creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

碩士學位論文

마이크로그리드의 분산전원 출력 조절을 위한 MVDC 제어

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學科

申 賢

2021 年 8 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

마이크로그리드의 분산전원 출력 조절을 위한 MVDC 제어

指導敎授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2021 年 8 月

申 賢의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ㊞

委 員 _____ ㊞

委 員 _____ ㊞

濟州大學校 大學院

2021 年 8 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Control Scheme of MVDC in Microgrid for Adjusting Output of Distributed Sources

Hyun Shin
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL JEJU NATIONAL
UNIVERSITY

2021. 8.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

그림 목차 ····· ii
표 목차 ····· iii
SUMMARY ····· iv

1. 서 론 ····· 1

2. 제안된 마이크로그리드 운영 방안 ····· 3
2.1 MVDC Master 제어 ····· 3
2.2 분산전원 Slave 제어 ····· 8

3. 컴퓨터 시뮬레이션 ····· 14
3.1 전원별 모델링 ····· 15
3.2 시뮬레이션 결과 ····· 29
3.3 결과 고찰 ····· 37

4. 결 론 ····· 38

참 고 문 헌 ····· 40

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

그 림 목 차

Fig. 1 Microgrids with MVDC ····· 3
Fig. 2 DC link voltage control of MVDC ····· 3
Fig. 3 Master control of MVDC ····· 5
Fig. 4 Schematic diagram of constant voltage controller ····· 6
Fig. 5 Slave control of BESS ····· 8
Fig. 6 Slave control of DG ····· 9
Fig. 7 Slave control of PV ····· 10
Fig. 8 Slave control of WTG ····· 11
Fig. 9 Automated operation control of the whole power system ····· 12
Fig. 10 Isolated Microgrid PSCAD/EMTDC modeling ····· 14
Fig. 11 MVDC PSCAD/EMTDC modeling ····· 15
Fig. 12 MVDC simulation results 1 ····· 16
Fig. 13 MVDC simulation results 2 ····· 17
Fig. 14 BESS PSCAD/EMTDC modeling ····· 18
Fig. 15 BESS simulation results ····· 19
Fig. 16 DG PSCAD/EMTDC modeling ····· 20
Fig. 17 DG simulation results ····· 21
Fig. 18 PV PSCAD/EMTDC modeling ····· 22
Fig. 19 PV Controller of DC/DC converter ····· 22
Fig. 20 PV simulation results 1 ····· 24
Fig. 21 PV simulation results 2 ····· 25
Fig. 22 WTG PSCAD/EMTDC modeling ····· 26
Fig. 23 WTG Controller of generator-side converter ····· 26
Fig. 24 WTG simulation results 1 ····· 28
Fig. 25 WTG simulation results 2 ····· 28
Fig. 26 Grid frequency in MG #2 ····· 29
Fig. 27 DC link voltage of MVDC ····· 30

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 28 Simulation results 1 – scenario 1 ····· 31
Fig. 29 Simulation results 2 – scenario 1 ····· 32
Fig. 30 Renewable energy sharing ····· 32
Fig. 31 Grid frequency in MG #2 ····· 34
Fig. 32 DC link voltage of MVDC ····· 34
Fig. 33 Simulation results – scenario 2 ····· 36

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

표 목 차

Table 1. Automated operation parameters of MVDC ····· 12
Table 2. Automated operation parameters of BESS ····· 13
Table 3. Automated operation parameters of PV and WTG ····· 13
Table 4. Automated operation parameters of DG ····· 13
Table 5. Detailed parameters for the MVDC ····· 15
Table 6. Detailed parameters for the BESS ····· 18
Table 7. Detailed parameters for the PV ····· 23
Table 8. Detailed parameters for the WTG ····· 27
Table 9. Expression of simulation results - Active & Reactive power ····· 29

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

In isolated microgrids, power system reliability and stability problems arise with peak demand load and renewable power generation facilities. In order to solve such surplus power and insufficient power problems, research on the balance of power supply and demand through bi-directional power trans -mission in connection with other systems using MVDC (Medium voltage direct current distribution) or HVDC (High voltage direct current transmission) is being actively conducted.

This paper proposes a method to automatically control distributed power output by connecting MVDC between microgrids. The proposed method operates a microgrid based on the constant voltage variable frequency control of MVDC. In addition, the power supply and demand situation of the connected microgrid is identified through the magnitude of the DC link voltage. According to the frequency determined in MVDC, the output of BESS(Battery energy storage system) is adjusted, and MPPT(Maximum power point tracking) control, or curtailment control, is performed for wind power generation and photovoltaics. Also, depending on the frequency, the diesel generator starts and stops to supply power at peak load.

To verify the proposed protection system, an isolated microgrid was modeled through the PSCAD/EMTDC program. According to simulation analysis results, it was confirmed that all power generation facilities would automatically control the output according to the frequency determined by MVDC.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 온실가스 감축을 위해 기존 전력망에 재생에너지 설비 구축이 확대되고 있다. 특히 국내의 마라도, 가파도, 가사도 그리고 해외의 스페인 카나리제도, 포르투갈 아소르스제도, 남아메리카 갈라파고스제도 등과 같이 소규모 독립형 전력계통으로 구성된 도서지역은 화석 연료 기반의 디젤발전기(Diesel generator: DG) 기동을 최소화하고 에너지저장장치(Battery energy storage system: BESS) 및 태양광발전(Photovoltaics: PV) 그리고 풍력발전기(Wind turbine generator: WTG)와 같은 재생에너지 비중을 증가시키고 있다[1-3]. 하지만 재생에너지의 출력, 피크부하와 같은 수요 및 공급을 예측하기 어려운 상황이 발생하면 전력계통의 안정성에 문제가 야기될 수 있다[4-7]. 이와 같이 잉여전력과 부족전력 문제를 해결하기 위해 고압직류배전(Midium voltage direct current distribution: MVDC) 또는 초고압직류송전(High voltage direct current transmission: HVDC)으로 양방향 전력 전송을 통한 마이크로그리드 간 전력 수급 균형 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-11].

연계된 마이크로그리드 간 분산전원의 구성 및 용량, 전력 부하의 크기는 다르기 때문에 한 계통에서 재생에너지의 잉여전력이 발생함과 동시에 다른 계통에는 전력이 부족한 경우가 생길 수 있다. 이러한 상황에서 잉여전력을 다른 계통 측으로 전송하고, DG의 고장 혹은 유지보수 시에도 필요전력을 전송한다면 마이크로그리드 간에 협조 운영을 할 수 있다. 그러나 마이크로그리드 간의 계통 운영 정보가 없는 상태에서 전력 전송 혹은 수전이 이루어진다면 계통 운영상의 문제가 발생할 우려가 있다.

따라서 본 논문에서는 마이크로그리드 간에 MVDC를 연계하여 계통 운영자의 지시 없이 분산전원 출력을 제어할 수 있는 방안을 제안한다. 이때 기존의 회전기 기반 전력계통 운영과 달리 MVDC의 정전압 가변주파수 제어를 기반으로 계통을 운영한다[12]. 또한 DC 링크 전압의 크기를 통해 연계된 마이크로그리드의 계통 전력수급 상황을 파악한다. 계통의 전압은 13.8 kV로 정전압제어되며, 60 Hz를 기준으로 MVDC를 통해 송·수전하는 전력이 ±2 MW로 도달할수록 주파수를 상향 및 하향 조정하는 가변주파수제어를 수행한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이에 따라 선정된 기준 이하로 주파수가 감소하면 BESS가 드룹계수에 비례한 전력을 공급하게 된다. 만일 계통에 첨두부하가 발생할 경우 DG가 전력공급에 기여한다. 그리고 선정된 기준 이상으로 주파수가 증가하면 WTG 및 PV는 각 드룹계수를 통해서 출력제한 제어를 수행한다[13-15].

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 제안된 마이크로그리드 운영 방안

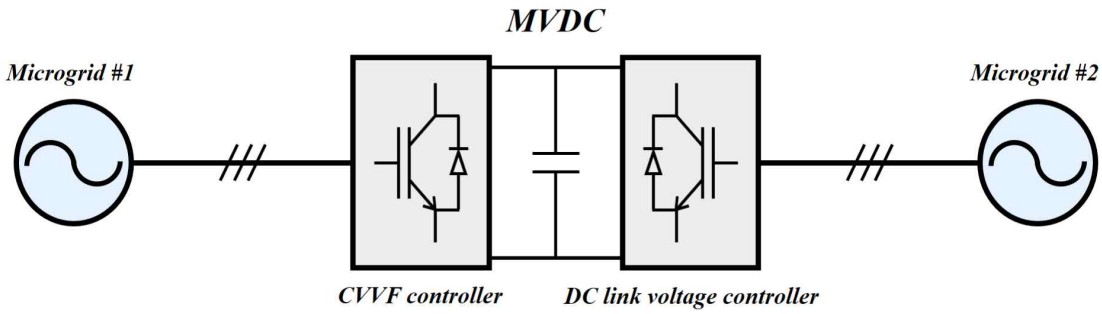


Fig. 1 Microgrids with MVDC

일반적으로 도서지역의 독립형 마이크로그리드는 13.8 kV, 22.9 kV와 같이 낮은 전압으로 운영되고 있다. 이에 따라 Fig. 1과 같은 배전급 전압에 적용될 수 있는 MVDC를 통해 마이크로그리드 간에 협조 운영이 가능하다. 본 논문에서는 마이크로그리드 #2(MG #2) 측의 계통 상황을 MVDC DC 링크 전압을 통해 나타내고, 이에 따라 마이크로그리드 #1(MG #1)의 분산전원 출력 조절을 명령하는 계통 기준 주파수를 결정한다.

