



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

가파도 계통의 분산형 전원설비
개선 방안 연구

濟州大學校 大學院

風力特性化協同課程

金 東 完

2014 年 8 月



가파도 계통의 분산형 전원설비 개선 방안 연구

指導教授 金 鎬 民

金 東 完

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 8 月

金東完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

2014 年 8 月

A Study on the Improvement Scheme of
Distributed Generation Facilities
in Gapado Island Power Grid

Dong-Wan Kim
(Supervised by professor Ho Min Kim)

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

GRADUATE SCHOOL OF SPECIALIZED WIND ENERGY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2014. 8.

- i -

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 가파도 분산전원 계통	2
2.1 분산형 전원설비의 종류	2
2.2 가파도 분산형 전원설비 구성	4
2.3 분산형 전원의 계통연계기준	5
III. 가파도 계통 모델링 및 제어	7
3.1 계통 모델링	7
3.2 분산전원 시스템 제어이론	19
3.3 모델 계통의 컴퓨터해석	23
3.4 결과 및 고찰	30
IV. 결 론	32
참 고 문 헌	34
감사의 글	36

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The power grid in Gapado Island	5
Fig. 2 PSCAD/EMTDC model of the power grid in Gapado Island	7
Fig. 3 Simulation model of SCIG system	8
Fig. 4 The schematic diagram of squirrel cage induction generator model	9
Fig. 5 Circuit diagram of soft starter	9
Fig. 6 Voltage & current of SCIG system under transient states	10
Fig. 7 Simulation model of PMSG system	11
Fig. 8 The schematic diagram of permanent magnet synchronous generator model	11
Fig. 9 Circuit diagram of back-to-back system	11
Fig. 10 Generator side voltage & current	12
Fig. 11 Grid side voltage & current	12
Fig. 12 Simulation model of PV system as current source	13
Fig. 13 The schematic diagram of battery model	14
Fig. 14 The discharge curve of modelled Li-Ion battery	15
Fig. 15 The schematic diagram of BESS power conversion system	16
Fig. 16 The schematic diagram of STATCOM connected to SCIG	17
Fig. 17 Simulation model of Diesel Generator	17
Fig. 18 The variable wind velocity data	23
Fig. 19 Active & reactive power of the power grid in Gapado Island	24
Fig. 20 Load voltage, frequency & THD of the power grid in Gapado Island	25
Fig. 21 Active & reactive power of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island	26
Fig. 22 Load voltage, Frequency & THD of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island	27
Fig. 23 Active & reactive power of the power grid connect to PMSGs in Gapado Island	28
Fig. 24 Load voltage, Frequency & THD of the power grid connect to PMSGs in Gapado Island	29

LIST OF TABLES

Table 1	Limited range of synchronization parameters for grid-connected	6
Table 2	Parameter of the electricity generation in Gapado Island	18
Table 3	The power quality of the power grid in Gapado Island	30
Table 4	The power quality of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island	30
Table 5	The power quality of the power grid connect to PMSGs in Gapado Island	31

SUMMARY

This paper attempts to present the improvement scheme of distributed generation facilities in the Gapado Island power system. Composing the power facilities which consider the grid code for renewable energy and analyzing effects on power system, the results would suggest the most suitable composition of power facilities in the Gapado Island.

In the simulation, wind turbine systems and photovoltaic systems are controlled by PQ control methods while battery electrical energy storage system and diesel generator are controlled by CVCF control methods.

To estimate the effectiveness of suggested scheme, three ways of simulation have been carried out by using PSCAD/EMTDC simulation program.

- 1) SCIGs connected to the Gapado Island power grid under islanding mode
- 2) SCIGs and STATCOM connected to the Gapado Island power grid under islanding mode
- 3) PMSGs connected to the Gapado Island power grid under islanding mode

Both installing reactive power compensation STATCOM to SCIGs and installing PMSGs instead of SCIGs can offer method to improve power quality.

These studies will be useful to design the composition scheme of distributed generation facilities in the isolated power generation area.

I. 서 론

전 세계적으로 기후변화 대응과 에너지효율 향상의 필요성을 느끼면서 풍력과 태양광 같은 친환경적인 신재생에너지 활용이 높아지고 있다. 국내의 경우 「저탄소녹색성장기본법」에 따라 2020년까지 온실가스배출을 30% 감축을 목표로 2012년부터 시행하고 있으며, 다양한 온실가스배출 절감 정책을 시행해 갈 예정이다. 그리고 2014년 1월에 발표된 2차 「에너지기본계획」에 따르면 2035년까지 신재생에너지 보급률 11% 달성을 목표로 두고 있다 [1]. 우리나라는 이러한 법률에 따라 도서지역에 신재생발전설비를 이용하여 전 부하에 전력을 공급하는 저탄소 녹색섬 조성계획이 논의 되고 있다.

이러한 추세에 부응하여 제주특별자치도에서는 2013년부터 가파도에 풍력발전설비, 태양광발전설비, 배터리 에너지저장장치 등과 기존의 디젤발전기를 보조전원으로 이용하는 ‘탄소 없는 섬’ 구축을 완료하여 현재 운용되고 있다. 그러나 가파도에 설치되어 운용되고 있는 두 개의 250 kW 농형유도 풍력발전기는 가파도 계통 전체 평균 부하량에 비해 2배 이상 크기 때문에 계통 연계 운전 시 과도한 무효전력 소비와 급격한 출력변동에 따른 계통의 전력품질을 떨어뜨릴 수 있다 [2]. 그리고 현재 가파도에 설치되어 운용되고 있는 1 MWh 용량을 갖는 배터리의 SOC(State of charge) 상태에 따라 풍력발전기의 운전과 정지가 빈번하게 나타날 수 있어 시스템 운전의 신뢰성을 약화 시킬 수 있기 때문에 이에 대한 안정적인 전력을 공급할 수 있는 보완책을 강구할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 현재 가파도에서 운용되고 있는 분산형 전원 설비들의 전기적 특성과 제어특성을 고려하여 계통의 안정적 운용을 증대하기 위한 방안을 제안하고 이를 전력계통 및 전력전자 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 컴퓨터 해석을 통한 결과를 토대로 타당성을 검증하고자 한다.

컴퓨터 해석은 현재 가파도 계통의 구성에 대해서 STATCOM을 추가하여 운용하는 경우와, 기존 농형유도 풍력발전기를 영구자석 풍력발전기로 교체하여 운용하는 경우로 계통을 구성하여 국내 송배전 설비이용규정을 고려한 전력품질 및 전력흐름에 대해 비교 분석하였다.

II. 가파도 분산전원 계통

2.1 분산형 전원설비의 종류

‘분산형 전원’이라는 단어는 일반적으로 수용가 또는 계통에 위치하는 작은 규모의 전력 생산 전원을 말한다. 분산형 전원은 초기에 병원 또는 군부대 같은 중요시설의 정전 시 보조 전력원의 용도로 이용되어져 왔다. 그러나 최근에는 도서·산간지역과 같은 고립된 지역을 위한 전력 공급과 원자력발전에 대한 국민적 불안감 확대 및 소규모 용량 기술 발전 등으로 인해 전력계통 연계방안으로 확대되고 있다. 분산형 전원에는 태양광발전, 풍력발전, 디젤발전기, 에너지 저장장치 등이 있다 [3].

1) 태양광발전

태양광발전은 태양광에너지를 전기에너지로 전환해 전력을 얻어내는 시스템으로, 자연환경에서 쉽게 얻을 수 있는 풍부한 에너지원이다. 하지만 태양광 발전을 위한 PV(Photovoltaic) 모듈은 일사량 및 온도에 따라 성능이 크게 좌우되는 등 자연조건에 상당히 의존적이다. 이에 따라 태양광 발전시스템의 출력 효율을 높이기 위해, 일반적으로 태양전지 셀 자체의 효율 및 전력변환 시스템의 변환효율을 높이거나 MPPT(Maximum power point tracking) 제어방법을 사용하여 최대 출력을 얻을 수 있다.

2) 풍력발전

풍력발전은 바람에너지를 이용하여 전력을 얻어내는 시스템으로 신재생에너지원에서 가장 풍부한 에너지원 중 하나로 평가된다. 태양광발전과 마찬가지로 자연조건에 상당히 의존하며 풍속과 풍향에 따라 출력변동이 심한 특성을 가지고 있다.

풍력발전기는 발전기의 형태에 따라 PMSG(Permanent magnetic synchronized generator), SCIG(Squirrel cage induction generator)가 사용되고 있다.

PMSG는 영구자석 동기기를 사용하여 외부로부터 별도의 여자전류가 필요 없고, 가용풍속범위가 넓고 증속기가 필요 없어 다른 발전기보다 효율적이지만, 전력변환장치와 영구자석의 대형화로 인한 경제적인 문제가 있다.

SCIG는 구조가 간단하고 견고하여 유지보수비용이 거의 필요하지 않는 장점을 가지고 있지만 기동 시 별도의 여자전류가 필요하며 돌입전류를 줄이기 위해 소프트스타터를 사용해야 한다. 그리고 일정한 전압크기와 주파수의 전력을 생산할 수 있으나 전력변환장치를 사용하지 않고 바로 계통에 연결되기 때문에 리액터성분이 커서 역률이 낮아지고 이를 보상하기 위해 무효전력 보상장치를 필요로 한다.

3) 디젤발전기

디젤발전기는 일반적으로 비상 시 전원으로 가장 많이 사용되며 운영부하 시 각 설비들의 유연한 운전을 위해 사용한다. 디젤발전기는 여자기와 조속기, 터빈으로 구성되며 여자는 발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하여 출력단자전압을 일정하게 유지 또는 조정하는 하는 역할을 하며 조속기는 터빈의 발전량과 부하의 전력소비량 간의 차를 0으로 유지하기 위해 속도를 제어하는 장치이다. 그러므로 디젤발전기는 여자기와 조속기를 통해 계통에 필요한 전력을 생산한다.

4) 에너지 저장장치

배터리를 이용한 에너지 저장장치는 원하는 전압과 용량의 에너지를 얻기 위해 직·병렬로 연결된 다중 전지 내에 전기 화학에너지 형태로 저장하는 방식이다. 응답속도가 빠르고 에너지밀도가 높은 배터리는 전력계통에서 Load leveling, Power control, Peak shaving 등의 역할을 한다. 에너지 저장장치를 도입함으로써 예비력 확보, 신뢰도 향상, 신재생발전기 계통연계 안정화 등의 장점을 가질 수 있다.

5) STATCOM

STATCOM(Static synchronous compensator)은 전력 계통의 신뢰도를 극대화할 수 있는 FACTS(Flexible AC transmission system)설비 중 우수한 특성을 지닌 전압보상용 기기이다. IGBT와 같은 전압형 소자를 사용하여 무효전력을 빠르게 흡수·공급하여 출력전압의 크기와 위상을 신속히 제어하여 계통 전압을 안정시키는 역할을 한다.

2.2 가파도 분산형 전원설비 구성

가파도 계통은 Fig. 1과 같이 1 MVA BESS(Battery energy storage system), 150 kVA 디젤발전기 3대, 250 kW 농형유도 풍력발전기 2대 및 21가구에 설치된 총 116 kW 태양광발전기를 포함하는 분산형 전원설비와 계통연계를 위한 차단기 및 변압기, 수용가 그리고 더미부하로 구성되어 있다. 농형유도 풍력발전기와 태양광 출력으로 주 전원인 BESS에 전력을 저장하였다가 가파도 부하에 공급하고 있다. 풍속이 낮거나 풍력발전기의 고장으로 인해 정지하면 BESS에 충전된 전력이 지속적인 방전으로 잔존용량이 줄어들게 되는데, 이 때 보조 전원인 디젤발전기가 동작하여 BESS에 전력을 저장하게 된다. 가파도의 부하는 2013년 기준 평균 소비전력이 119 kW, 최대 소비전력 224 kW로 담수화 설비 50 kW, 미역건조공장 50 kW, 전화국 10 kW, 이동통신 10 kW, 보건소 8 kW, 리사무소 5 kW, 초등학교 70 kW 등으로 구성되어 있다 [4].

