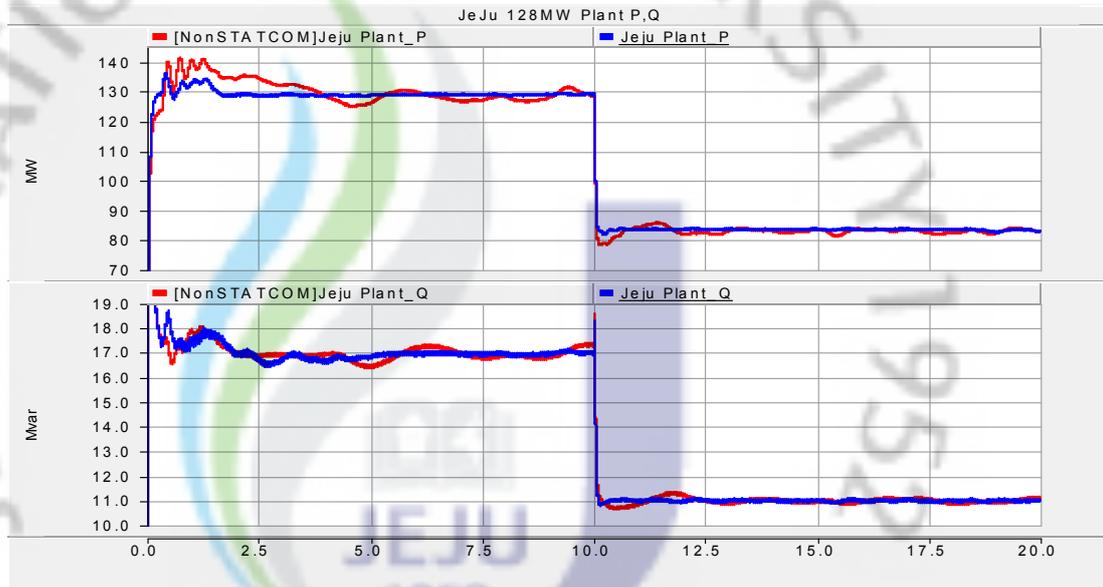


그림 27 발전소의 유효전력 및 무효전력

그림 27은 제주기력 2호기 탈락 시 제주도 발전소의 유효 및 무효전력의 변화를 보여주고 있는데, 제주기력 2호기에서 나오는 45MW의 유효전력과 6MW의 무효전력만큼 하강한 전력의 변화를 나타내고 있으며, STATCOM 설치 시 보다 안정적으로 정·출력 제어를 하고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제주도 신제주 변전소와 한라 변전소에 각각 설치 될 50Mvar 용량의 STATCOM 및 풍력발전단지, 발전소, HVDC, 제주계통을 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하여 실제 제주도 계통을 모델링 하였다.

STATCOM 설치 유·무에 따른 제주계통 비교, 제주도 전체 풍력에서 동부지역 풍력발전 탈락 시 제주계통 해석, 제주기력 2호기 탈락 시 제주계통 해석에 대한 송전선로의 전압, 유효전력, 무효전력, 주파수 및 발전소와 풍력발전단지의 유효전력과 무효전력의 출력 특성을 분석하였다.

먼저 STATCOM의 설치하였을 때, 전체적으로 전압은 가변풍속에 따른 변동이 거의 없이 계통에 필요한 전압을 효율적이고 안정적으로 유지하였고, 반면에 현재 성산변전소의 전력용 콘덴서 5Mvar 3기가 설치되어 있는데 이를 제거한 상태에서, STATCOM 설치 후, 신제주 S/S에 설치 된 STATCOM이 HVDC에서 나오는 전압을 검출하여 제어한 결과, 계통의 무효전력의 관리를 안정적으로 할 수 있었다.

제주도 전체 풍력에서 동부지역 풍력발전 탈락 혹은 발전소 탈락 시 제주계통의 변화를 보았을 때 한라 변전소의 STATCOM이 무효전력만을 독립제어 하였기 때문에 풍력발전이나 발전소가 탈락하여도 일정하게 제주계통의 무효전력 공급하였고, 신제주 변전소의 STATCOM의 HVDC에서 계통으로 나오는 전압을 실시간으로 제어한 결과 가변출력에 동요하지 않고 안정적인 전압상태를 볼 수 있었고, 사고 시에도 전압강하가 적었고 정상상태로의 복귀 및 안정 상태 도달도 매우 안정적이었다.