2.1 MVDC Master 제어

2.1.1 DC link 전압 제어 컨버터

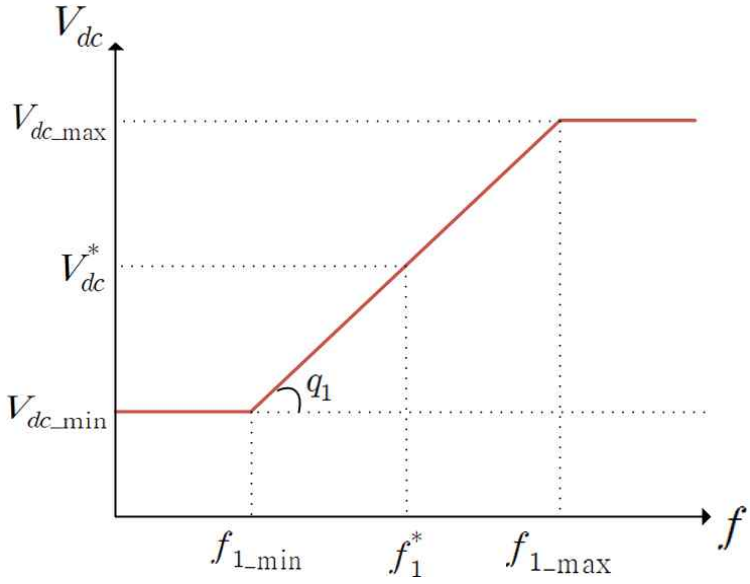


Fig. 2 DC link voltage control of MVDC

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$V_{dc}=\begin{cases} V_{dc_\max} & : f_1 \geq f_{1_\max} \\ V_{dc}^{*}+q_1(f_1-f^{*}) & : f_{1_\min} < f_1 < f_{1_\max} \\ V_{dc_\min} & : f_1 \leq f_{1_\min} \end{cases} \quad (1)$$

$$q_1=\frac{V_{dc_\max}-V_{dc_\min}}{f_{1_\max}-f_{1_\min}} \quad (2)$$

MG #2의 전력 수급 상황에 따라 MG #2의 주파수가 변화할 수 있다[12]. 따라서 Fig. 2와 같이 MG #2의 주파수를 고려하여 MVDC의 DC 링크 전압을 가변시킴으로써 MG #1에서 MG #2로 송전 혹은 수전의 가능여부를 판단 할 수 있도록 한다. 식 (1)과 같이 $f_{1_\max}$와 $f_{1_\min}$의 범위 이내에서 식 (2)의 드룹계수를 적용하여 V_{dc}를 값을 계산 할 수 있다. 이때 MVDC 기준 링크 전압인 V_{dc}^{*}는 16 kV이며, $V_{dc_\max}$와 $V_{dc_\min}$은 IEC 61975 규정에 따라 V_{dc}^{*} ± 10%인 17.6 kV, 14.4 kV로 설정하였다. 또한 MG #2의 f_1^{*}은 60 Hz이며 $f_{1_\max}$과 $f_{1_\min}$는 60 ± 0.2 Hz로 지정하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.1.2 정전압 가변주파수 제어 컨버터

회전기 기반의 발전기가 아닌 MVDC가 MG #1에 기준이 되는 전압과 주파수를 생성한다. Fig. 3에서 MVDC로 송·수전하는 유효전력의 크기에 따라 주파수를 결정하고, Fig. 4와 같이 정전압 제어를 수행하여 MG #1을 운영한다.

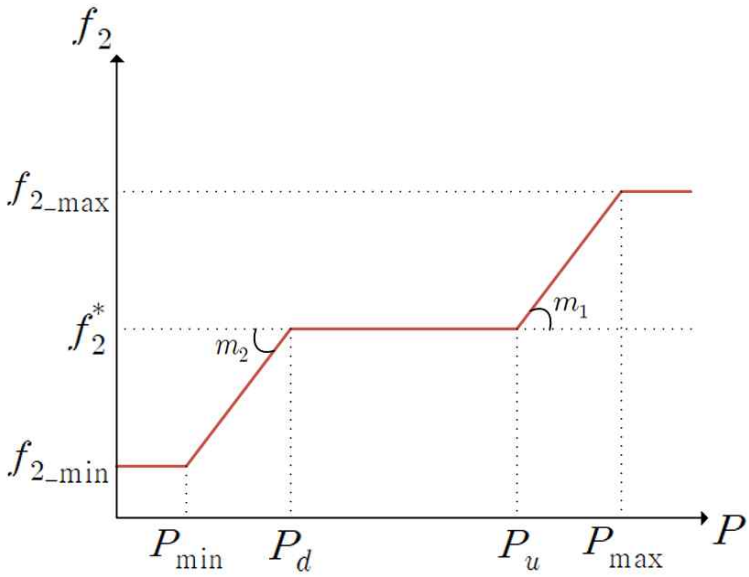


Fig. 3 Master control of MVDC

$$f_2 = \begin{cases} f_2^* + m_1(P - P_u) & : P_u < P \le P_{\max} \\ f_2^* & : P_d \le P \le P_u \\ f_2^* - m_2(P_d - P) & : P_{\min} \le P < P_d \end{cases} \tag{3}$$

$$m_1 = \frac{f_{2_\max} - f_2^*}{P_{\max} - P_u} \tag{4}$$

$$m_2 = \frac{f_2^* - f_{2_\min}}{P_d - P_{\min}} \tag{5}$$

$$f_{meas} = \frac{1}{\sigma s + 1} f_2 \tag{6}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

앞서 언급한 바와 같이 MVDC로 송・수전하는 유효전력의 크기를 기반으로 주파수를 결정한다. 결정된 주파수를 통해 모든 분산전원의 출력을 통신선 없이 자동으로 제어할 수 있다.

우선 V_{dc}^{*}의 ± 5% 이내에서는 MVDC를 통한 MG #1과 MG #2 간에 송・수전이 가능하도록 한다. 이때 식 (3)에 따라 MVDC의 송・수전 값이 P_d와 P_u 범위 내에 있으면 주파수는 f_2^{*}로 유지된다. P_d는 -1.3 MW P_u은 +1.3 MW로 선정하였으며, f_2^{*}는 60 Hz로 설정하였다. 또한 재생에너지의 발전량이 많아 MVDC를 통해 송전되는 전력이 1.3 MW를 초과하거나 혹은 재생에너지 발전량이 저조하여 MG #2로부터 수전되는 전력이 1.3 MW를 초과하게 되면 식 (3)에 따라 주파수가 상향 및 하향된다.

V_{dc}^{*}가 ± 5%를 초과하면 MG #2의 전력 수급이 불안정한 상태로 판단할 수 있다. 이와 같은 상황에서는 MVDC를 통한 송・수전이 불가능하다. 이에 따라 P_d와 P_u는 0 MW로 설정하여 주파수를 가변할 수 있도록 하였다. 식 (3)의 m_1과 m_2는 식 (4), (5)에서 계산된다. 여기서 $P_{\max}$, $P_{\min}$은 MVDC의 용량인 ±2 MW 이며, $f_{2_\max}$와 $f_{2_\min}$는 60 ± 0.2 Hz로 지정하였다. 이때 결정된 주파수는 빠른 변동성을 줄이기 위해 저역통과필터를 고려하여 f_{meas}로 식 (6)과 같이 표현 하였다. σ는 저역통과필터의 시간 상수이다.