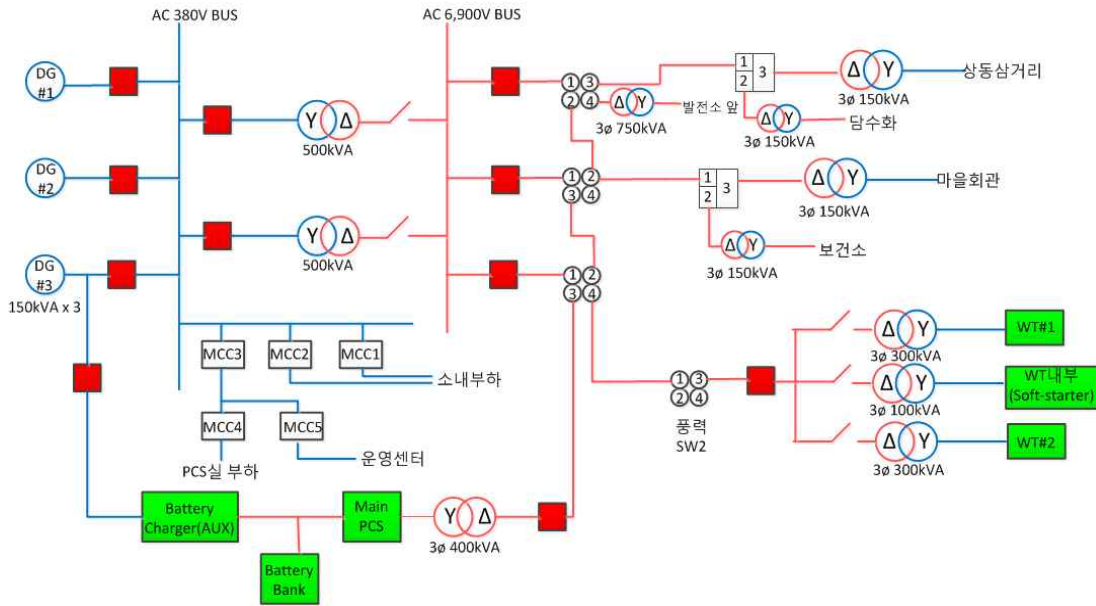


Fig. 1 The power grid in Gapado Island

2.3 분산형 전원의 계통연계기준

본 논문의 시뮬레이션을 통한 가파도 내의 전력품질 분석은 송·배전전기설비 이용규정의 「배전용 전기설비 성능기준」과 「신재생발전기 계통연계기준」을 근거하였다 [5].

배전용 전기설비 접속기준에 근거하면 분산전원이 계통에 접속된 후 분산설비의 운전 및 제어 형태에 따라 계통의 전력품질이 영향을 받는데, 요구되는 접속 규정으로는 직류전류 계통유입, 역률, 전압변동, 플리커, 주파수, 고조파전압제한 등이 있다. 도서지역 내의 풍력 발전이나 태양광 발전 등과 같은 간헐발전원은 계통에 많은 전력품질 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 간헐발전원이 많은 도서지역에서 전력품질은 중요한 문제로 전력품질 규정을 만족할 수 있도록 운영해야 한다.

- 직류전류 계통유입 한계 : 분산형 전원설비는 PCC(Point of common coupling) 단에서 발전기용량 정격 최대전류의 0.5% 이상인 직류 전류를 전력계통으로 유입해서는 안 된다.

- 역률 : 분산형 전원설비의 역률은 PCC단에서 90%이상을 유지해야 한다.
- 전압변동 : 분산형 전원설비의 순시전압변동은 발전원의 간헐성에 따라 3~5% 이내로 제한되어야 한다.
- 플리커 : 분산형 전원설비의 빈번한 출력변동 및 병렬분리에 의한 플리커 가혹도 지수는 $E_{psti} \leq 0.35$ (단기간 : 10분) $E_{plti} \leq 0.25$ (장기간 : 2시간) 이하로 제한되어야 한다.
- 주파수 : 일반적인 계통 주파수 조정범위는 $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 로 정하고 있다. 다만 신재생 발전기의 배전계통 병렬연계 장치 투입 순간에 동기화 변수가 Table 1의 제한범위 이내로 유지되어야 한다.
- 고조파 전압 : 배전계통의 종합 전압고조파 왜형율이 5%를 초과하지 않도록 신재생 발전기로부터 배전계통에 유입되는 고조파 전류를 각 차수별로 제어해야 한다.

Table 1 Limited range of synchronization parameters for grid-connected

Total capability of renewable energy generator (kW)	Frequency difference (Δf , Hz)	Voltage difference (ΔV , %)	Phase angle difference ($\Delta \Phi$, °)
below 500	0.3	10	20
above 500 ~ under 1,500	0.2	5	15
more than 1,500	0.1	3	10

계통 고장으로 인한 분산형 전원 발전설비가 분리 하여 재병입시에도 전력계통의 전압과 주파수가 정상상태로 5분간 유지되지 않는 한 분산형 전원 발전설비를 다시 계통에 연결해서는 안 된다. 위와 같이 전력품질문제 뿐만 아니라 전자장 장애로부터 보호, 서지 보호기능, 전력계통 재폐로 협조 등 마이크로그리드를 구성하기 위한 다양한 연계 기술기준이 있다 [5].

Ⅲ. 가파도 계통 모델링 및 제어

3.1 계통 모델링

본 논문의 계통 모델링은 가파도의 실제 변압기 및 선로 정수를 고려하였으며 250 kW 농형유도 풍력발전기, 150 kVA 디젤발전기, 116 kW 태양광발전기, 더미부하 및 일반부하로 구성하였다. 본 논문의 시나리오 구성을 위해 배터리 에너지 저장장치를 1.5 MVA로 증설하였으며, 100 kW 영구자석 풍력발전기 및 300 kVAR STATCOM을 추가적으로 설계하여 Fig. 2와 같이 계통을 구성하였다. 가파도 계통은 풍력발전기의 정상운전 시 BESS가 주 전원이 되어 부하에 전력을 공급하도록 설계하였으며, 디젤발전기는 대기 중에 있는 보조 전원으로 설계하였다.

시뮬레이션은 전력시스템의 전반적인 현상을 해석할 수 있으며 각종 동기 및 유도 발전기, 전력전자 소자, 제어 시스템, 회전기기 등의 모델이 내장되어 있어 전력시스템의 다양한 현상들을 재현 및 구현할 수 있는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였다 [6].

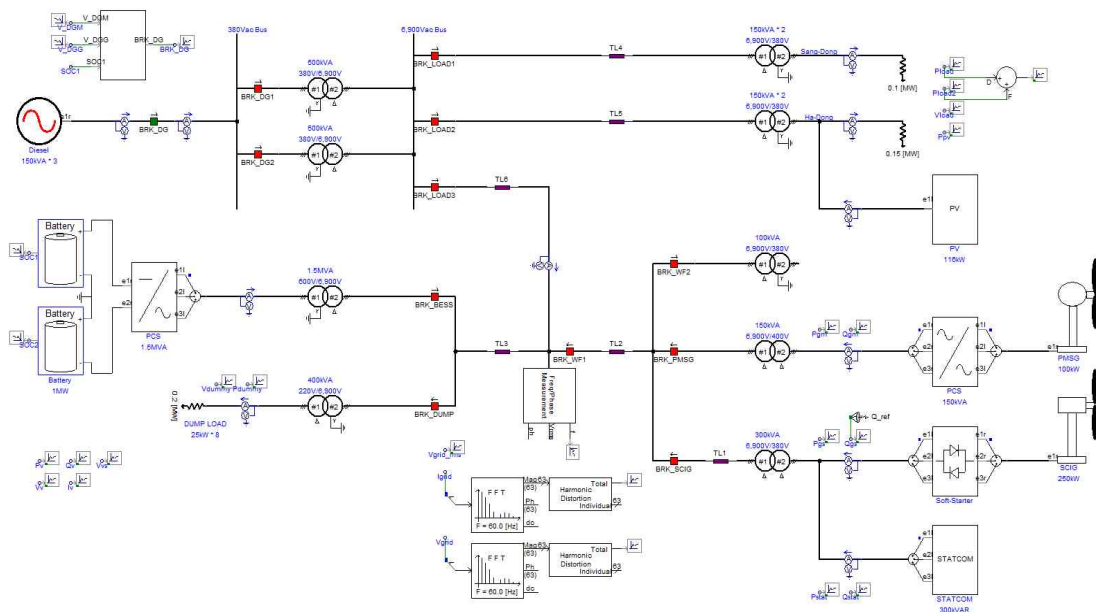


Fig. 2 PSCAD/EMTDC model of the power grid in Gapado Island

1) SCIG System

농형유도 풍력발전기는 구조가 간단하고 계통연계 시 별도의 전력변환장치를 필요로 하지 않아 시스템의 규모가 작고 경제적인 장점을 갖고 있다. 그러나 소프트 스타터를 이용한 초기 기동 시 돌입전류에 의한 전력품질 문제를 야기하고 풍속이 변동함에 따라 회전자계를 공급하는데 필요한 여자전류를 충당하기 위해 연계된 전력계통으로부터 변동하는 무효전력을 소모한다. 이 때 무효전력의 변동은 연계된 전력계통의 전압안정도를 저하 시키는 원인이 된다 [7].

Fig. 3은 250 kW 농형유도 풍력발전기의 계통연계를 위한 시뮬레이션 모델이다. 초기기동 시 돌입전류를 억제하기 위해 소프트 스타터 시스템을 이용하였다. 발전기 모델은 Fig. 4와 같이 구성하였으며, 출력특성곡선을 이용한 출력 값을 토크 값으로 변환하여 발전기의 입력으로 사용하였다. Fig. 5은 소프트 스타터 내부구성을 나타내며 농형유도 풍력발전기가 투입하기 전에는 점호각을 최대값으로 유지하다가 투입이 결정된 시점에서 점호각을 감소시켜 최종적으로 영이 되게 하였다.

