

# 가파도 마이크로그리드 신재생 에너지 전원 구성 방안

## Renewable Energy Configuration Plan of Micro Grid in Gapa Island

김동완\* · 고지한\*\* · 김승현\*\*\* · 김호민\*\*\*\* · 김일환\*\*\*\*\*†  
Kim Dong-Wan\*, Ko Ji-Han\*\*, Kim Seong Hyun\*\*\*, Homin Kim\*\*\*\*,  
Kim Eel-Hwan\*\*\*\*\*†

(Submit date : 2013. 12. 4., Judgment date : 2013. 12. 11., Publication decide date : 2014. 4. 7.)

**Abstract :** This paper presents a renewable energy configuration plan of Micro grid in Gapa Island. To analyze the characteristics of Micro grid, BESS (Battery Energy Storage System), PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) and SCIG (Squirrel Cage Induction Generator) are first modelled. The PMSG and SCIG will operate with basis on the real power curve. when the total power demand is larger than the total power generation, the BESS will be operated and the SOC (State Of Charge) is reduced. If the value of SOC could drop down to limited value, the system may be broken because of the voltage drop of BESS. To solve this problem, a DG (Diesel Generator) is used to charge the BESS and keep the voltage value of BESS within a allowance limit. This paper represents simulation result when PMSG, SCIG connected to the Micro grid installed in Gapa Island. The simulation is carry out by using PSCAD/EMTDC program with actual line constant and transformer parameter in Gapa Island.

**Key Words :** Microgrid, BESS, PMSG, SCIG, SOC, PSCAD/EMTDC

### 1. 서 론

우리나라 정부는 제주도 대정읍 가파도를

마이크로그리드 기술을 활용하여 친환경적인  
섬으로 구축하고 있다. 마이크로그리드는 단  
독 운전이 가능한 소규모 전력망으로 정의 되

\*\*\*\*\*† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과  
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3678  
\* 김동완 : 제주대학교 풍력특성화 협동과정  
\*\* 고지한 : 제주대학교 풍력특성화 협동과정  
\*\*\* 김승현 : 제주대학교 전기공학과  
\*\*\*\* 김호민 : 제주대학교 전기공학과

\*\*\*\*\*† Kim Eel-Hwan(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Jeju National University  
\* Kim Dong-Wan : Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University  
\*\* Ko Ji-Han : Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University  
\*\*\* Kim Seong Hyun : Department of Electrical Engineering, Jeju National University  
\*\*\*\* Homin Kim : Department of Electrical Engineering, Jeju National University

며, 여러 분야의 신재생에너지와 에너지 저장 장치 등의 전원과 수용가인 부하들로 구성된다.<sup>1)</sup> 현재 가파도 계통은 150kW급 디젤 발전기 3기와 250kW급 농형유도 풍력발전기 2기 그리고 1MWh BESS의 전원과 50~250kW 수용가 부하들로 이루어져 있다.

본 논문의 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 가파도 계통을 모델링하고 풍력발전기를 설치하였을 때 BESS의 동특성 및 계통전압 안정도에 대해 분석하였다. 시뮬레이션은 두 가지 Case로 실행하였다. Case I은 모델링 된 가파도 계통에 250kW급 농형유도 풍력발전기 1기와 100kW급 영구자석형 풍력발전기 1기를 설치하였을 경우이며, Case II은 가파도 계통에 100kW급 영구자석형 풍력발전기 2기를 설치하였을 경우로 나누었다. 각 시뮬레이션에 따라, 가파도 마이크로그리드의 신재생에너지원으로 적합한 전원을 구성해 보았다. 더하여, 마이크로그리드에서 발생 가능한 최악의 경우를 고려하여, 각 시뮬레이션에서 풍력발전기가 모두 탈락하고 BESS의 잔존 용량이 한계점에 도달했을 때 기존에 설치된 디젤 발전기가 운전모드가 되어 부하에 전력 공급 및 배터리에 충전을 할 수 있도록 설계 하였다.

## 2. 전력품질 규정

국내 송배전 전기설비 이용규정의 분산형 전원 배전 계통연계규정에 따르면 분산전원이 계통에 접속된 후 분산설비의 운전 및 제어형태에 따라 계통의 전력품질이 영향을 받는데 이때 요구되는 배전용 전기설비 접속규정으로써 역률, 전압변동, 주파수, 고조파 전압 제한 등이 있다.