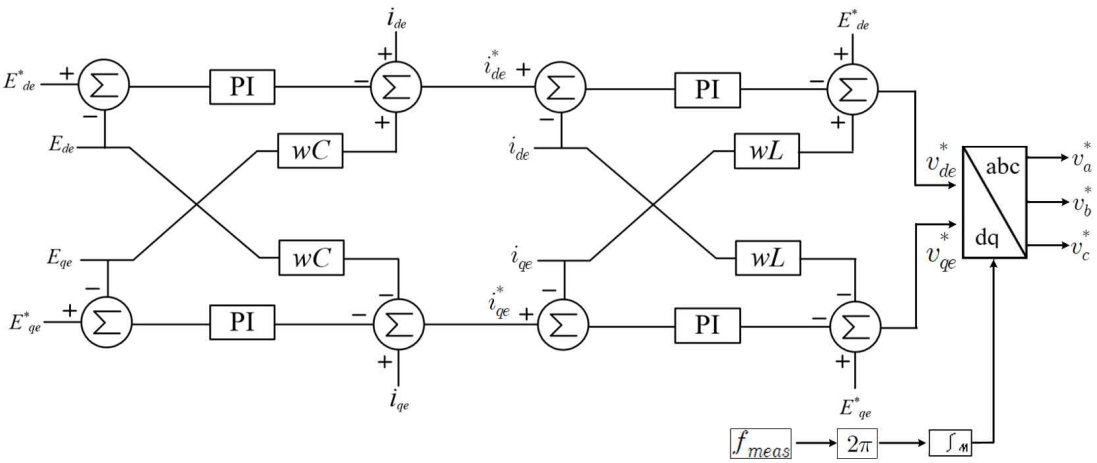


Fig. 4 Schematic diagram of constant voltage controller

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$E_{de}^{*} = 0$$
$$E_{qe}^{*} = V_{m} \quad (7)$$

Fig. 4는 MVDC의 PI 제어기를 사용한 정전압 제어 블록 다이어그램이다[16-19]. 일반적으로 전력변환장치의 PI 제어는 3상 전압과 전류를 dq transformation을 사용하여 동기좌표계로 변환 후 직류 전압, 전류로 제어한다. 이때 상호 간섭 성분을 제거하여 각 d축, q축 전압과 전류 성분을 독립적으로 제어 할 수 있다[20],[21].

블록다이어그램에서 i_{de}, i_{qe}는 계통 dq 전류, C는 필터커패시턴스, L은 필터인덕턴스, ω는 계통 각주파수이다. 그리고 E_{de} 및 E_{qe} 전압 지령치는 식 (7)과 같다. 식 (3)에서 계산된 주파수를 통해 위상각을 생성하고, E_{de}와 E_{qe}를 역변환하여 MVDC의 3상 abc 지령 전압으로 결정한다. 이를 통해 MG #1에 기준이 되는 전압을 제공한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2 분산전원 Slave 제어

2.2.1 BESS Slave 제어

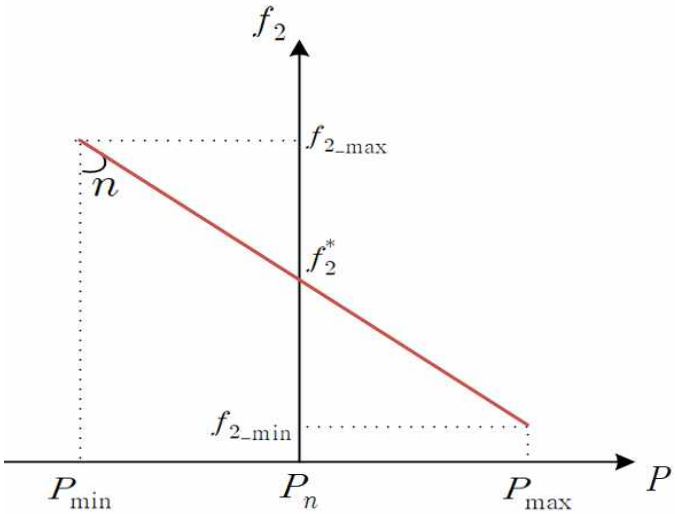


Fig. 5 Slave control of BESS

$$P=\begin{cases} P_{max} & : f_2 = f_{2_max} \\ P_n + n(f_2 - f_2^*) & : f_{2_min} < f_2 < f_{2_max} \\ P_{min} & : f_2 = f_{2_min} \end{cases} \quad (8)$$

$$n=\frac{P_{min}-P_{max}}{f_{2_max}-f_{2_min}} \quad (9)$$

Fig. 5는 BESS의 Slave 제어를 나타낸 그림이다. 만일 MVDC에서 생성된 f_{meas}가 f_2^* 미만으로 감소하게 되면 식 (8)과 같이 적용되어 전력 공급에 기여할 수 있도록 한다. f_{meas}가 f_2^* 를 초과할 경우에는 BESS가 충전되어 전력을 수급에 균형을 맞출 수 있도록 한다. 위 식에서 적용된 드룹계수 n은 식 (9)에서 계산되었다. P_{min}과 P_{max}는 각 BESS의 PCS 용량인 ±2 MW이며, P_n은 0 MW이다. BESS는 실제 운영 시 잔존용량(State of charge: SoC) 가용 범위 이내에서 위의 제어가 수행되어야 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2.2 DG Slave 제어

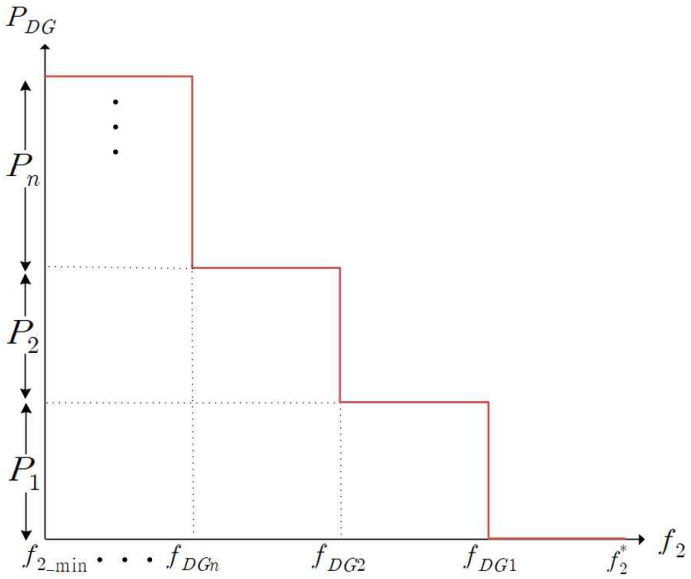


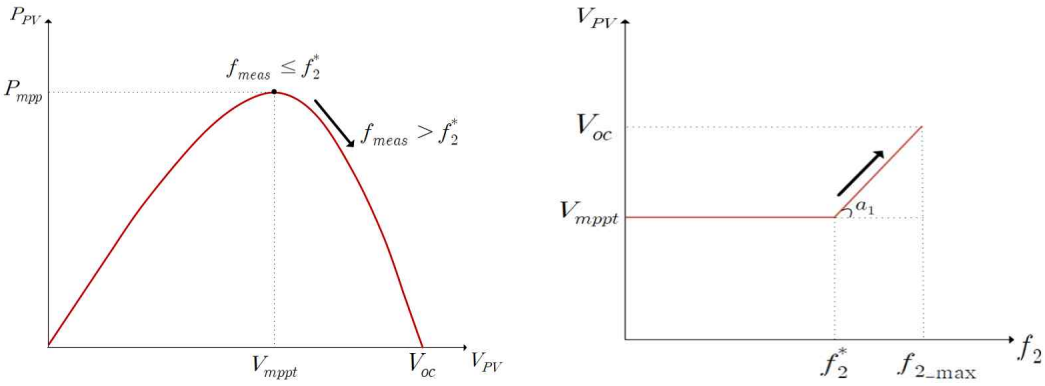
Fig. 6 Slave control of DG

$$P=\begin{cases} P_1 & : f_{meas} < f_{DG1} \\ P_1+P_2 & : f_{meas} < f_{DG2} \\ \sum_{n=1}^{k} P_n & : f_{meas} < f_{DGn} \end{cases} \tag{10}$$

Fig. 6은 MG #1에 포함된 DG의 Slave 제어를 나타낸다. 식 (10)에 따라 f_{meas}가 설정 주파수 미만으로 떨어질 경우 기동이 빠른 발전기가 순차적으로 투입되어 전력을 공급한다. 본 논문에서는 주파수가 f_{DG1}, f_{DG2} 미만으로 감소할 경우에 두 대의 650 kW DG가 순차적으로 기동하도록 하였다. 이때 f_{DG1}은 59.9 Hz로 f_{DG2}는 59.85 Hz로 설정하였고, 실제 운영 시 운전 가능한 발전기 대수 k에 따라 f_n을 설정하여 추가적으로 발전기를 운전할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2.3 PV Slave 제어



(a) (b)

Fig. 7 Slave control of PV

$$V_{PV} = \begin{cases} V_{mppt} & : f_{meas} \le f_2^* \\ V_{mppt} + a_1(f_{meas} - f_2^*) & : f_{meas} > f_2^* \end{cases} \quad (11)$$

$$a_1 = \frac{V_{oc} - V_{mppt}}{f_{2_\max} - f_2^*} \quad (12)$$

Fig. 7 (a)는 PV의 최대출력점추종(Maximum power point tracking: MPPT) 제어 곡선을 나타낸다[22-25]. 식 (11)에서 f_{meas}가 f_2^* 이하일 경우에는 PV는 MPPT 제어를 수행한다. 하지만 재생에너지 발전량이 많아 Fig. 3의 P_u 이상으로 전력을 송전하게 된다면 주파수가 상승한다. 이에 따라 Fig. 7 (b)와 같이 식 (12)에서 계산된 드룹계수 a_1만큼 PV의 전압을 상승시켜 PV 출력을 낮추는 자동출력제한 제어를 한다. 컴퓨터 해석 시 적용된 V_{oc}는 660 V, V_{mppt}는 530 V이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2.4 WTG Slave 제어