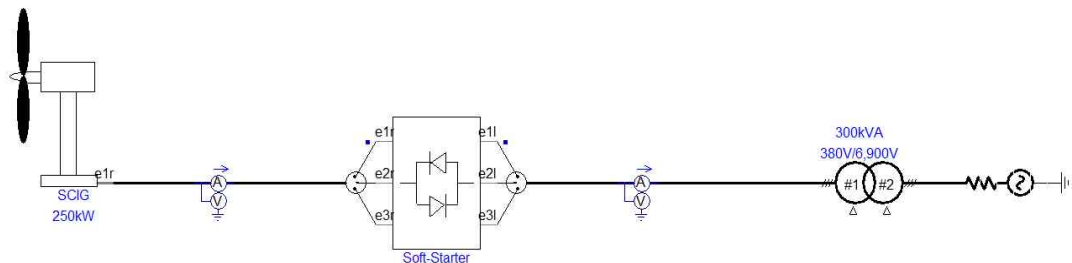


Fig. 3 Simulation model of SCIG system

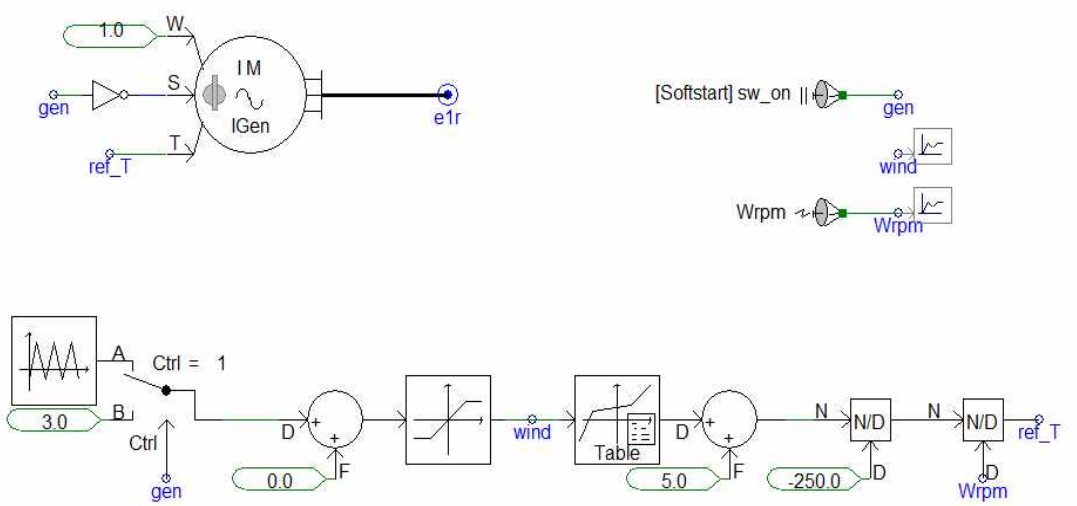


Fig. 4 The schematic diagram of squirrel cage induction generator model

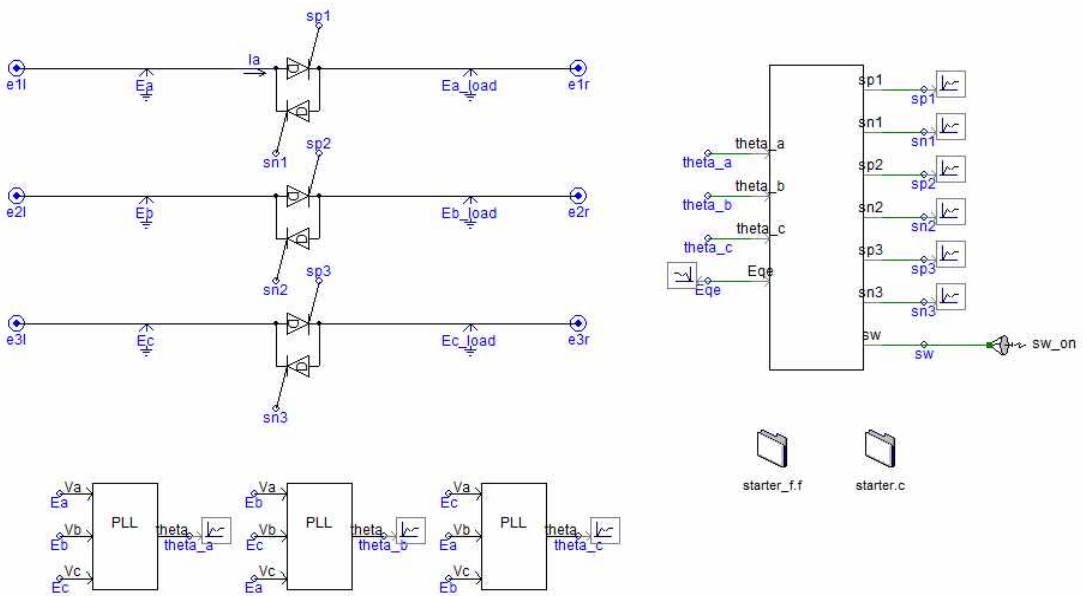


Fig. 5 Circuit diagram of soft starter

Fig. 6은 소프트 스타터를 이용한 농형유도 풍력발전기의 초기기동 시 전압 및 전류 파형이다. 초기기동 시 소프트 스타터의 점호각이 감소함에 따라 전압파형이 서서히 증가되며 기동 전류의 크기를 제한한다.

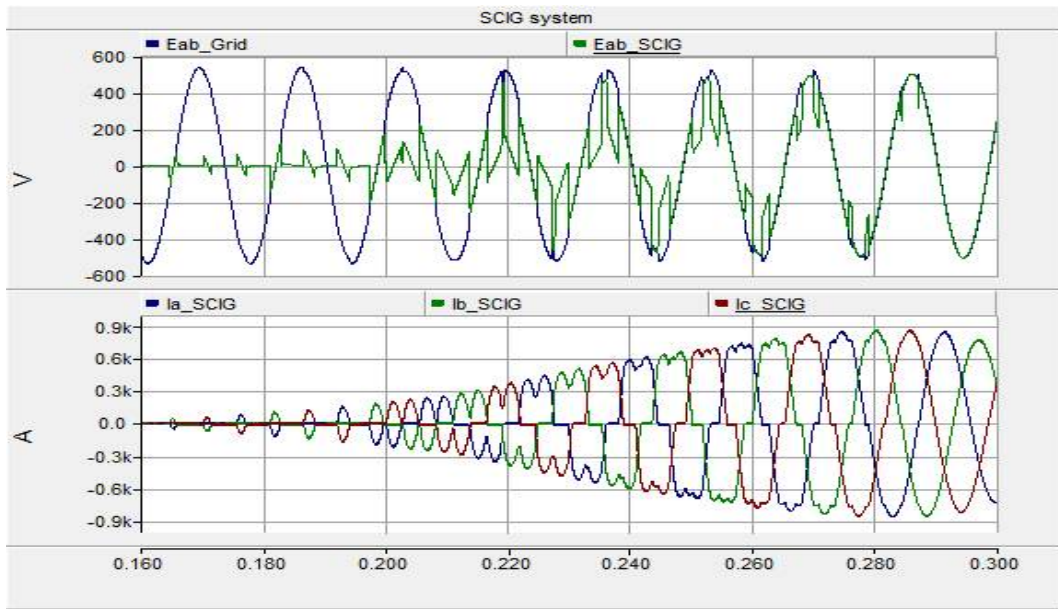


Fig. 6 Voltage & current of SCIG system under transient states

2) PMSG System

영구자석형 동기발전기의 출력 전압과 주파수는 회전속도에 비례하는 특성을 갖기 때문에 계통에 직접적인 연결이 불가능하다. 따라서 동기발전기와 계통사이에는 전력변환장치를 설치하여 가변 전압, 가변 주파수의 발전기 출력을 일정전압, 일정 주파수로 변환하여 계통에 공급해야 한다 [8].

Fig. 7은 100 kW 영구자석형 풍력발전기의 계통연계를 위해 전력변환장치를 이용한 시뮬레이션 모델이다. 발전기 모델은 Fig. 8과 같이 구성하였으며, 출력특성곡선을 이용한 출력 값을 토크 값으로 변환하여 발전기의 입력으로 사용하였다. Fig. 9의 전력변환장치에서 Inverter controller는 DC 링크 전압제어 및 역률 제어를 수행하고 Converter controller에서 출력특성곡선을 이용한 최적 운전점에서 운전하도록 전류 제어를 수행하였다.

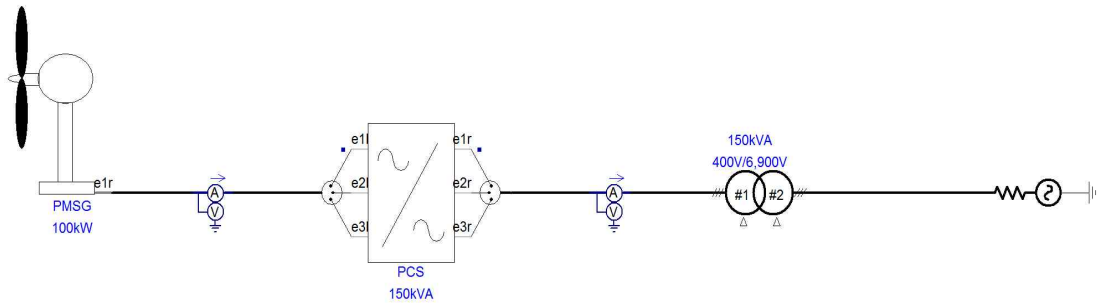


Fig. 7 Simulation model of PMSG system

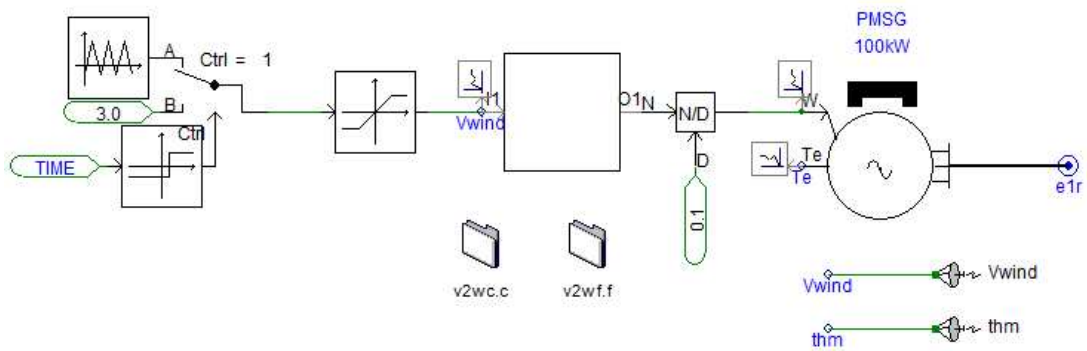


Fig. 8 The schematic diagram of permanent magnet synchronous generator model

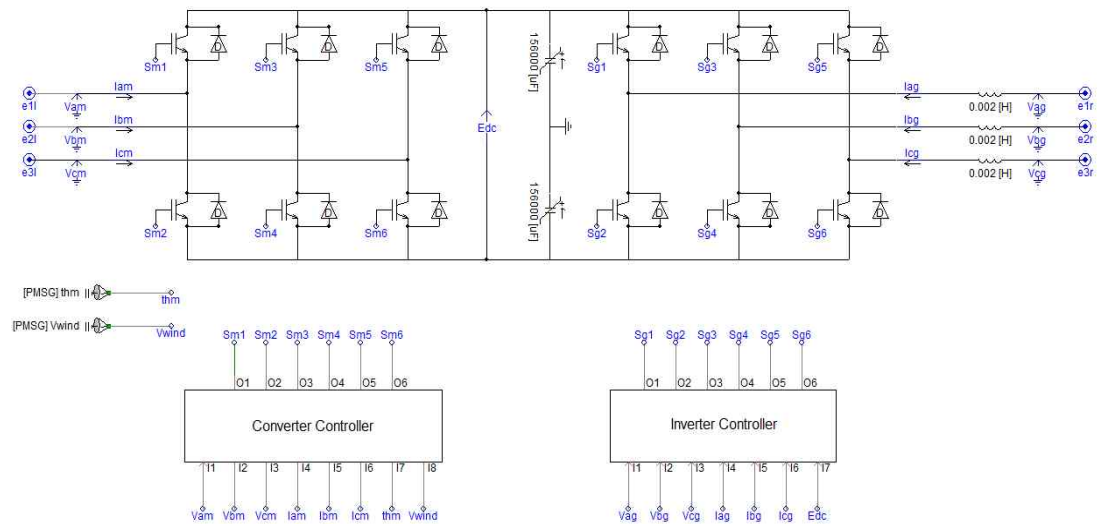


Fig. 9 Circuit diagram of back-to-back system

Fig. 10, Fig. 11은 영구자석형 풍력발전기의 전압 및 전류 파형이다. Fig. 10의 영구자석 동기기 가변 출력은 전력변환장치를 이용하여 Fig. 11처럼 계통 연계가 가능한 일정 전압 일정 주파수로 변환해야 한다.