- 역률 : 분산전원의 역률은 PCC단에서 90%이상을 유지해야한다.

- 전압변동 : 순시전압변동은 발전원의 간헐성에 따라 3~5% 이내로 제한되어야 한다.
- 주파수 : 일반적인 계통 주파수 조정범위는  $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 로 정하고 있다.
- 고조파 전류 : 분산전원으로부터 계통에 유입되는 고조파 전류는 종합 전류 왜형률이 5%를 초과 하지 않도록 해야 한다.

## 3. 가파도 계통 모델링

### 3.1 BESS 모델링

BESS의 배터리 모델은 공칭전압 3.6V 180Ah의 정격용량을 갖는 리튬이온 배터리를 기준으로 모델링하였다. 배터리 모델은 Shepherd model을 참조하여 Fig. 1과 같이 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하였으며, 모델링에 필요한 각종 상수들은 배터리의 실제 방전곡선을 이용하여 도출하였다.<sup>2)</sup> 본 논문에서 사용된 BESS는 모델링 된 배터리를 직·병렬로 연결하여 직류전압 1200V의 1MWh 용량을 갖는 메인 전원으로 구성하였다.

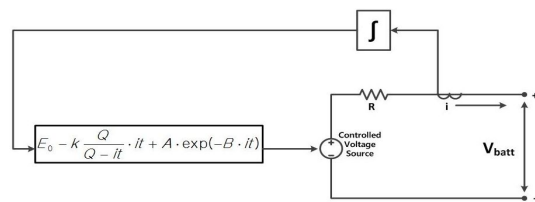


Fig. 1 Shepherd battery model

Fig. 2를 보면 리튬이온 배터리의 특성 상 SOC(State of charge)가 0.2 ~ 0.8 구간에서 전압은 선형적 특성, 다른 구간에서는 비선형적 특성을 보인다. 결국 선형적 특성구간에서만 제어가 가능하기에 본 논문에서는 배터리의 여유분을 두어 SOC의 0.26까지 사용할 수

있도록 하였다.

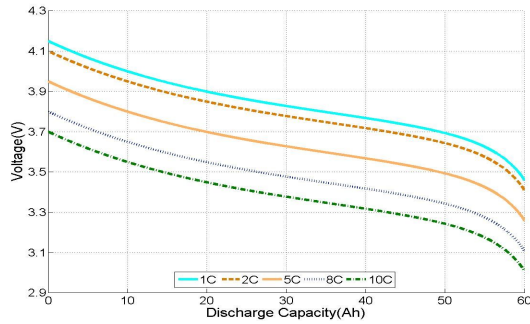


Fig. 2 The discharge curve of Li-Ion battery

배터리의 PCS에는 3상 전압원 인버터 1대와 LCL 필터로 구성 된다. 마이크로 그리드가 독립운전으로 운전하는 경우 인버터에서 전압 제어를 수행하고, 제어를 위한 위상각은 계통 전압이 아닌 60Hz 정격 주파수로 제어하여 위상각을 결정하였다.<sup>3,4)</sup> 마이크로 그리드내의 BESS 출력 제어 방법으로 전압제어모드와 전류제어모드로 두 가지로 분류할 수 있다. 전압제어모드는 전압, 주파수 유지를 위해 계통의 잉여 또는 부족전력을 PCS에서 임의로 충·방전을 시행 하는 방법이며 전류제어모드는 전압, 주파수 유지기능이 없고 EMS에서 지령받은 일정전력을 충·방전 하는 방법이다. 본 논문에서 독립운전중인 마이크로 그리드내에 BESS의 일정 출력 제어방법을 이용하면 발전량과 부하량에 실시간 제어가 불가능하므로 일정 출력을 충·방전하는 전류제어모드가 아닌 계통전압을 만들고 주파수 유지를 할 수 있는 전압제어모드로 설계하였다.

### 3.2 DG 모델링

본 논문의 시뮬레이션에서 사용된 디젤 발전기는 BESS의 정상운전 시, 발전을 하지 않는 대기모드이며, BESS의 배터리 SOC를 실시간

으로 체크하여 SOC가 한계점 이하로 떨어지면 운전모드로 전환할 수 있도록 모델링 하였다. 따라서 기존의 디젤 발전기는 150kW 용량을 갖는 3기의 서브 전원으로 구성하였다.