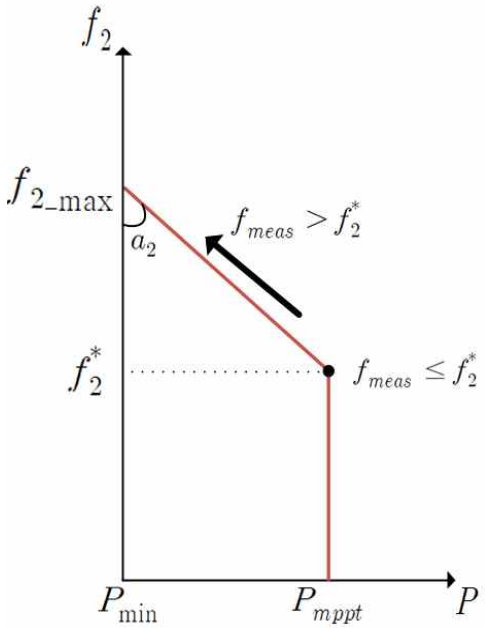


Fig. 8 Slave control of WTG

$$P=\begin{cases} P_{mppt} & : f_{meas} \le f_2^* \\ P_{mppt} - a_2(f_2^* - f_{meas}) & : f_{meas} > f_2^* \end{cases} \tag{13}$$

$$a_2 = \frac{P_{\min} - P_{mppt}}{f_{2_\max} - f_2^*} \tag{14}$$

Fig. 8은 WTG의 Slave 제어를 나타낸 그림이다. WTG의 출력은 식 (13)에서 계산된 값에 따라 제어된다. PV 제어와 동일하게 f_{meas}가 f_2^* 이하일 경우 MPPT 제어를 수행한다. 하지만 f_{meas}가 f_2^*를 초과할 경우 식 (14)에 계산된 드룹계수를 적용하여 WTG 출력이 결정된다. 이때 $P_{\min}$은 0 MW, P_{mppt}는 2 MW이다. 따라서 MVDC에서 생성된 주파수가 상승할수록 WTG의 출력을 자동으로 낮추는 지령을 생성한다[26-28].

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

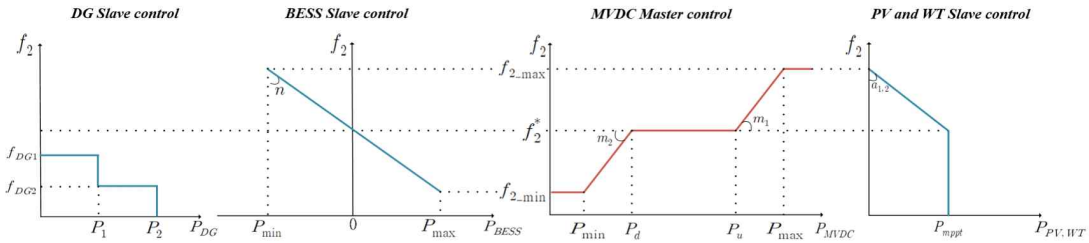


Fig. 9 Autonomous operation control of the whole power system

본 논문에 적용된 MG #2 전체의 Master-slave 제어는 Fig. 9와 같다. MVDC의 Master 제어를 기반으로 BESS, DG, PV 그리고 WTG가 Slave 모드로 동작하여 계통을 자동으로 운영한다.

각 시스템의 계산된 드룹계수 값은 Table 1-4에 나타내었다. Table 1의 MVDC의 드룹계수는 정격용량과 설정된 상·하한 출력 값을 통해 계산되었다. MVDC의 링크전압이 V_{dc}^{*} ± 5% 이내인 경우 송·수전이 가능하며, 이때의 주파수는 60 Hz를 기준으로 ±0.28 Hz/MW로 변동하여 정해진다. 만일 V_{dc}^{*} ± 5% 범위를 벗어난다면 송·수전이 불가능하며, 드룹계수는 0.1 Hz/MW로 적용된다. BESS의 출력은 f_{2_max}와 f_{2_min} 범위 내의 주파수 변동에 따라 결정된다. 이때 적용된 드룹계수는 Table 2의 -10 MW/Hz 이다. Table 3의 PV 및 WTG는 f_2^{*} 이하인 경우엔 MPPT 제어를 수행한다. 만일 f_{meas}가 f_2^{*}를 초과한다면 출력제한제어를 수행한다. PV는 0.65 kV/Hz의 드룹계수에 따라 PV 전압 값을 조절하여 출력제한제어를 수행하며, WTG는 -10 MW/Hz의 드룹계수를 적용하여 출력을 제한한다. MG #1의 첨두부하를 담당하는 두 대의 650 kW DG는 Table 4와 같이 설정된 주파수 f_{DG1}, f_{DG2} 미만으로 감소함에 따라 운전된다.

Table 1. Automated operation parameters of MVDC

Parameters	Symbols	Values
MVDC		
Maximum power [MW]	$P_{\max}$	2
Minimum power [MW]	$P_{\min}$	−2
Upper power [MW]	P_u	1.3 / 0
Low power [MW]	P_d	−1.3 / 0
Droop factor [Hz/MW]	m_1, m_2	0.28 / 0.1

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2. Automated operation parameters of BESS

Parameters	Symbols	Values
BESS		
Maximum power [MW]	$P_{\max}$	2
Minimum power [MW]	$P_{\min}$	−2
Droop factor [MW/Hz]	n	−10

Table 3. Automated operation parameters of PV and WTG

Parameters	Symbols	Values
PV		
Open circuit voltage [kV]	V_{oc}	0.66
Mpp voltage [kV]	V_{mppt}	0.53
Droop factor [kV/Hz]	a_1	0.65
WTG		
Maximum power [MW]	$P_{\max}$	2
Minimum power [MW]	$P_{\min}$	0
Droop factor [MW/Hz]	a_2	−10

Table 4. Automated operation parameters of DG

Parameters	Symbols	Values
Diesel generator 1		
Rated power [kW]	P_1	650
Setting frequency [Hz]	f_{DG1}	59.9
Diesel generator 2		
Rated power [kW]	P_2	650
Setting frequency [Hz]	f_{DG2}	59.85

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 컴퓨터 시뮬레이션

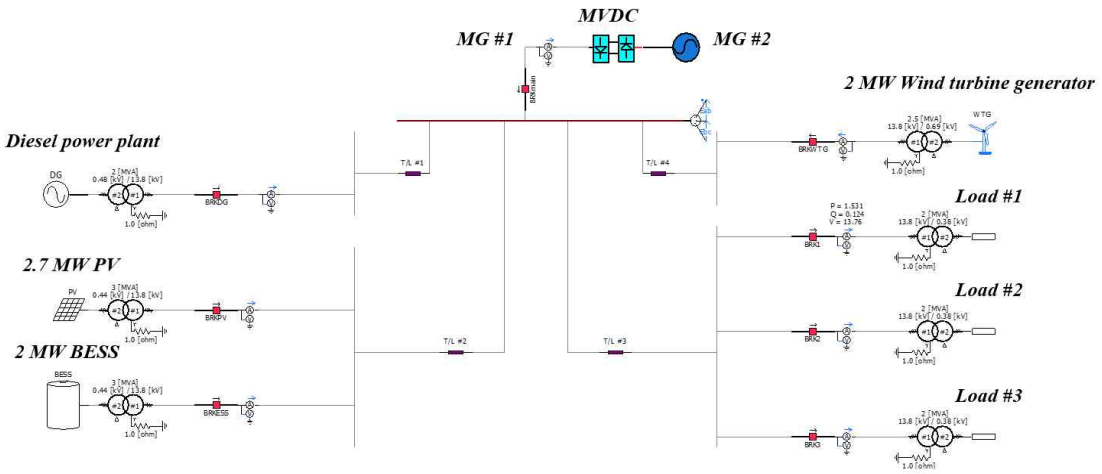


Fig. 10 Isolated microgrid PSCAD/EMTDC model

본 논문에서 제안된 방안을 검증하기 위한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델링은 Fig. 10과 같다. MG #1과 MG #2를 2 MW MVDC로 연계하여 모델링 하였다. MG #1의 평균 전력부하는 3 MW이며, 분산 전원은 DG, PV, WTG 그리고 BESS로 구성되어있다. DG는 650 kW 두 대 그리고 BESS는 2.095 MWh의 배터리를 2 MW PCS와 연계하여 모델링하였다. 또한 2.7 MW PV 및 2 MW WTG의 재생에너지 설비를 설계하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1 전원별 모델링