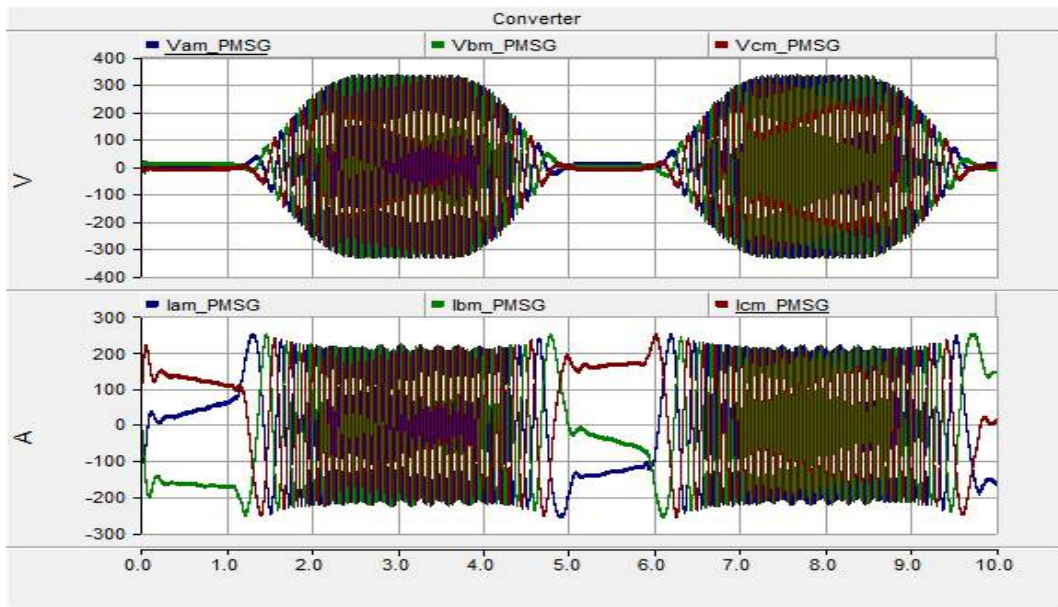


Fig. 10 Generator side voltage & current

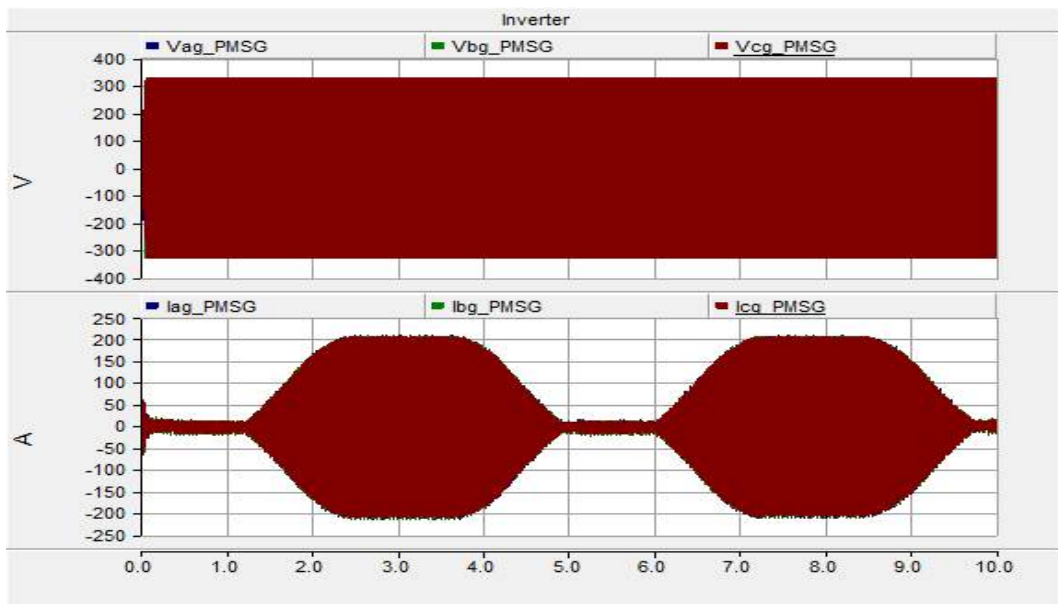


Fig. 11 Grid side voltage & current

3) PV System

가과도에는 21가구에 총 116 kW급 태양광발전기가 설치되어 있는데 시물레이션 모델을 단순화하기 위하여 전체 태양광발전기를 Fig. 12와 같이 하나의 전류원으로 등가 모델링하여 유효전력을 전류로 변환하고 가변 전류원의 기준 전류값으로 사용하여 출력이 발생하도록 설계하였다. 태양광발전기는 역률이 1로 제어되므로 무효전력은 발생하지 않도록 모델링하였다.

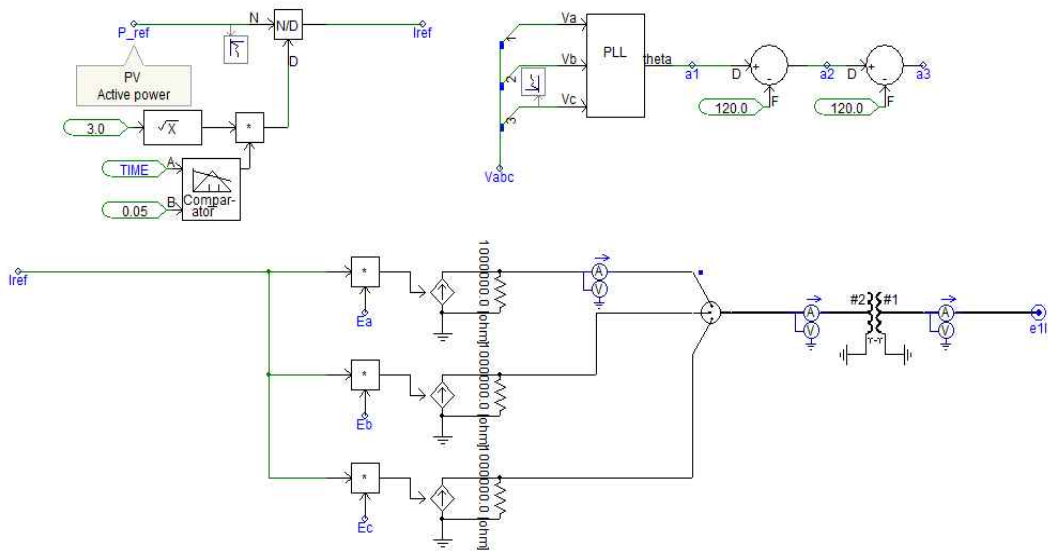


Fig. 12 Simulation model of PV system as current source

4) BESS

배터리 에너지 저장장치는 크게 배터리 부분과 전력변환장치로 나눌 수 있다. 배터리 모델은 공칭전압 3.6 V 50 Ah의 정격용량을 갖는 리튬이온 배터리를 기준으로 모델링하였다. 배터리는 Shepherd nonlinear battery model을 참조하여 Fig. 13과 같이 가변전원과 고정저항을 이용한 비선형 모델이며 배터리의 방전공식인 식(1)을 직류 가변전원의 입력으로 사용하였다 [9]. 모델링된 배터리를 직·병렬로 연결하여 직류전압 1200 V의 1.5 MWh 용량을 갖는 주 전원으로 구성하였다.

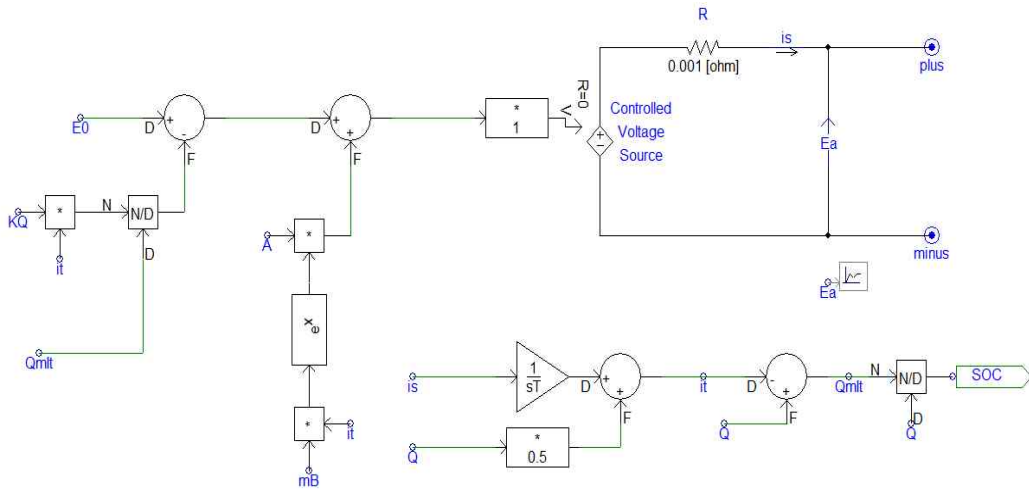


Fig. 13 The schematic diagram of battery model

$$E = E_0 - k \cdot \frac{Q \cdot i \cdot t}{Q - i \cdot t} + A \cdot \exp(-B \cdot i \cdot t) \quad (1)$$

여기서,

E	: 배터리 단자전압	[V]
E ₀	: 배터리 기준전압	[V]
A	: 지수함수의 계수	[V]
B	: 지수함수 역 시정수	[Ah ⁻¹]
Q	: 배터리 용량	[Ah]
k	: 분극 상수	[V/Ah]
R	: 내부 직렬 저항	[Ω]
i	: 배터리 방전전류	[A]
t	: 방전 시간	[h]

Fig. 14는 식(1)으로 부터 만들어진 배터리의 방전특성 곡선을 보여준다. 이는 배터리에서 50 Ah의 정전류 방전을 통한 전압과형이다. 리튬이온 배터리의 특성 상 SOC가 0.2 ~ 0.8 구간(0.72k ~ 2.88k)에서 전압이 선형적인 특성을 보이며 다른 구간에서는 비선형적인 특성을 보인다. 배터리의 완전충전, 완전방전을 방지하며 SOC가 선형적인 특성구간에서 제어가 가능하기 때문에 이 구간에서 배터리가 동작되도록 설계하였다. 여기서, SOC는 최대 용량에 대한 에너지가 충전된 정도를 지표로 나타내는 것으로 0에서 1사이를 나타낸다. SOC가 1에 근접하

다는 것은 배터리 용량만큼 에너지가 축적되어 있다는 것이고 SOC가 0에 근접한다는 것은 배터리 에너지가 방전되었다는 것을 의미한다.