시뮬레이션 결과에 나타난 그래프에서 보였듯이 신제주변전소에 신축 되어질 STATCOM은 HVDC에서 계통으로 나오는 전압을 제어하는 방식을 채택하고 한라 변전소의 STATCOM은 정출력 운전을 하여 발전소나 풍력발전단지 탈락 등과 같은 탈락 사고 시에도 무효전력을 안정적으로 공급하여 발전원들의 부담을 줄여 제주계통을 보다 안정적으로 전력품질 향상에 기여하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 지식경제부, 신재생 에너지 산업의 현황과 육성전략, 2011.
- [2] 송길영, 전력계통공학, 동일출판사, pp. 343-382, 1998.
- [3] (주)포스콘, 정보통신연구소, 500kVA급 고조파 및 무효전력 보상시스템의 개발, 연구개발보고서, 1997.
- [4] Fang Zheg Peng and Jih-Sheng Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No.1, Feb 1996.
- [5] N. G. Hingorani. L. Gyugyi. Understanding FACTS. IEEE PRESS. 2000.
- [6] 강경보, 이중 컨버터에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 운전특성에 관한 연구, 제주대학교 박사학위 논문, pp. 5~61, 2005.
- [7] IEEE PES Special Publication. Tutorial on Modeling and Analysis of System Transients using Digital Programs, IEEE Working Group 15.08.09 1998.
- [8] IEEE Std. 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Press, 1992
- [9] 지식경제부, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 2009.
- [10] 이춘우, PSCAD/EMTDC에 의한 한경풍력발전단지의 모델링과 해석, 제주대학교 석사학위 논문, pp.3~18, 2009.
- [11] 한영성, 정정주, 박정수, 여상민, 송지영, 서인영, 효성중공업연구소 전력전자팀, 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부, 제주50MVA STATCOM 설치 효과 분석, 2010.
- [12] 김찬기, 장길수, 임성주, 추진부, HVDC와 전력전자, 생능출판사, pp.14-146, 2006.
- [13] A.M. Gole and R.W. Menzies, "Analysis of Certain Aspects of Forced Commutated HVDC Inverters," IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, NO.5, May 1981.

감사의 글

열정과 자부심을 갖고 처음 연구실에 들어왔을 때가 엇그제 같은데 벌써 논문을 쓰고 이렇게 떠나려고 하니 눈물이 앞을 가립니다. 전력전자 연구실에 있으면서 모자란 저를 항상 뒤에서 지켜봐주시고 밀어주시던 김일환 지도교수님! 정말 감사하고 감사할 따름입니다. 이 은혜 평생 잊지 않겠습니다.

대학원 생활에 있어서 항상 많은 격려와 지도 아끼지 않으셨던 좌종근 교수님을 비롯하여 오성보 교수님, 김세호 교수님, 논문 구석구석 세세하게 검토하시고 심사하여 주신 이개명 교수님, 김호찬 교수님께 항상 감사드립니다.

그리고, 항상 과를 위해 고생하시는 이진재, 이길연 조교 선생님, 항상 힘이 되어준 대학원 동기 강형규, 김대현에게도 항상 감사하고 고맙습니다.

또한 계통연구실 고영준, 김형택 선배님, 명호산, 김봉언 후배님, 재료연구실 최태영 선배님, 김진 후배님, 계측 연구실에 부창진 선배님, 양수형 후배님, 그리고 일일이 적지 못했지만 대학원 선·후배님들께도 감사드립니다.

연구실에서 오랜 시간 도와주신 김재홍 선배님, 전력전자 연구실의 미래인 우리 변익수, 강명석, 진경민 김동완, 왓나우딩 후배님들과의 추억은 영원히 잊지 않겠습니다. 그리고, 항상 뒷바라지 해주시느라 고생하시는 아버지, 어머니, 형, 형수님, 우리 귀여운 조카 서연이에게도 항상 고맙고 감사합니다. 또, 지난 6년동안 항상 옆에 있었준 나의 반쪽 강혜소에게 본 학위 논문 출간의 기쁨을 누리고 싶습니다. 그리고 일일이 다 적지 못하지만 우리 친구들과 마지막으로 지금은 밤하늘에 별이 되어버린 친구이자 동료였던 양민호에게 이 논문을 바칩니다.

2010년 6월

안 진 흥 드림