### 3.3 SCIG 모델링

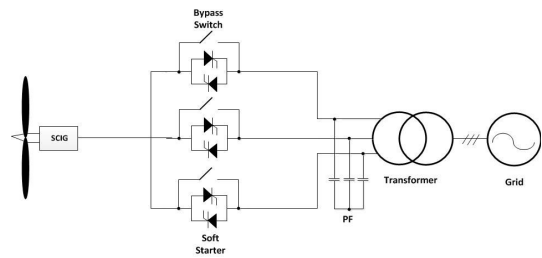


Fig. 3 SCIG system using soft starter

농형유도 풍력발전시스템에서 고정자를 직접 전력 계통에 연결하는 방식은 계통 연계시 과도 상태 돌입 전류의 크기가 정격전류의 7 ~ 8배 이상이 된다. 이를 방지하기 위해 소프트 스타터 제어 알고리즘을 사용하였다. 사이리스터의 초기 점호각 값과 점호각 지연시간은 과도상태 특성을 결정짓는 중요한 파라메타가 된다. 본 논문에서는 점호각 지연시간을 2초로 두어 초기 돌입 전류를 최소화 하였다.<sup>5)</sup>

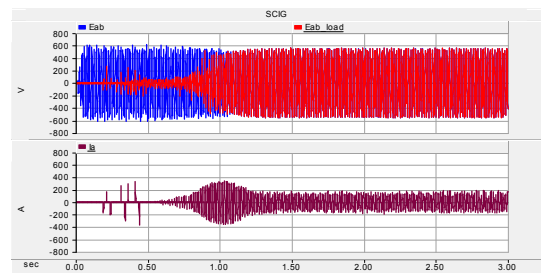


Fig. 4 Transient state of grid connection

Fig. 4는 풍력발전기의 계통 연계 시, 소프트 스타터에 의한 출력전압 및 상전류이다.

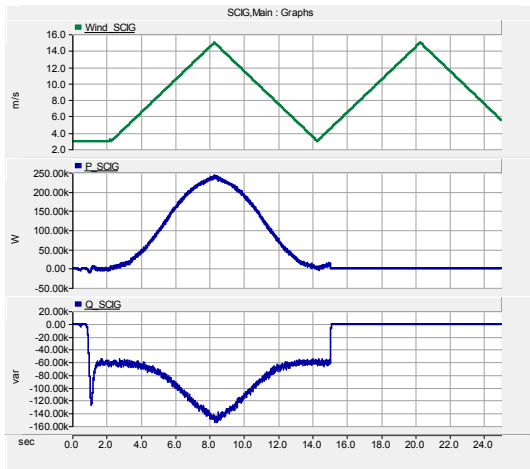


Fig. 5 SCIG system output power depend on wind speed

Fig. 5는 풍속 3 ~ 15m/s 사이로 가변 하였을 때의 농형유도 풍력발전기의 유·무효전력 파형이다. 풍속이 변동함에 따라 회전자계를 공급하는데 필요한 여자전류를 충당하기 위해서 연계된 전력계통으로부터 변동하는 무효전력을 소모하는 것을 볼 수 있다.<sup>6)</sup> 풍력발전기는 15초 이 후에 계통에서 탈락시켰다.

### 3.4 PMSG 모델링

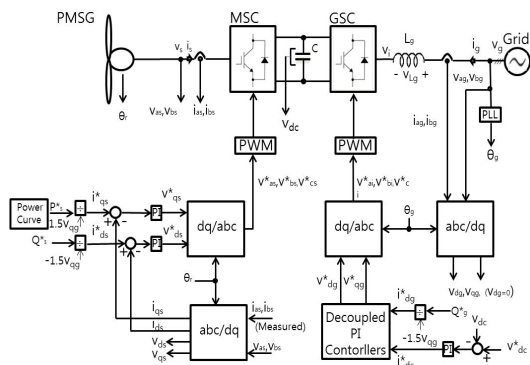


Fig. 6 Schematic diagram of PMSG system control

영구자석형 풍력발전기의 출력전압은 계통

전압과 동기 되지 않으므로 직접 계통에 연계할 수 없다. 때문에 PCS를 사용하여 계통 연계가 가능한 교류전력으로 변환시켜 계통연계를 한다. 제어 알고리즘으로는 MSC에서 발전기 측 유·무효전력을 제어하며, GSC에서는 계통 측 무효전력과 직류전압을 제어한다.<sup>7)</sup>