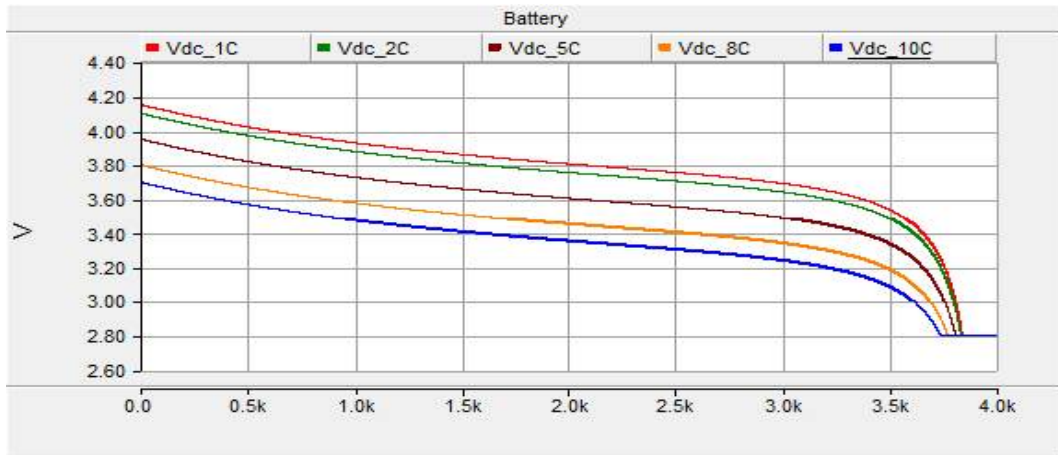


Fig. 14 The discharge curve of modelled Li-Ion battery

Fig. 15는 BESS의 전력변환장치로 3상 전압원 인버터 1대와 LCL필터로 설계하였다. 배터리가 주 전원으로 운전하는 경우 기준 주파수 및 전압을 제공하는 것이 가능해야 하므로 인버터에서 전압제어를 수행한다. 제어를 위한 위상각은 계통전압이 아닌 60 Hz의 정격 주파수로 제어하여 위상각을 결정하였다. BESS의 출력 제어 방법으로 전압제어모드와 전류제어모드로 분류할 수 있다. 전압제어모드는 전압, 주파수 유지를 위해 계통의 잉여 또는 부족전력을 전력변환장치에서 임의로 충·방전 시행 하는 방법이다. 전류제어모드는 전압, 주파수 유지 기능이 없고 EMS(Energy management system)에서 지령 받은 일정전력을 충·방전하는 방법(정출력 제어)이다 [10]. BESS에서 일정 출력제어 방법을 이용하면 발전량과 부하량에 실시간 제어가 불가능 하므로 계통전압을 만들고 주파수 유지를 할 수 있는 전압제어모드로 설계하였다. 따라서 BESS는 전력변환장치의 제어를 통해 부하와 신재생 출력의 차이만큼 능동적으로 빠르게 충·방전 할 수 있도록 설계 하였다.

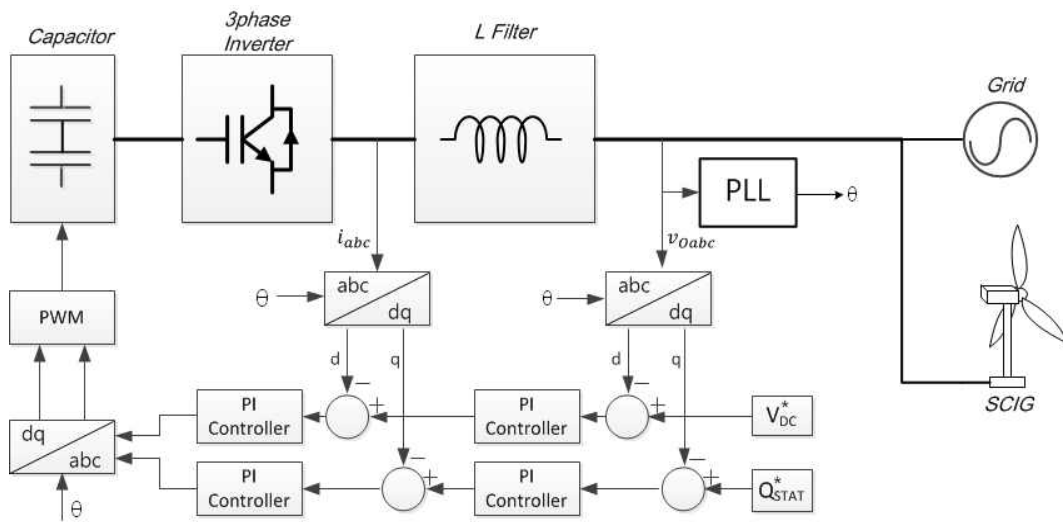


Fig. 16 The schematic diagram of STATCOM connected to SCIG

6) 디젤발전기

디젤발전기(Diesel Generator)는 Fig. 17과 같이 동기발전기, 터빈 조속기 및 여자기로 구성할 수 있다. 디젤발전기는 정상 시 운전을 하지 않으며, BESS의 잔존용량이 설정 값 이하로 떨어지게 되면 동작되도록 설계하였다. 따라서 디젤발전기는 150 kVA 용량을 갖는 3기의 보조 전원으로 구성하였다.

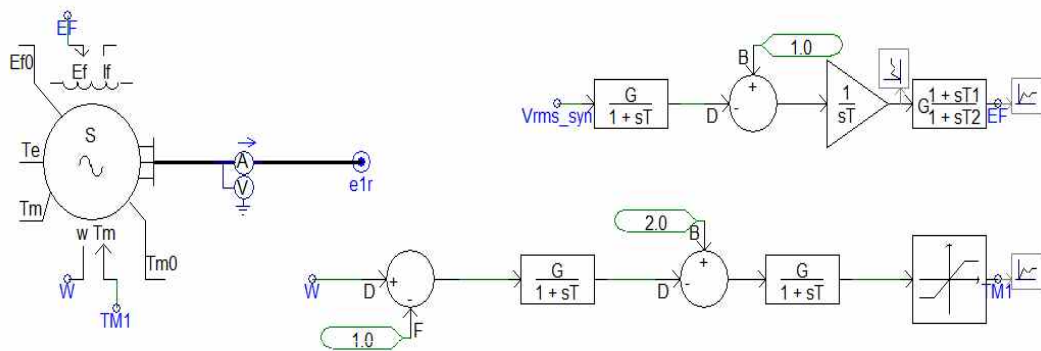


Fig. 17 Simulation model of Diesel Generator

Table 2는 본 논문에서 적용된 가파도 발전설비들의 내부 구성과 각각의 전기적 값을 제시하였다.

Table 2 Parameter of the electricity generation in Gapado Island

Classification		Parameter	Value
SCIG		Capacity	250 kW
		Phase Voltage	220 V
		Phase Current	37.88 A
PMSG	Generator	Capacity	100 kW
		AC Voltage	400 V
		Frequency	11.72 Hz
	PCS	Capacity	150 kVA
		DC Voltage	800 V
		Grid Side AC Voltage	400 V
PV		Capacity	116 kW
		AC Voltage	380 V
BESS	Battery	Type	Li-Ion
		DC Voltage	1,200 V
		AC Max Current	2,040 A
	PCS	Capacity	1,500 kVA
		Frequency	60 Hz
		AC Voltage	600 V
STATCOM		Capacity	300 kVAR
		DC Voltage	800 V
		AC Voltage	380 V
Diesel Generator		Capacity	150 * 3 kVA
		Phase Voltage	220 V
		Phase Current	22.73 A

3.2 분산전원 시스템 제어이론

본 논문에서의 가파도 계통은 디젤발전기, 풍력발전기, 태양광발전기, BESS 및 STATCOM으로 구성하였다. 모든 분산전원이 PQ제어를 한다면 독립운전 중인 가파도 계통의 주파수 및 전압 조정이 불가능하기 때문에 전력수급의 붕괴상태에 놓이게 될 것이다. 따라서 풍력발전기, 태양광발전기 및 STATCOM은 유효·무효전력 기준 값을 받아서 제어하는 PQ(Active/Reactive)제어를 수행하고 BESS, 디젤발전기는 부하 및 발전출력 변동에 능동적으로 출력제어가 가능한 CVCF(Constant voltage constant frequency)제어를 수행하도록 설계하였다.

일반적인 3상 시스템에서는 3상 교류의 a,b,c 상마다 각각 제어를 하지 않고 d-q 동기좌표변환을 통해 3상의 교류 값을 2상의 직류 값으로 변환하여 제어한다. 본 논문에 적용된 전력변환장치에서도 제어원리는 d-q 동기좌표계 상에서 순시전력을 제어하는 방식을 이용하였다. 계통이 3상 평형조건에서 동기좌표계 상의 d-q 전압, 전류는 일정한 직류성분으로 나타나며 유효전력과 무효전력은 d 축과 q축으로 분리되어 각각 따로 제어될 수 있다 [12].

1) 전류제어기

3상 평형전원과 리액터 L_i 로 구성된 AC/DC 전압형 PWM 컨버터의 전압 방정식은 다음 식(2)와 같다. 여기서, $e_{abc} = [e_a e_b e_c]^T$ 는 3상 입력전압, $i_{abc} = [i_a i_b i_c]^T$ 는 상전류, $v_{abc} = [v_a v_b v_c]^T$ 는 인버터 상전압이다.

$$v_{abc} = L_i \frac{di_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (2)$$

식(2)는 키르히호프의 전압법칙을 이용하여 인버터 상전압을 인덕터에 유도되는 전압과 전원 전압의 형태로 등가화 하였다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \Bigg|_{\theta = \omega t} \quad (3)$$

식(2)에서 좌표변환행렬을 이용하여 ω 로 회전하는 동기좌표계에서 3상 전압형 PWM 컨버터의 d-q전압 방정식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$v_{dq} = L_i \frac{di_{dq}}{dt} + L_i \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} i_{dq} + e_{dq} \quad (4)$$

동기좌표계의 식(4)에는 전류제어기에 대해 외란 역할을 하는 역기전력 성분 이외에 축이 회전함에 의해 발생하는 속도기전력성분이 추가적으로 발생함을 알 수 있다. 따라서 우수한 전류 제어 특성을 얻기 위해서는 역기전력뿐만 아니라 속도기전력에 의한 간섭성분을 전향보상 해주어야 한다.

$$\begin{aligned} v_d^* &= (K_p + \frac{K_i}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L_i i_q + e_d \\ v_q^* &= (K_p + \frac{K_i}{s})(i_q^* - i_q) + \omega L_i i_d + e_q \end{aligned} \quad (5)$$

전류제어기에는 통상 비례 적분 제어기가 사용된다. 비례 적분 제어기는 지령 값과 실제 값과의 오차를 비례하여 출력을 생성하는 K_p 항과 오차의 적분으로부터 출력을 생성하는 K_i 항으로 구성된다. 식(5)에서 전압 지령치를 얻게 되면 decoupling 제어가 가능한 전압형 컨버터의 전류 제어기를 설계할 수 있다. v_d^*, v_q^* 는 다시 좌표변환을 통해 3상 지령전압 v_{abc}^* 로 변환되고 삼각파와 비교기를 통과하여 각각의 IGBT Gate에 스위칭 신호로 변환된다 [13].