3.1.1 MVDC 모델링

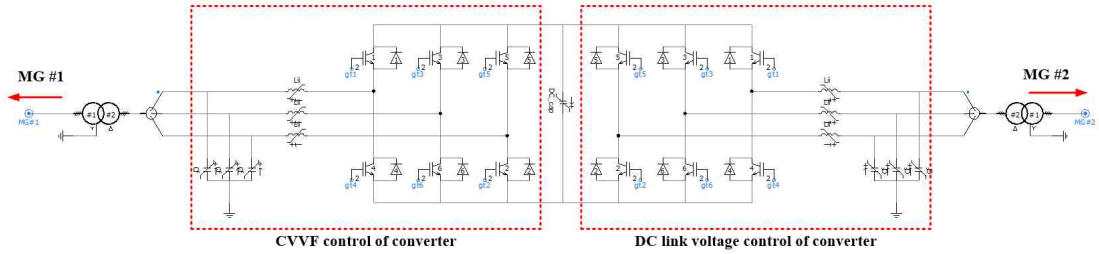


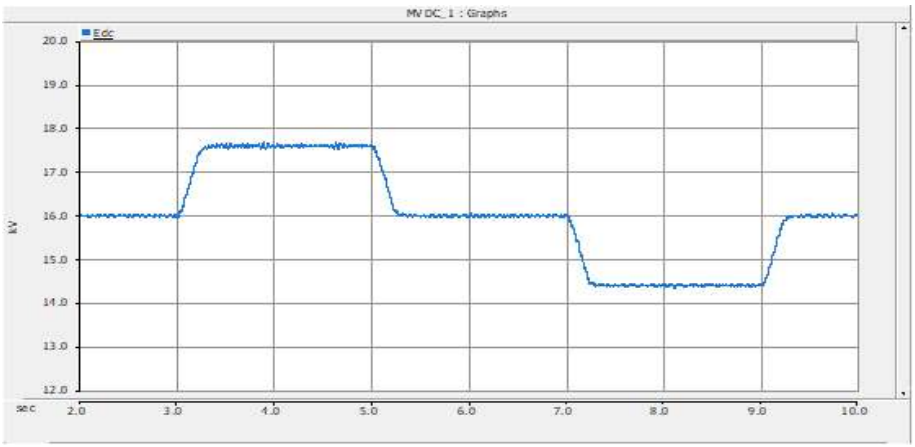
Fig. 11 MVDC PSCAD/EMTDC model

MVDC는 2 MW 양방향 전압형 컨버터로 Fig. 11과 같이 모델링 하였다[29],[30]. 시뮬레이션 모델은 MG #2측 컨버터에서 Fig. 2에서 나타낸 DC 링크 전압 제어를 수행하며, MG #1측 컨버터에서 Fig. 3, Fig. 4의 정전압 가변주파수제어를 수행하도록 하였다. MVDC의 상세 파라미터는 Table 5에서 나타내었다.

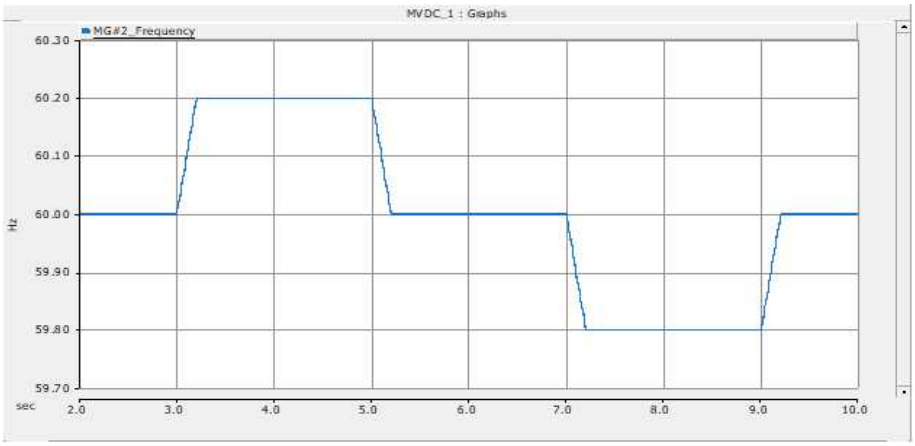
Table 5. Detailed parameters for the MVDC

Parameters		Values
MVDC	Rated power [MW]	2
	Filter inductance [mH]	2
	Filter capacitance [uF]	12
	Switching frequency [Hz]	2500
	DC link capacitance [uF]	2200
	DC link voltage [kV]	16

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

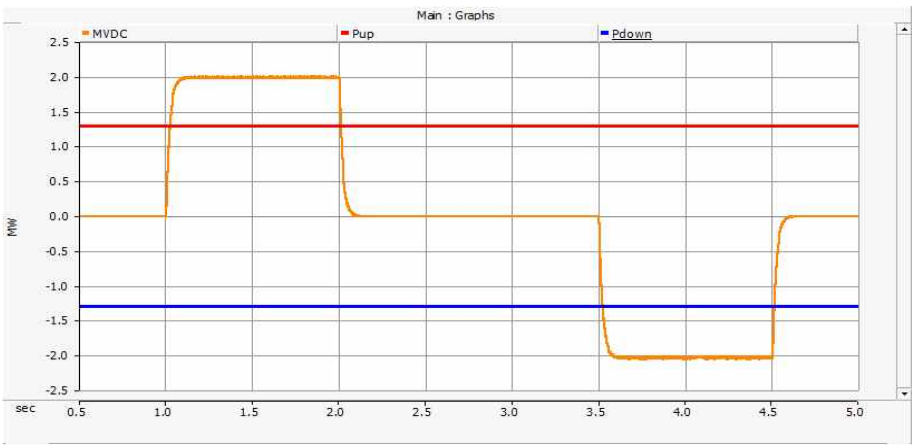


(a) DC link voltage



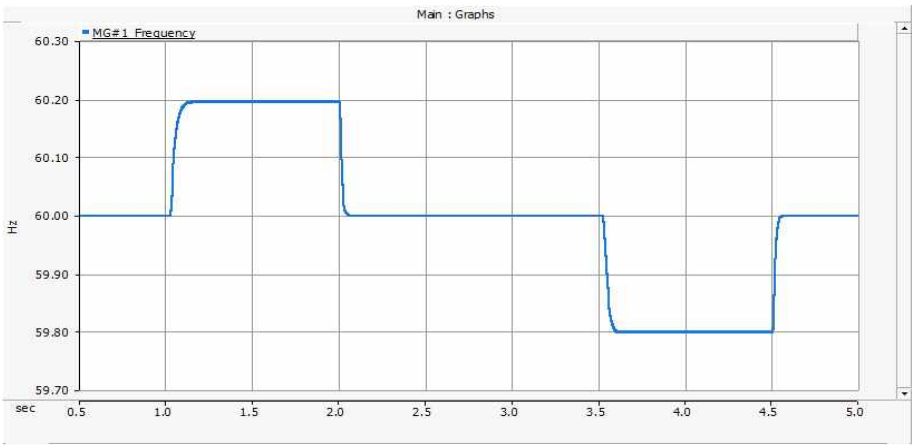
(b): Grid frequency of MG #2

Fig. 12 MVDC simulation results 1

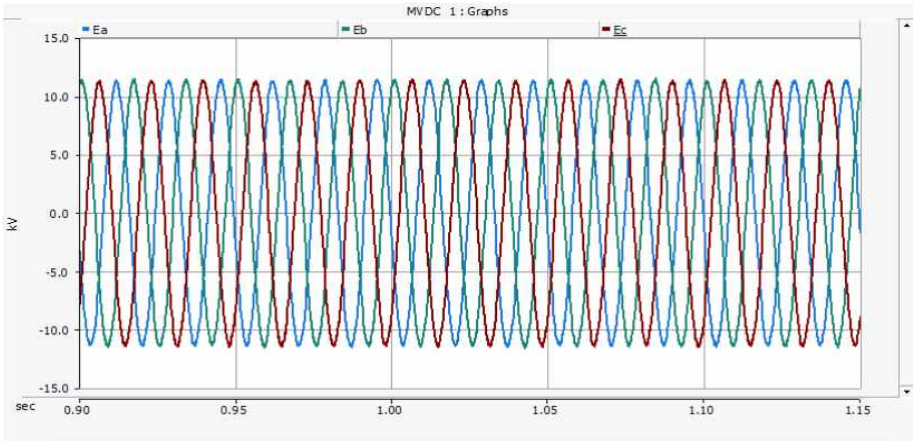


(a) Active power

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b): Grid frequency of MG #1



(c) Instantaneous 3-phase voltage of MG #1

Fig. 13 MVDC simulation results 2

Fig. 12는 MG #2의 주파수에 따른 MVDC DC 링크 전압 결과를 나타낸 파형이다. MG #2의 기준 주파수인 60 Hz에서는 16 kV로 DC 링크 전압이 유지되며, 60 Hz 기준으로 ± 0.2 Hz 상향 및 하향 되었을 때 DC 링크 전압이 ±10%인 17.6 kV, 14.4 kV로 제어된다.