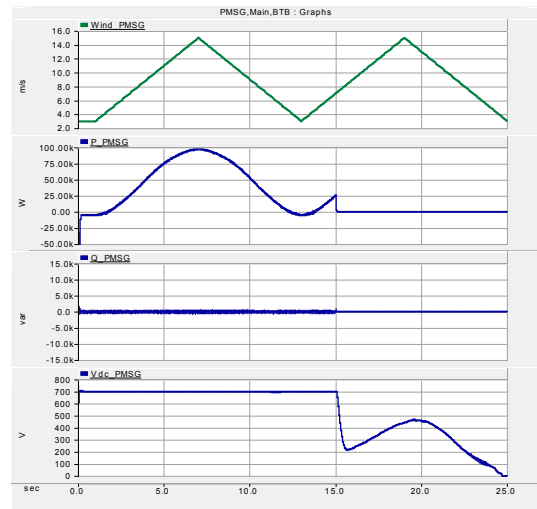


Fig. 7 PMSG system output power depend on wind speed

Fig. 7는 풍속 3 ~ 15m/s 사이로 가변 하였을 때의 영구자석형 풍력발전기의 유·무효전력 및 PCS의 직류전압 파형이다. 농형유도 풍력발전기와 달리 영구자석형 풍력발전기는 여자를 위한 별도의 전력을 공급하지 않아도 된다. 이 또한 정상상태 운전 중 15초 이 후 계통에서 탈락시켰다.

### 4. 가파도 계통 시뮬레이션

Fig 8, Fig. 12는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용한 가파도 전력계통 모델링이다. 본 논문의 시뮬레이션은 두 가지 Case를 고려하여 시뮬레이션 하였다.

- Case I : 250kW급 농형유도 풍력발전기 1기와 100kW급 영구자석형 풍력발전기 1기를 가파도 계통에 설치.
- Case II : 100kW급 영구자석형 풍력발전기 2기를 가파도 계통에 설치.

가파도 마이크로그리드에서 야기될 수 있는 최악의 경우로, 정상운전 중인 풍력발전기 2기를 15초에 탈락시켰으며, 배터리의 잔존용량이 한계점에 도달했을 때 대기 중인 디젤발전기가 투입되도록 설계하였다.

### 4.1 Case I

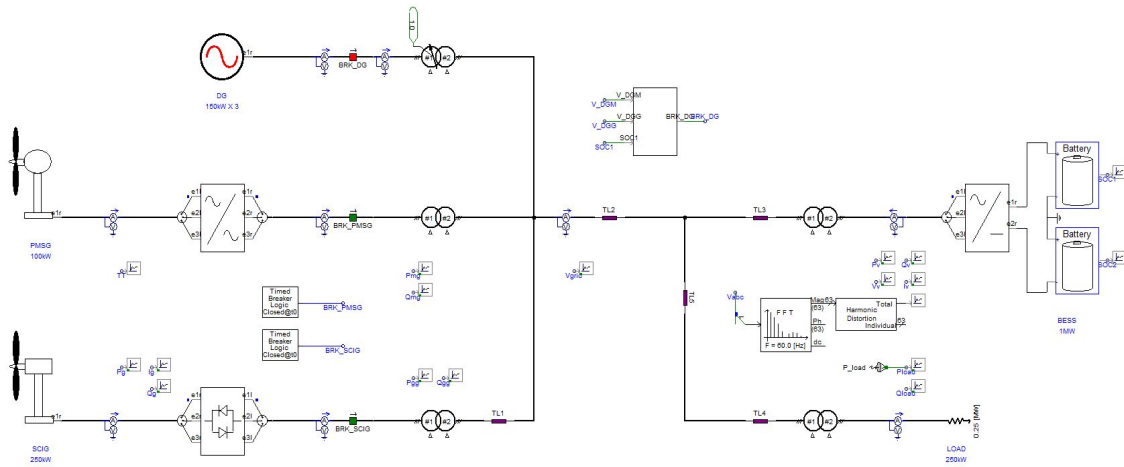


Fig. 8 Micro grid of Gapa Island (Case I)