2) 유·무효전력 제어기

좌표변환 기준에 의해 $v_{dq} = (v_d + jv_q)$, $i_{dq}^* = (i_d - ji_q)$ 으로 나타낼 수 있다. 동기 좌표계상에서 피상전력 S 는 식(6)과 같으며 $S = P + jQ$ 이므로 다음과 같이 유효 전력 P 와 무효전력 Q 을 분리할 수 있다.

$$S = vi^* = \frac{3}{2}v_{dq}i_{dq}^* = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) + j\frac{3}{2}(-v_d i_q + v_q i_d) \quad (6)$$

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2}v_q i_q \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) = \frac{3}{2}(v_q i_d), \text{ for } v_d = 0$$

유·무효전력 제어기로 비례 적분 제어기를 사용하며 식(8)과 같이 전류 지령치를 생성하여 전류제어기의 입력으로 사용된다.

$$i_d^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q^* - Q)/\frac{3}{2}v_q \quad (8)$$

$$i_q^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P^* - P)/\frac{3}{2}v_q$$

3) DC link 제어기

AC/DC 전압형 PWM 컨버터의 출력 방정식은 다음 식(9)과 같다. 여기서 손실은 무시하였다. P_c 는 커패시터 저장에너지, P_{ac} 는 AC측 출력, P_{dc} 는 DC측 출력이다.

$$P_c = P_{ac} + P_{dc} \quad (9)$$

$$v_{dc} C \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) + v_{dc} i_{dc}$$

DC link 제어기로 비례 적분 제어기를 사용하며 식(10)과 같이 전류 지령치를 생성하여 전류제어기의 입력으로 사용된다.

$$i_q^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (v_{dc}^* - v_{dc}) \Big|_{i_{dc} = i_q} \quad (10)$$

4) AC 계통전압 제어기

3상 평형부하와 리액터 L_f , 필터용 커패시터 C_f 로 구성된 DC/AC 전압형 PWM 인버터의 전류 방정식은 다음 식(11)과 같다. 여기서 v_{abc} 는 인버터 상전압, v_{Oabc} 는 필터커패시터에 걸리는 전압, i_{abc} 과 i_{Oabc} 는 각각 인덕터에 흐르는 전류, 출력전류를 나타낸다.

$$i_{abc} = C_f \frac{dv_{Oabc}}{dt} + i_{Oabc} \quad (11)$$

식(11)은 키르히호프의 전류법칙을 이용하여 인덕터 전류를 커패시터에 흐르는 전류와 출력전류의 형태로 등가화 하였다. 위 식에서 ω 로 회전하는 동기좌표계에서 3상 전압형 PWM 인버터의 d-q전압 방정식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$i_{dq} = C_f \frac{dv_{Od}}{dt} + C_f \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} v_{dq} + i_{Odq} \quad (12)$$

$$i_d^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (v_{Od}^* - v_{Od}) - \omega C_f v_{Oq} + i_{Od} \quad (13)$$

$$i_q^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (v_{Oq}^* - v_{Oq}) + \omega C_f v_{Od} + i_{Oq}$$

전압제어기의 식(13)에서 전류 지령치를 얻게 되면 전류제어기와 같은 decoupling 제어가 가능한 전압 제어기를 설계할 수 있다. 전류 지령치인 i_d^* , i_q^* 는 전류제어기의 입력으로 사용되어 원하는 출력 전압을 생성한다.

3.3 모델 계통의 컴퓨터해석

3.3절에서 가파도의 현재 계통 구성 및 본 논문에서 제안한 발전설비로 구성되어 전력흐름 및 전력품질에 대해 비교 분석하였다. Fig. 18은 가파도의 풍력발전단지 내의 가변풍속을 나타낸 것이다. 이 가변풍속은 모든 시나리오에 동일하게 가정하여 적용하였다.

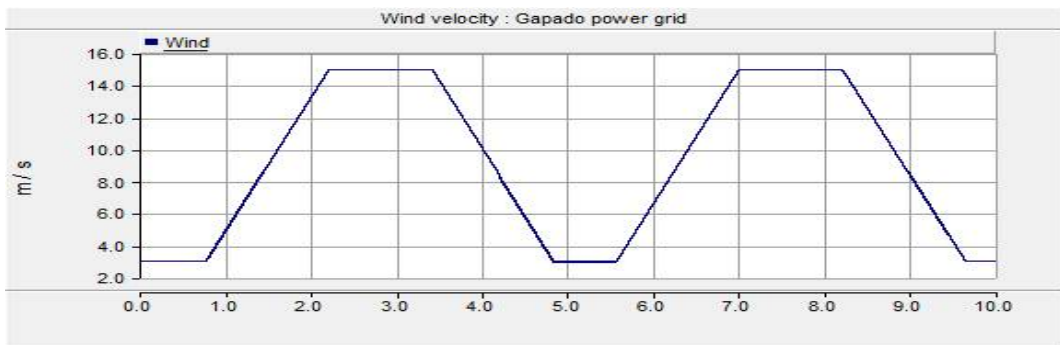


Fig. 18 The variable wind velocity data

1) 현재 가파도 계통의 구성

현재 가파도 계통의 구성은 250 kW 농형유도 풍력발전기 2대를 독립운전 중인 계통에 연계한 경우이다. 부하는 가파도의 최대부하인 250 kW, 태양광발전기는 설계용량인 116 kW로 일정출력으로 설계하였다. 농형유도 풍력발전기는 풍속이 가변함에 따라 출력이 변동하도록 하였고 BESS에서 부하량과 발전량의 차이만큼 충·방전하도록 설계하였다.

Fig. 19는 유효전력 및 무효전력 파형이다. P_Load는 250 kW의 일정부하에서, 농형유도 풍력발전기의 유효전력 P_SCIG가 풍속이 가변함에 따라 2대의 발전출력으로 0에서 500 kW까지 발전하고 있다. 이에 따른 BESS의 유효전력 P_battery에서 부하와 신재생발전기 출력차이만큼 0을 기준으로 충·방전한다. P_pv는 태양광발전기의 출력으로서 설치용량인 116 kW로 일정하게 발전하고 있다.

무효전력의 경우, 부하에서 요구하는 출력값은 0으로 설계하였으나, 실제 선로 정수 및 변압기 파라메타를 적용하였을 때 25 kVAR 정도의 무효전력 손실이 발생한다. 이는 $Q_{battery}$ 와 Q_{SCIG} 의 차이에서 볼 수 있다. Q_{SCIG} 는 농형유도 풍력발전기의 무효전력으로 풍력발전기 초기기동 시 돌입전류에 의한 무효전력을 크게 소모하고 있으며 풍속이 가변함에 따라 계통에서 변동하는 무효전력을 흡수하고 있다. 이 변동하는 무효전력은 $Q_{battery}$ 에서 충당하고 있다. 태양광 발전의 경우 유효전력만을 공급하게 설계하여 Q_{pv} 에서 보이는 것처럼 0으로 제어되고 있다. 이러한 유·무효전력 변화는 전력품질과 비교하여 분석할 수 있다.

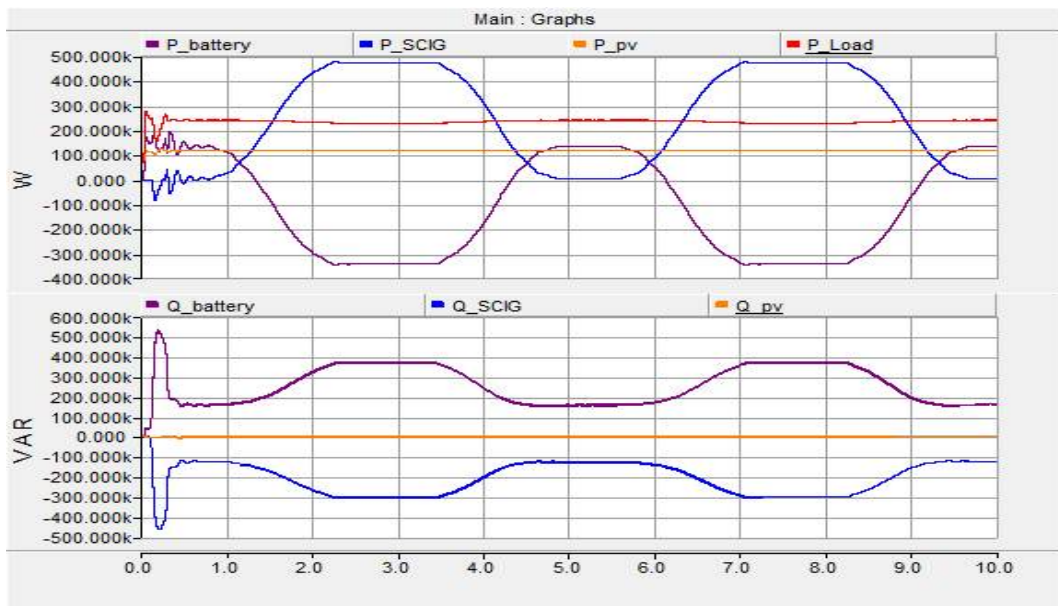


Fig. 19 Active & reactive power of the power grid in Gapado Island

Fig. 20는 위로부터 부하전압 실효값, 주파수, 고조파왜형율을 나타낸다. 1초 이전에 2대의 농형유도 풍력발전기의 기동 시, 돌입전류에 의해 전압강하가 순간적으로 약 280 V(26%)까지 일어나며 주파수 또한 59.5 Hz까지 떨어지고 있다. 또한 총 고조파왜형율은 약 30%까지 오르고 있다. 이는 전력품질 규정을 벗어나는 범위로 가파도 계통 내에서 농형유도발전기의 초기기동 시에는 전력품질을 저하 시키는 원인이 된다. 초기기동 이후 풍력발전기의 정상운전 시 주파수 및

고조파왜형율은 전력품질 규정을 만족하고 있으나, 부하전압 실효치는 변동하는 무효전력에 의해 전압변동이 361 V(5.0%)로 나타나 전압안정도에 악영향이 우려된다.

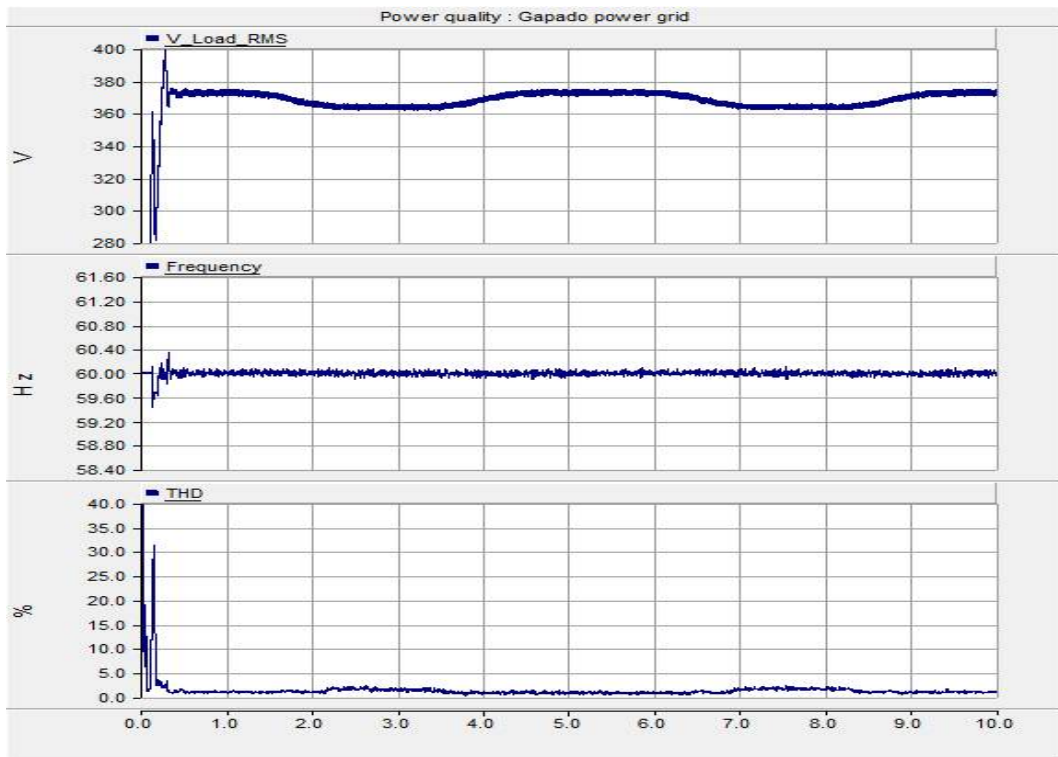


Fig. 20 Load voltage, frequency & THD of the power grid in Gapado Island

2) 제안한 가파도 계통의 구성

본 논문에서 제안한 가파도 계통의 구성은 두 가지 시나리오로 나누어 분석하였다. 첫 번째 시나리오는 현재 가파도 계통 구성에 300 kVAR STATCOM을 추가로 연계한 경우이며, 두 번째 시나리오는 현재 가파도 계통 구성의 250 kW 농형유도 풍력발전기 2대 대신 100 kW 영구자석 풍력발전기 2대를 설치한 경우이다. 이를 통해 제안한 가파도 계통의 구성과 현재 계통 구성에 대한 전력흐름 및 전력품질을 비교 분석하였다.