Fig. 13은 MVDC의 유효전력에 따른 MG #1의 주파수를 나타낸 파형이다. Fig. 3에서 설정한 상한 및 하한 출력 값인 ±1.3 MW을 초과할 때 주파수가 60 ± 0.2 Hz 이내로 결정된다. 또한 MG #1의 계통 전압은 13.8 kV로 정전압 제어하였다. 이는 Fig. 13 (c)에서 각 상전압의 최대값이 11.2 kV로 제어됨을 통해 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.2 BESS 모델링

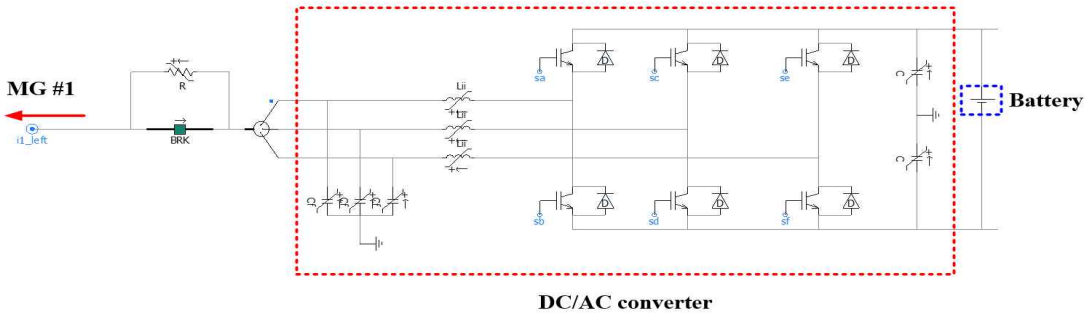
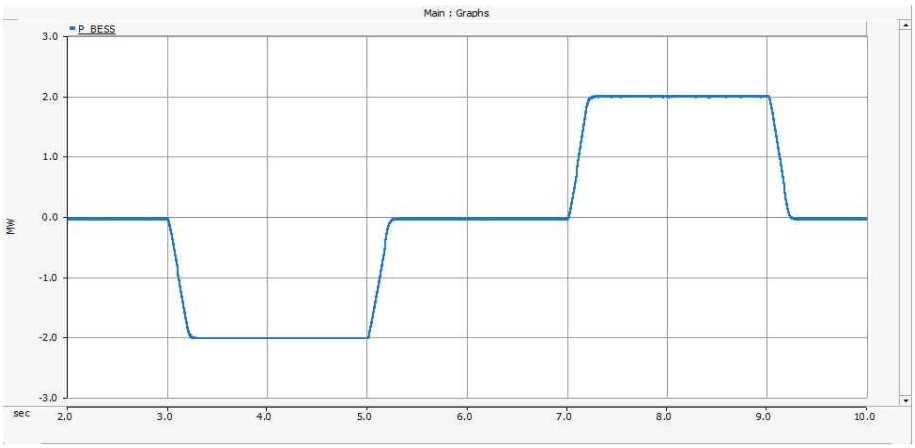


Fig. 14 BESS PSCAD/EMTDC model

Fig. 14와 같이 BESS는 2 MW DC/AC 컨버터와 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 배터리 모델을 연계하여 모델링하였다. 결정된 주파수에 따라 DC/AC 컨버터 용량에 알맞게 충전 및 방전한다. BESS의 배터리 용량 및 컨버터의 세부 파라미터는 Table 6과 같다.

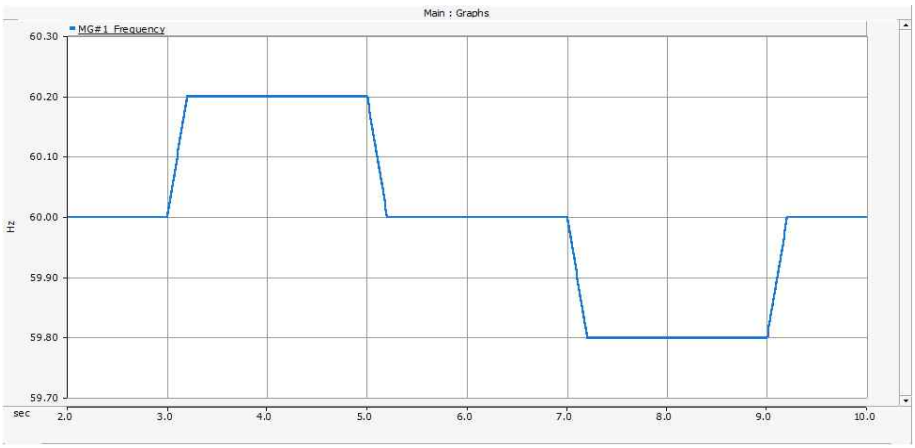
Table 6. Detailed parameters for the BESS

Parameters		Values
BESS	Battery capacity [MWh]	2.095
	Converter capacity [MW]	2
	Filter inductance [mH]	0.05
	Filter capacitance [uF]	50
	Switching frequency [Hz]	2500
	DC link capacitance [Hz]	1100
	DC link voltage [kV]	1

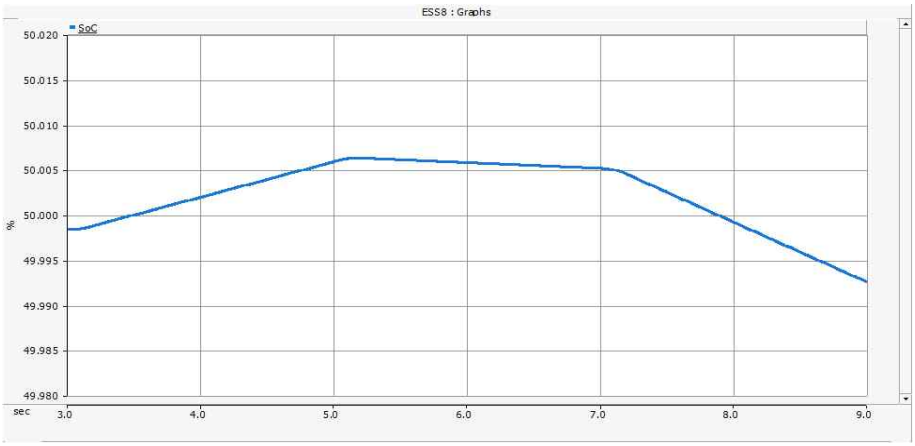


(a): Active power

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b): Grid frequency of MG #1



(c): SoC

Fig. 15 BESS simulation results

BESS는 60 Hz에서 운전 대기 상태이며, 3초에 Fig. 15(b)의 주파수가 60 Hz 초과하였을 때 설정된 드룹계수에 따라 BESS의 출력이 음의 방향으로 증가하여 배터리를 충전한다. 또한 7초에 60 Hz 미만으로 주파수가 감소하면 BESS의 출력이 양의 방향으로 증가하여 전력 공급에 기여한다. BESS의 배터리의 충·방전 상태는 Fig. 15 (c)의 SoC를 통해 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.3 DG 모델링

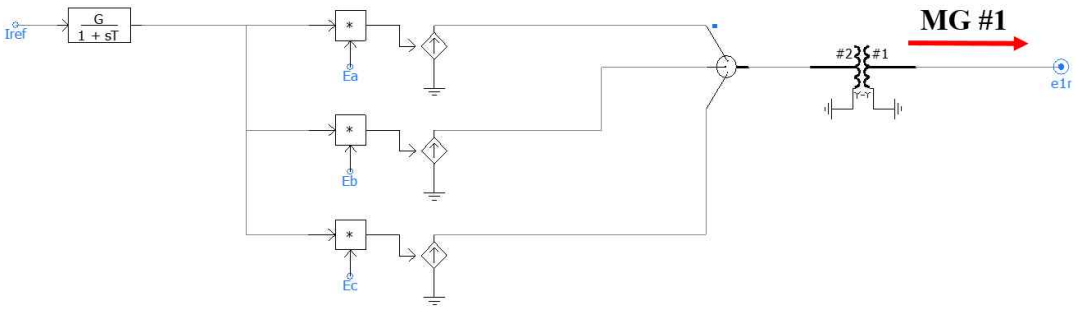
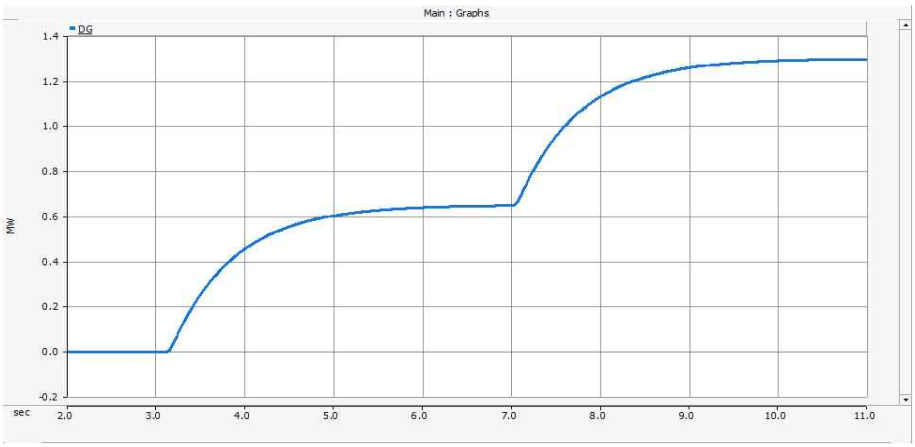