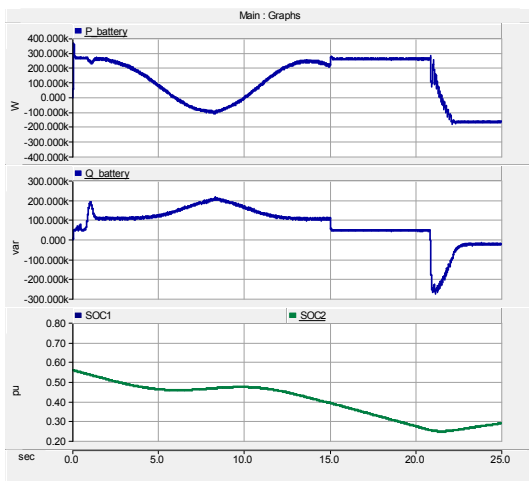


Fig. 9 BESS output power & SOC waveform (Case I)

형이다. BESS의 출력은 풍력발전기의 출력과 부하량에 따라 0을 기준으로 충·방전 하는 것을 볼 수 있다. 풍력발전기의 탈락 후에는 BESS에 의해서만 부하에 전력을 공급하기 때문에 SOC는 급감하다가 0.26이하가 되었을 때 디젤발전기의 투입으로 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

실제로는 1MWh BESS의 SOC가 시뮬레이션 시간인 25초 이내에서는 크게 변동하지 않는다. 이러한 경우, 시뮬레이션에서는 디젤발전기 투입을 보여줄 수 없기 때문에, BESS 특성은 그대로 두고 충·방전 기울기만을 크게 하여 SOC 변화량을 증가시켰다.

Fig. 9은 BESS의 유·무효전력 및 SOC 파

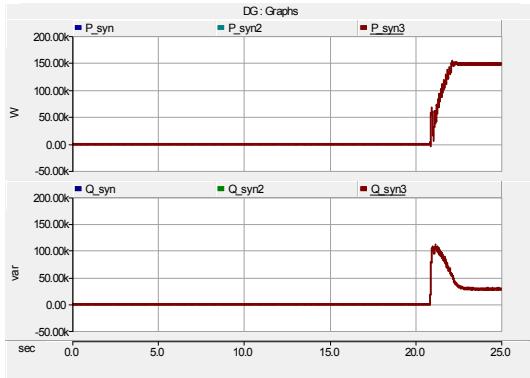


Fig. 10 Diesel generator output power (Case I)

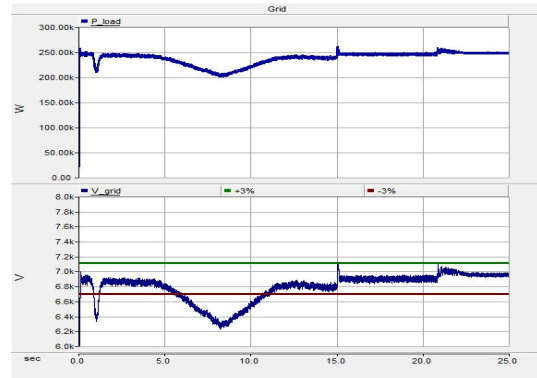


Fig. 11 Load power & grid voltage (Case I)

Fig. 10은 150kW급 디젤 발전기 3기의 출력 파형이다. SOC가 0.26이하일 때, 디젤발전기와 계통간의 동기투입 알고리즘을 이용하여 디젤발전기 투입 시 과도상태를 최소화하였다.

Fig. 5, Fig. 11에서 농형유도 풍력발전기는 풍속이 가변함에 따라 변동하는 무효전력을 소모하는데, 이 변동하는 무효전력은 연계된 전력계통의 전압안정도를 저하 시키는 원인이 된다. Case I의 경우 전압이 규정범위를 벗어나는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 Case II