가. SCENARIO I

시나리오 1은 현재 가파도 계통 구성에 300kVAR STATCOM이 추가 연계된 경우이다.

Fig. 21는 시나리오 1에서 계통 내의 유효전력 및 무효전력 파형이다. STATCOM은 무효전력만을 제어하므로 P_statcom에서 보이는 것처럼 0으로 제어되고 있다. 이에 따라 유효전력의 경우, 앞의 현재 가파도 계통 구성과 동일한 출력을 나타낸다.

무효전력의 경우, 농형유도 풍력발전기의 무효전력 Q_{SCIG} 의 소모는 $Q_{battery}$ 에서 충당하고 있었으나 STATCOM이 추가 연계되어 $Q_{statcom}$ 이 배터리의 무효전력 공급을 분담하고 있다. 이는 STATCOM이 계통에 미치는 전력 품질과 비교하여 분석할 수 있다.

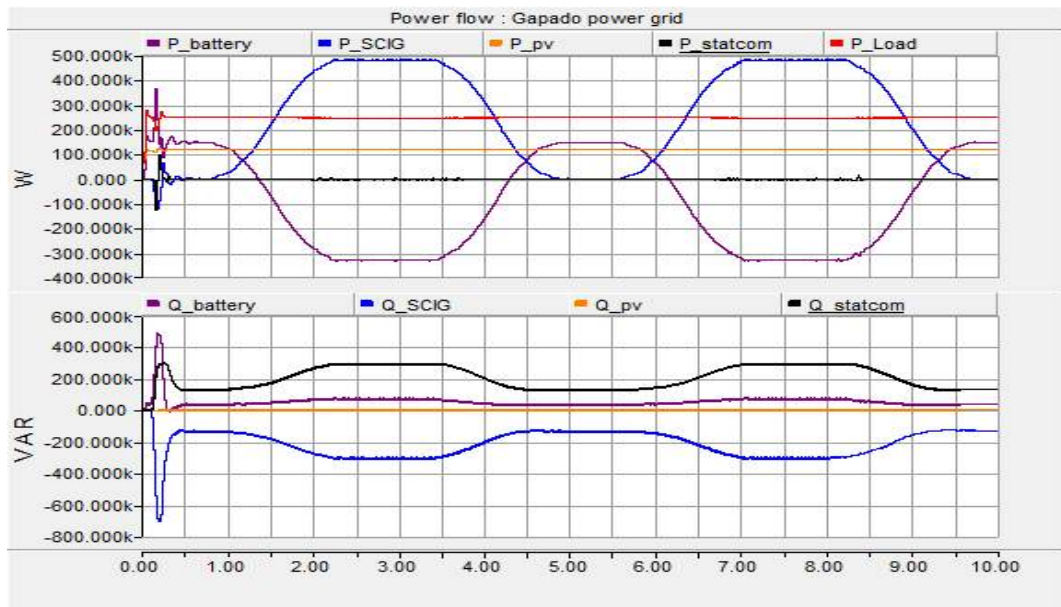


Fig. 21 Active & reactive power of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island

Fig. 22은 시나리오 1에서의 부하전압 실효값, 주파수, 고조파왜형율을 나타낸다. Fig. 20의 결과와 비교하여, 농형유도 풍력발전기의 초기기동 시 전압강하가 순간적으로 280 V(26%)까지 일어나는 반면 STATCOM 추가 연계된 경우 330 V(13%)로 줄어들고 있으며 풍력발전기의 정상운전 시 전압변동이 361 V(5.0%)에서 374 V(1.5%)로 줄어들고 있다. 이는 STATCOM의 무효전력을 제어함으로써 BESS의 무효전력 부담을 줄여 계통전압 안정도를 향상시키는 역할을 한다. 초기기동 시 주파수 및 고조파왜형율은 앞서 마찬가지로 전력품질 규정범위를 벗어나며 정상운전 시 규정범위 안에서 운전되고 있다.

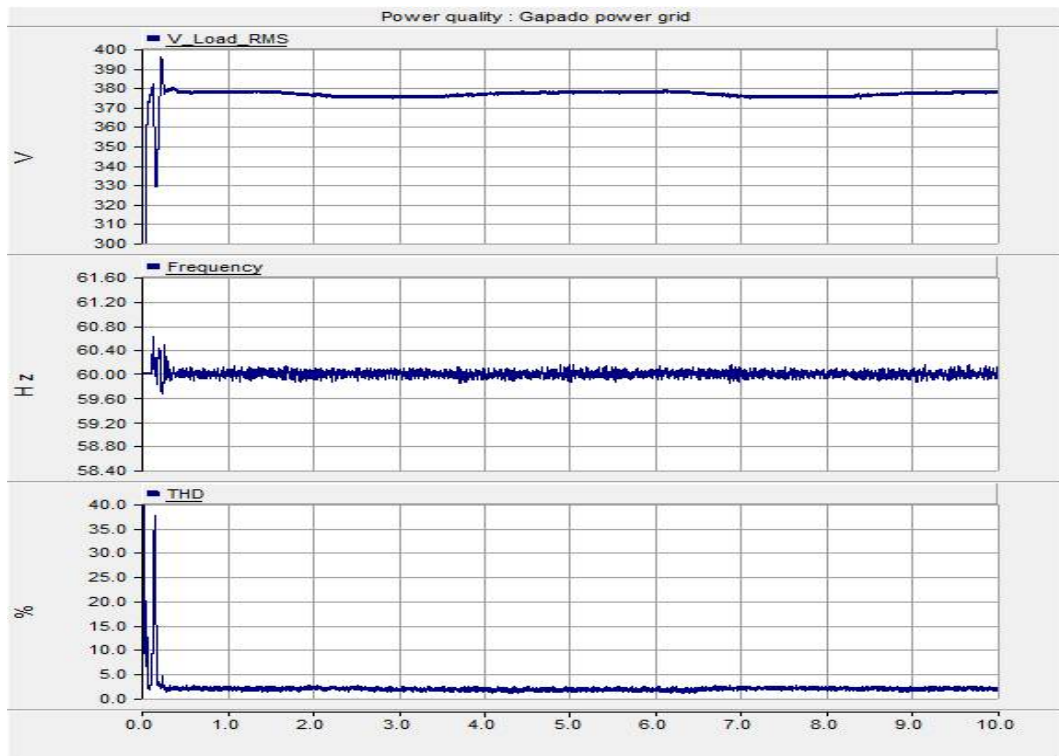


Fig. 22 Load voltage, Frequency & THD of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island

나. SCENARIO II

시나리오 2는 250 kW 농형유도 풍력발전기 2대를 제외하고 100 kW 영구자석형 풍력발전기 2대를 추가하여 독립운전 중인 계통에 연계한 경우이다.

Fig. 23는 시나리오 2에서 계통 내의 유효전력 및 무효전력 파형이다. P_Load는 250 kW 부하에서, 2대의 영구자석 풍력발전기의 유효전력 P_PMSG는 풍속이 가변함에 따라 0에서 200 kW까지 발전하고 있다. 이에 따른 BESS의 유효전력이 부하와 신재생 발전기의 출력차만큼 충·방전한다. P_pv는 시나리오 1과 동일하게 116 kW 고정출력으로 설계하였다.

무효전력의 경우, 실제 선로정수 및 변압기 파라메타를 적용하여 25kVAR 정도의 무효전력 손실이 발생하며 Q_battery에서 공급하고 있다. 영구자석형 풍력발전기의 무효전력 Q_PMSG의 경우 모델링에서 언급한 바와 같이 무효전력이 발생하지 않고 있다. 태양광발전기의 Q_pv 또한 시나리오 1과 동일한 조건 하에 0으로 제어되고 있다.

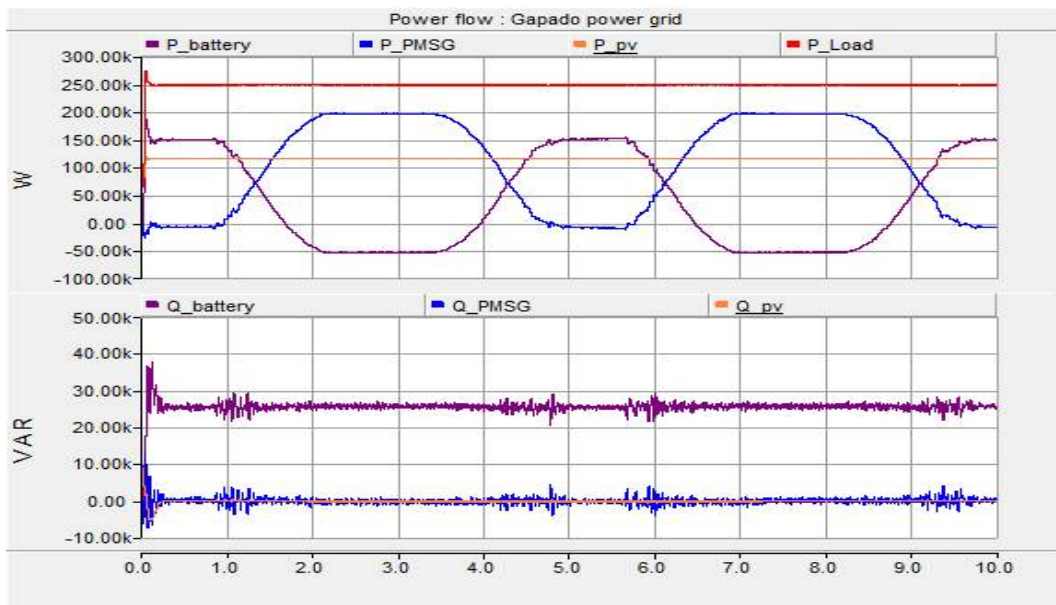


Fig. 23 Active & reactive power of the power grid connect to PMSGs in Gapado Island

Fig. 24는 시나리오 2에서의 부하전압 실효치, 주파수, 고조파왜형율을 나타낸다. Fig. 20의 결과와 비교하여, 부하전압 실효치는 전압변동이 378 V(1%미만)으로 현재 가파도 계통 구성에 비해 전압안정도를 크게 향상시킴을 알 수 있다. 영구자석형 풍력발전기는 농형유도 풍력발전기와 달리 초기기동 시 돌입전류가 없으며 전력변환장치를 통해 계통과 연계되기 때문에 무효전력이 발생하지 않아 정상운전 시 풍속이 가변함에도 불구하고 계통전압을 일정하게 유지시켜 주는 것이다. 주파수와 고조파왜형율 또한 초기기동 및 정상운전 시에도 전력품질 규정을 만족하고 있다.