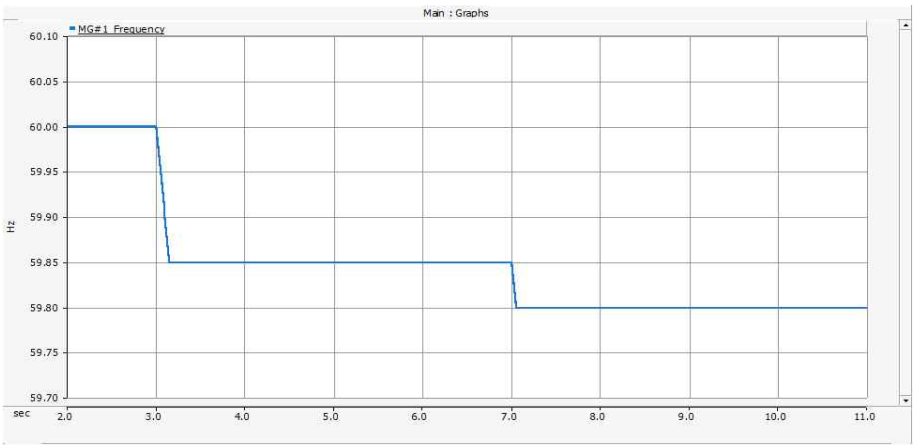
Fig. 16 DG PSCAD/EMTDC model

Fig. 16은 650 kW DG의 PSCAD/EMTDC 모델링이다. 컴퓨터 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해 등가 전류원으로 모델링하였고, 발전기의 관성을 고려하기 위해 저역통과필터를 추가하였다. 결정된 유효전력을 전류로 변환 후 가변 전류원의 지령 전류 값으로 설정하여 Fig. 17(a)와 같이 출력을 발생하도록 설계하였다. 3초에 59.9 Hz 미만으로 주파수가 감소하여 650 kW 발전기 한 대가 기동한다. 만일 59.85 Hz 보다 낮아질 때엔 650 kW DG를 추가 기동하여 계통에 전력을 공급한다.



(a): active power

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b): Grid frequency of MG #1

Fig. 17 DG simulation results

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.4 PV 모델링

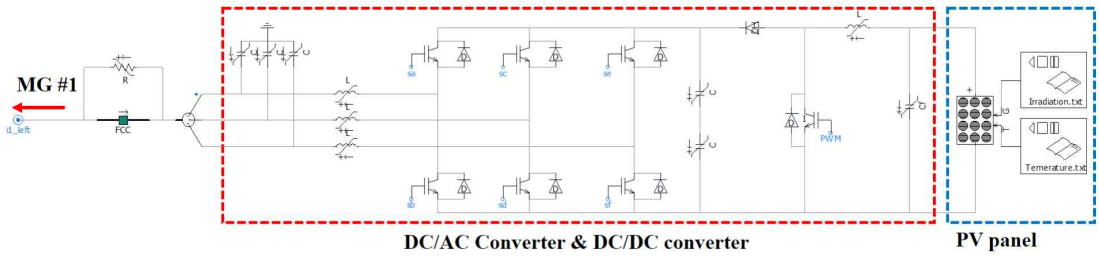


Fig. 18 PV PSCAD/EMTDC model

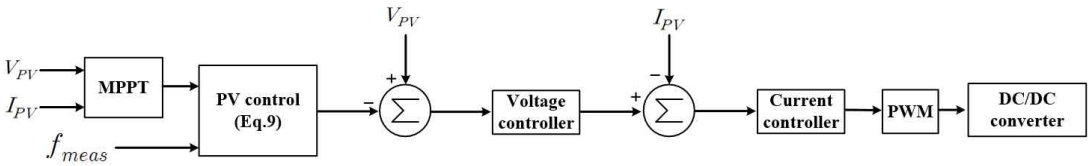


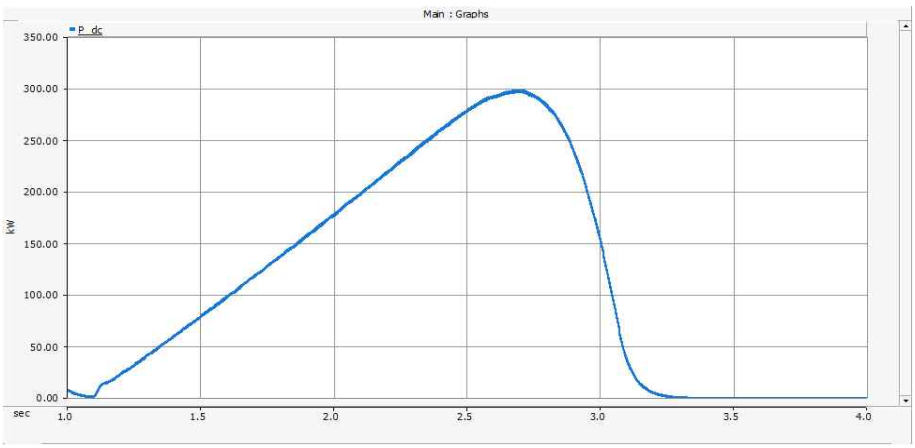
Fig. 19 PV Controller of DC/DC converter

Fig. 18에서는 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 PV 라이브러리를 사용하여 300 kW PV 모델을 설계하였다. DC/AC 컨버터를 통해 DC 링크 전압을 수행하며, DC/DC 컨버터는 결정된 주파수에 따라 식(11)의 MPPT 제어 혹은 출력제한 제어를 수행한다. DC/DC 컨버터의 제어블록다이어그램은 Fig. 19와 같이 설계하였다. 또한 에콰도르 갈라파고스제도에서 측정된 일사량과 온도 데이터를 반영하여 실제 출력과 유사하도록 모델링하였다. PV의 어레이 및 컨버터의 세부 파라미터는 Table 7과 같다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

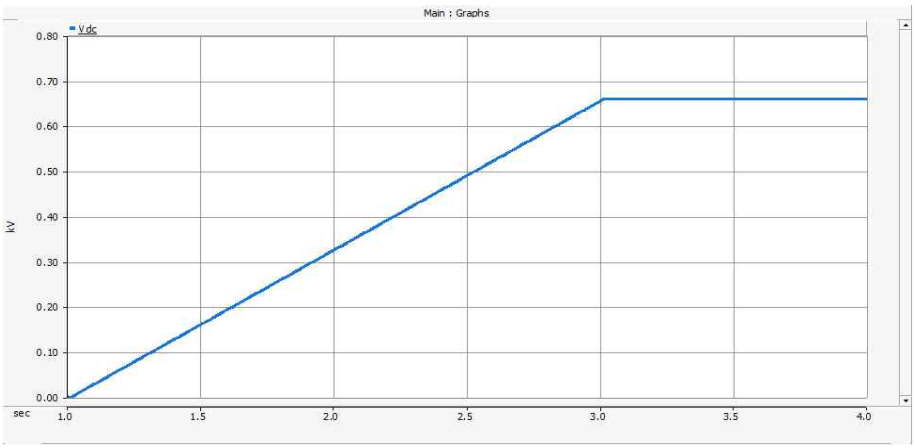
Table 7. Detailed parameters for the PV

Parameters			Values
PV	PV array	Open circuit voltage [kV]	0.66
		Short circuit current [kA]	0.628
		Maximum voltage [kV]	0.53
		Maximum power [kW]	300
		Number of modules in series per array	22
		Number of modules in parallel per array	250
	DC/AC converter	Filter inductance [mH]	2.5
		Filter capacitance [uF]	0.8
		Switching frequency [Hz]	2500
		DC link capacitance [uF]	1950
		DC link voltage [kV]	1
	DC/DC converter	Inductance [uH]	100
		Capacitance [uF]	1000
		switching frequency [Hz]	2000