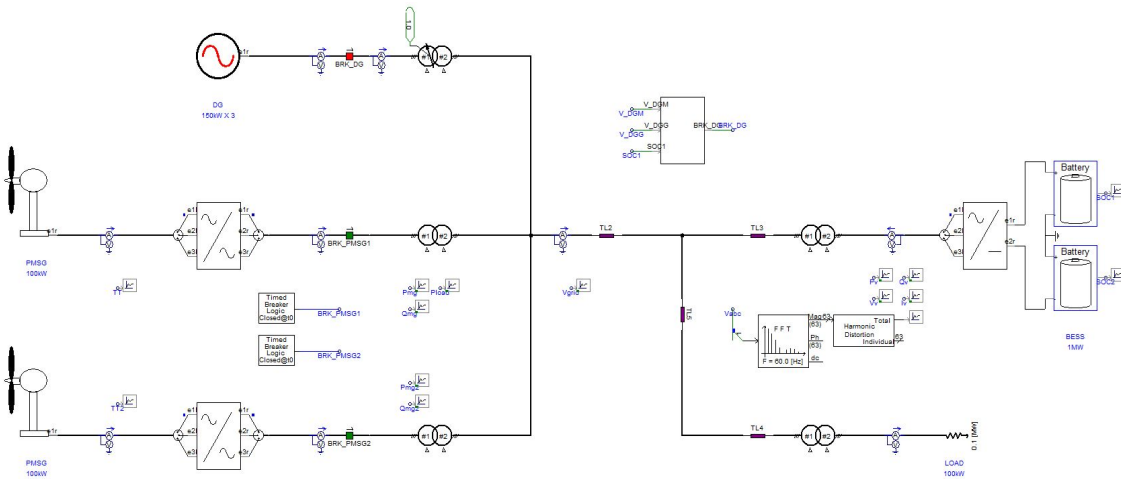


Fig. 12 Micro grid of Gapa Island (Case II)

Fig. 13는 BESS의 유·무효전력 및 SOC 파형이다. Case I과 비교하여 정상운전 시, 농형유도 풍력발전기의 여자에 필요한 전력 때문

에 BESS에서 무효전력이 발생하는데 Case II에서는 영구자석형 풍력발전기에 요구되는 무효전력이 없다는 것을 볼 수 있다.

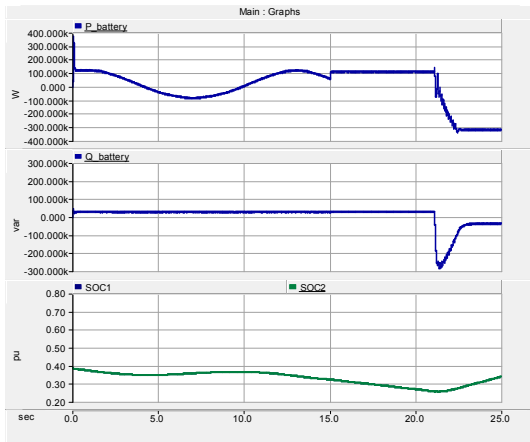


Fig. 13 BESS output power & SOC waveform (Case II)

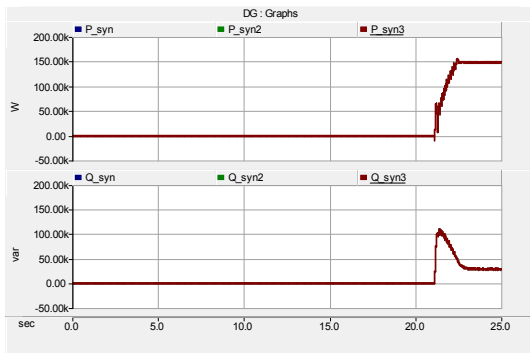


Fig. 14 Diesel generator output power (Case II)

Fig. 14의 디젤 발전기 또한 Case I과 동일한 운전조건을 갖는다.

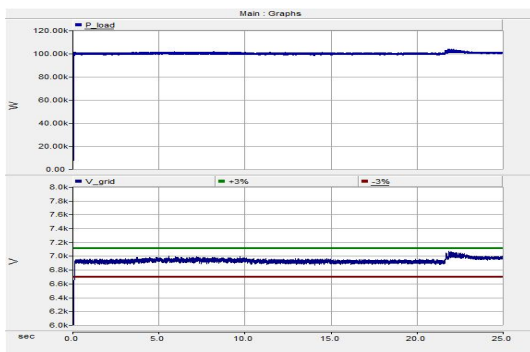


Fig. 15 Load power & grid voltage (Case II)

Fig. 15는 계통 전압 및 부하 전력파형이다. Case I과 비교하여 풍력발전기의 정상운전 시 BESS에서 무효전력이 발생하지 않아 계통전압의 흔들림이 없는 것을 볼 수 있다. Case II의 경우 전압이 규정된 제한범위 내에서 유지되고 있다.