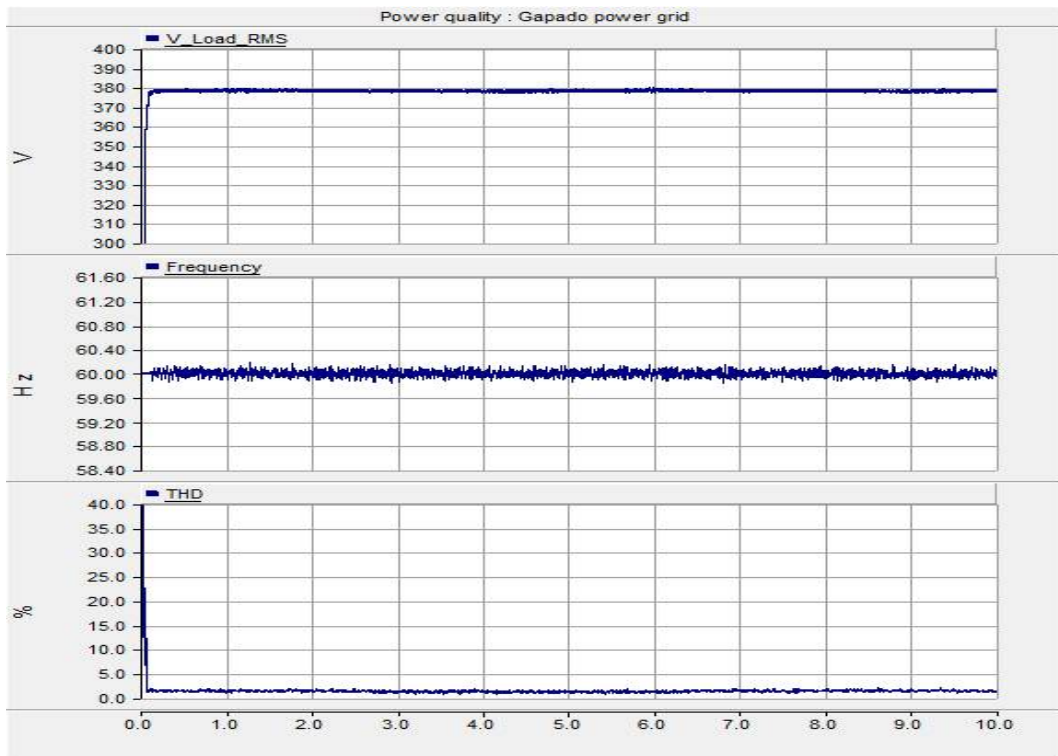


Fig. 24 Load voltage, Frequency & THD of the power grid connect to PMSGs in Gapado Island

3.4 결과 및 고찰

3.3절에서 가파도 계통을 현재 계통 구성 및 제안한 발전설비로 구성하여 발전 설비의 전력흐름 및 전력품질에 대해 분석해보았다. 시나리오에 대한 전력품질에 대한 결과는 Table 3, 4, 5와 같다.

Table 3 The power quality of the power grid in Gapado Island

Current power system	Voltage difference (ΔV , %)	Frequency difference (Δf , Hz)	THD(%)
Starting state	26	0.5	30
Steady state	5	0.1	2

Table 3의 현재 가파도 계통 구성에서 농형유도 풍력발전기는 초기기동 시 돌입전류에 의한 전압, 주파수, 고조파왜형을 모두 전력품질 규정을 벗어나는 범위로 계통 전력품질에 악영향이 우려된다. 정상운전 시 농형유도 풍력발전기의 무효전력 소모 또한 전압안정도를 저하 시키는 원인이 된다.

Table 4 The power quality of the power grid connect to STATCOM in Gapado Island

SCENARIO I	Voltage difference (ΔV , %)	Frequency difference (Δf , Hz)	THD(%)
Starting state	13	0.4	35
Steady state	1.5	0.1	2

Table 4의 시나리오 1에서 농형유도 풍력발전기의 무효전력보상용으로 STATCOM을 추가적으로 연계하여 초기기동 및 정상운전 시 전압안정도가 크게 향상시킬 수 있다.

Table 5 The power quality of the power grid connect to PMSGs
in Gapado Island

SCENARIO II	Voltage difference (ΔV , %)	Frequency difference (Δf , Hz)	THD(%)
Starting state	Less than 1.0	0.1	1.5
Steady state	Less than 1.0	0.1	1.5

Table 5의 시나리오 2에서 영구자석 풍력발전기는 농형유도 풍력발전기와 달리 영구자석을 사용함으로써 초기기동 시 여자전원이 요구되지 않으며 정상상태 시 전력변환장치의 무효전력 제어를 통해 전압안정도를 향상시킬 수 있다. 기동 시 과도상태가 없어 주파수 및 고조파왜형율은 초기기동 및 정상운전 시 모두 전력품질 규정범위 안에서 운전되고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제주도 대정읍 가파도를 모델로 선정하여 현재 운용되고 있는 분산형 전원 설비들의 전기적 특성과 제어 특성을 고려하여 안정적 운용을 증대하기 위한 방법을 제안하였다. 현재 계통 구성과 제안한 발전설비의 구성으로 나누어 국내 송배전 설비이용규정의 「배전용 전기설비 성능기준」과 「신재생발전기 계통연계기준」을 고려하여 전력품질을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 가파도에 설치되어 운용되고 있는 농형유도 풍력발전기는 소프트스타터를 이용한 초기기동 시에 외부로부터 여자전원이 필요하며 돌입전류에 의해 전력품질을 저하시키는 것을 확인하였다. 두 대의 250 kW 풍력발전기는 가파도 계통 전체 평균 부하량에 2배 이상 크기 때문에 정상운전 시 과도한 무효전력소비에 의한 전압안정도에 악영향을 주는 것을 확인하였다.
- 2) 시나리오 1의 농형유도 풍력발전기에 STATCOM을 추가하여 운용하는 경우, 풍력발전기의 무효전력을 보상해줌으로써 계통에서 받는 무효전력 변동을 줄이고 계통 전압안정도를 효과적으로 향상시키는 것을 확인하였다.
- 3) 시나리오 2에서 영구자석 풍력발전기는 초기기동 시 별도의 여자전원이 필요 없으며 전력변환장치를 통해 유·무효전력을 독립적으로 제어를 함으로써 풍력발전기의 출력변동에도 전압변동이 없는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 영구자석 풍력발전시스템은 독립운전 중인 계통 내의 전력품질에 대해 이상적 발전 형태로 나타남을 확인하였다.

이상과 같은 결과를 종합해보면 농형유도 풍력발전기에 무효전력 보상용 STATCOM을 설치하는 경우와 농형유도 풍력발전기 대신 영구자석형 풍력발전기를 설치하는 경우 모두 가파도 계통의 전력품질을 향상시킬 수 있을 것으로

여겨지기 때문에 이를 가파도에 적용하면 지금보다 안정된 전력계통을 유지하는 데 도움이 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 산업통상자원부, “제2차 에너지기본계획,” 2014. 1.
- [2] J.A. Pecas Lopes, C.L. Moreira, A.G. Madureira, “Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No.2, May. 2006
- [3] Dae-Seoung Moon, Jae-Jin Seo, Yoon-Seong Kim, Dong-Jun Won, “Control Algorithm of Hybrid System for Feeder Flow Mode Operation in Microgrid,” Trans. KIEE, Vol. 60, No 1, Jan. 2011
- [4] Seung-Mo Kim, Seung-Jin Oh, Jong-Hak Lee, Jae-Min Ahn, Kyung-Min Jin, Byung-Gi Kwon, Chang-Ho Choi. POSCO ICT, “The application and Verification of the 2MVA BESS with Wind farm in Microgrid of Gapado. Jeju,” Trans. KIPE, Nov. 2013
- [5] KEPCO 한국전력, “송·배전용 전기설비 이용규정 : 별표 6 신재생발전기 계통연계기준,” 2013.
- [6] USER’S GUIDE on the use of PSCAD/EMTDC, 2011
- [7] Seung-Ho Song, Tae-Hwa Kwon, “Firing Angle Control of Soft Starter for Reduction of Inrush Current during Grid Connection of Induction-type Wind Generator,” Trans. KIPE, Aug. 2005
- [8] Ahmed A. Daoud, Sobhy S. Dessouky, Ahmed A. Salem, “Control Scheme of PMSG Based Wind Trubine for Utility Network Connection,” Environment and Electrical Engineering(EEEIC), May. 2011
- [9] Jin Kyung-Min, Kim Seong Hyun, Kim Eel-Hwan, “Estimation of minimum BESS capacity for regulating the output of wind farms considering power grid operating condition in Jeju Island,” Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 33, No. 4, pp 39-45, Aug. 2013
- [10] P. Piagi, R.H. Lasseter, “Autonomous control of microgrids,” IEEE PES General Meeting, Jun. 2006

- [11] Fang Zheg Peng, Jih-Sheng Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems," Trans. IEEE on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No.1, pp 293-297, Fed. 1996
- [12] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, R.A. Belmans, "Voltage and frequency droop control method for parallel inverters," Trans. IEEE Power Electron, Vol. 22, No.4, pp 1107-1115, Jul. 2007
- [13] M.N. Marwali, A. Keyhani, "Control of distributed generation systems-Part I : Voltages and currents control", Power Electronics. Trans. IEEE , Vol. 19, pp 1541-1550, Nov. 2004

감사의 글

학부생 3학년 시절 호기심에 전력전자 연구실에 문을 두들겨 시작한 연구실의 일원으로 연구생을 시작한지 어느덧 4년의 세월이 흘러 이제는 졸업을 하게 되었습니다. 대학원을 다니며 연구실에서의 시간은 제 인생의 걸어갈 방향을 잡을 수 있었던 좋은 시간들이었습니다. 그 동안 제게 힘이 되어주신 모든 분들에게 이 글을 빌어 감사의 인사를 전하고자 합니다.

처음 연구실에 들어와서부터 논문이 완성된 지금까지 항상 부족한 저에게 아낌없는 조언과 밝은 에너지로 지도해주신 김일환 교수님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 본 논문의 완성도를 올려주시고 저희를 후배처럼 따뜻하게 지도해주신 김호민 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

풍력대학원 학생들에게 모든 지원을 아끼지 않으시는 허종철 교수님, 본 논문이 완성될 수 있도록 세심한 심사와 조언을 해주신 오성보 교수님, 김세호 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님께도 감사드립니다. 제주대학교 전기공학과와 발전에 위하여 항상 힘써주시는 전기공학과 교수님들, 풍력대학원의 설립을 위하여 항상 힘써주시는 풍력대학원 교수님들 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다.

또한 저와 함께 매일같이 늦은 밤까지 노력하는 연구실 식구들에게 고마움을 전하고 싶습니다. 친구 같은 형과 동생인 승현이형과 지한이와 때로는 협력하고 때로는 선의의 경쟁을 하며 같이 졸업하게 되어 기쁘고, 전력전자에 대해 잘 설명해주는 왓나우딩, 앞으로 연구실을 이끌어 갈 유능한 후배들인 도현, 우철, 승민, 송우에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 지금은 졸업했지만 처음 연구실에 들어와서부터 많은 도움을 주신 김재홍 박사님, 진홍이형, 대현이형, 익수형, 명석이형, 경민이형에게도 감사한다는 말을 하고 싶습니다. 그리고 전기공학과를 운영하는데 항상 최선을 다하는 강지훈, 고평강, 박승민조교 선생님들, 지금도 열심히 공부하고 있는 동우, 사일이형, 지형이형, 레탄등에게 많은 것을 배웠고 고마움을 느낍니다.

항상 응원해주는 수지, 졸업해서 잘 살고 있는 전기공학과 동기 친구들, 20대

초반에 좋은 추억을 만들어준 동아리 로망스 선 후배님들, 10년 지기 친구들인 21th 창민, 정민, 지현, 예술, 시준이 친구들에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 마지막으로 아버지, 어무니, 정아, 동규에게 고맙고 사랑한다는 말을 전해주고 싶습니다.

이외에도 제가 언급하지 못한 분들에게 죄송함을 느끼며 감사드립니다. 제 생활신조인 ‘현재에 최선을 다하자’를 되새기며 이제부터 또한 새로운 시작이라는 마음으로 최선을 다하여 삶을 살아가겠습니다.

2014년 6월

김 동 완 올림