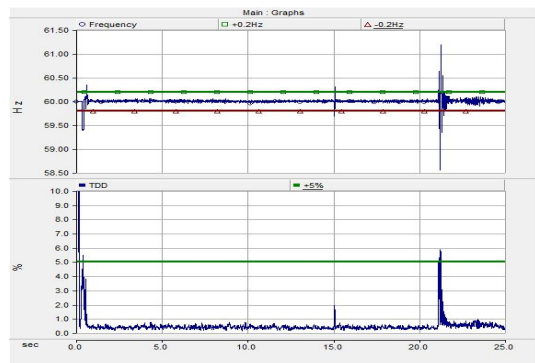


Fig. 16 Grid frequency & TDD (Case I)

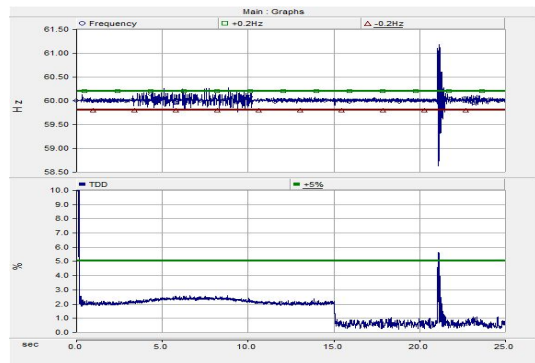


Fig. 17 Grid frequency & TDD (Case II)

Fig. 16, 17은 Case I 과 Case II의 경우 계통 주파수 및 TDD 고조파 전류 왜형률이다. 두 경우 모두 풍력발전기가 정상운전 시 규정범위 안에서 동작되고 있는 것을 볼 수 있다. BESS의 방전이 다되어 디젤발전기가 투입 하는 시점에 주파수 및 TDD가 순간 크게 변동하는 것을 볼 수 있으나 1~2초 이후 정상적인 규정범위 안에서 운전되고 있음을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 제주특별자치도 대정읍 가과도 마이크로그리드의 신재생 에너지 전원 구성 방안을 모색해 보았다. 시뮬레이션은 실제 가과도 선로 및 변압기 정수를 고려하여 정확한 결과를 얻는데 노력하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 농형유도 풍력발전기의 발전량이 증가함에 따라 흡수하는 무효전력량 또한 늘어나게 됨을 알 수 있다. 결국 소규모의 마이크로그리드에서 무효전력이 흔들리게 되면 계통전압이 흔들리는 악영향을 줄 수 있다. 이러한 문제점은 STATCOM등의 무효전력 보상장치를 설치하여 전력계통의 전압안정화를 향상 시킬 수 있을 것이다.

영구자석형 풍력발전기의 경우에는 PCS를 통해 계통 연계하기 때문에 무효전력이 발생하지 않아 풍속이 가변함에도 불구하고 계통전압을 일정하게 잡아주며 부하에 전력을 안정적으로 공급할 수 있다. 이를 통해 소규모의 마이크로그리드에서는 농형유도 풍력발전기보다 영구자석형 풍력발전기가 전압안정도에서 우수한 특성을 갖고 있음을 확인 할 수 있다.

## 후 기

「This work was supported by the Expansion of the Type Testing Site for Wind Turbines (NO.2012T100201731) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.」

「This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT), and Jeju Institute for Regional Program Evaluation through the Leading Industry Development for

Economic Region.」

## Reference

1. Kyebyung Lee, Kwang M. Son, Silsoo Jang, Implementation of Microgrid using Energy Storage System, Trans. KIEE, Vol 59, No 2, Feb. 2010
2. 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 Korean Solar Energy Society, Vol 33, No 4, 2013
3. Jong-Yul Kim, Seul-Ki Kim, June-Ho Park, Contribution of an Energy Storage System for Stabilizing a Microgrid during Islanded Operation, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol 4, No 2, 2009
4. Wujong Lee, Hyunsik Jo, Hank Ju Lee, Hanju Cha, Seamless Transfer Operation Between Grid-connected and Stand-Alone Mode in the Three-phase Inverter, Trans. KIEE, Vol 62, No 2, 2013
5. 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. KIEE, Vol 10, 2005
6. Ji-Heon Lee, Myong-Bo Shim, Hye-Yeon Lee, Byung-Moon Han, Seung-Chul Yang, Operational Analysis of Energy Storage System to Improve Performance of Wind Power System with Induction Generator, Trans. KIEE, Vol 58, No 6, Jun, 2009
7. Ahmed A. Daoud, Sobhy S. Dessouky, Ahmed A. Salem, Control Scheme of PMSG Based Wind Trubine for Utility Network Connection, 10th International Conference on Environment and Electircal Engineering(EEEIC), May, 2011