(a): Power of PV

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

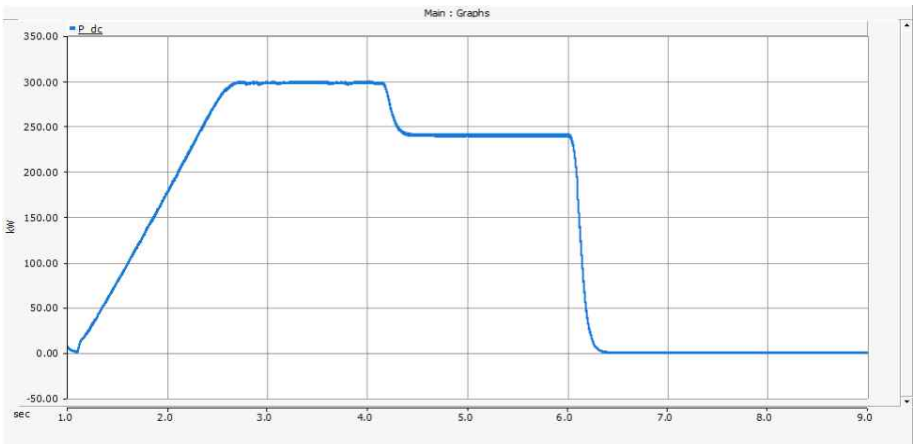


(b): Voltage of PV

Fig. 20 PV simulation results 1

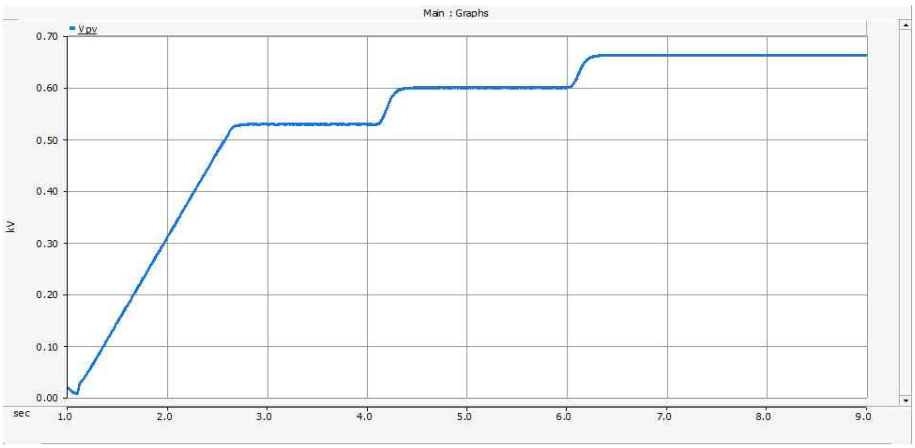
Fig. 20 (a)는 300 kW PV의 MPPT 곡선을 나타낸다. 일사량과 온도가 충분할 경우 PV의 전압 값에 따라 최대전력점이 결정된다. 이때 최대출력점의 전압은 0.53 kV이며, 개방전압은 0.66 kV임을 Fig. 20 (b)를 통해 알 수 있다.

Fig. 21에서 60 Hz 이하에서 PV는 MPPT 제어를 수행한다. 하지만 4초에 Fig. 21 (c)와 같이 60 Hz 이상으로 주파수가 증가할 때 식 (12)에서 계산된 드룹계수에 따라 PV 전압을 상승시켜 출력을 낮춘다. 그리고 6초에 주파수 상한선인 60.2 Hz에 도달하면 PV 전압이 개방전압까지 상승하여 PV 출력이 0 kW가 된다.

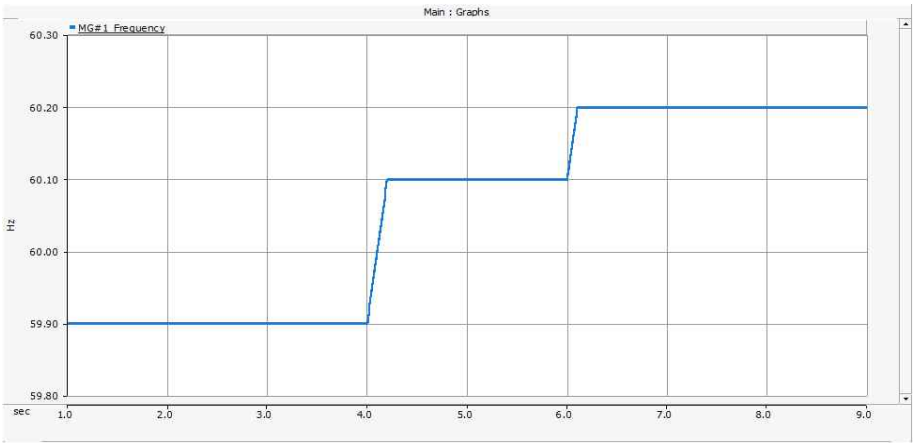


(a): Power of PV

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b): Voltage of PV



(c): Grid frequency of MG #1

Fig. 21 PV simulation results 2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.5 WTG 모델링

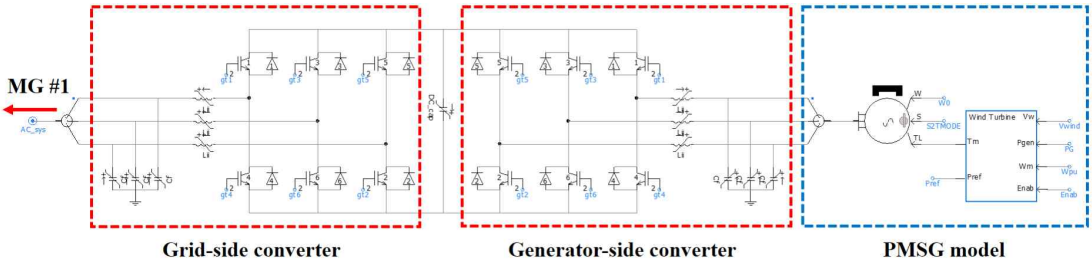


Fig. 22 WTG PSCAD/EMTDC model

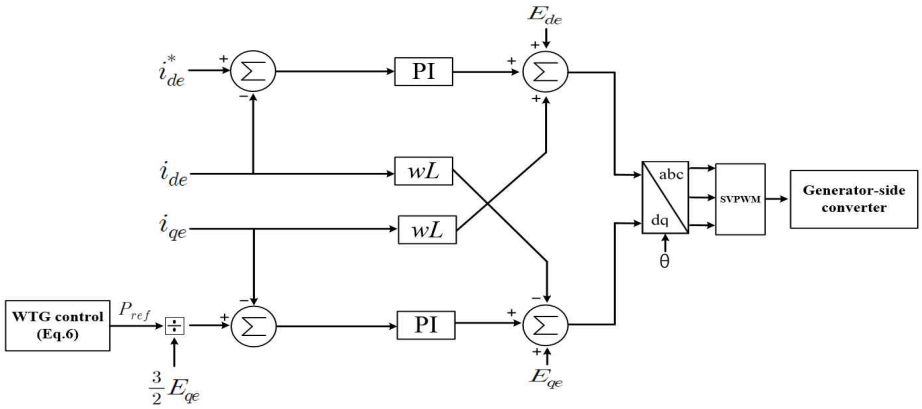


Fig. 23 WTG Controller of generator-side converter

본 논문에서 MG #1에 연계된 WTG의 발전기 모델은 Fig. 22와 같이 PSCAD 예제 파일에서 제공된 2 MW 영구자석 동기발전기(Permanent magnet synchronous generator: PMSG)타입 WTG 모델을 사용하여 모델링하였다. 이때 터빈 모델은 실제 GE 社의 모델을 적용하였다. PMSG WTG는 출력을 제어하기 위해 전력변환장치로 계통과 연계되어 있다. 계통 측 컨버터는 DC 링크 전압제어를 수행하며, 발전기 측 컨버터는 WTG의 MPPT 제어 혹은 출력제한 제어를 수행한다. 발전기 측 컨버터의 제어블록 다이어그램은 Fig. 23에서 나타내었다. 실제 가변적인 풍속에 따른 출력을 고려하기 위해 에콰도르 갈라파고스제도에서 측정된 풍속데이터를 도입하여 시뮬레이션을 수행하였다. WTG 모델링에 포함된 발전기, 터빈 그리고 컨버터의 세부 파라미터는 Table 8과 같다.

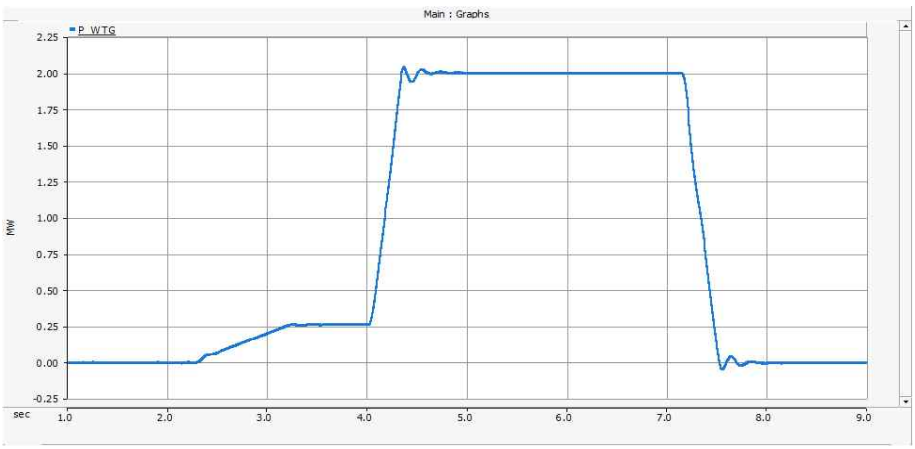
Fig. 24와 같이 2초 이후 WTG의 Cut-in 풍속 3 m/s 이상인 경우 WTG가 가동되며, 일정 풍속인 10 m/s 이상에서는 2 MW로 정격 운전한다. 그리고

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

7초에 Cut-out 풍속 25 m/s에서는 WTG의 운전이 정지된다. 또한 WTG는 주파수에 따라 자동으로 출력을 제어하게 된다. Fig. 25에서 주파수가 60 Hz 이하인 경우엔 최대출력운전을 한다. 하지만 4초에 60 Hz를 초과할 경우 식(14)의 드룹계수에 따라 풍력발전 출력을 제한하게 된다. 6초 이후 주파수 상한선인 60.2 Hz에 도달하면 풍력발전 출력은 0 MW가 된다.

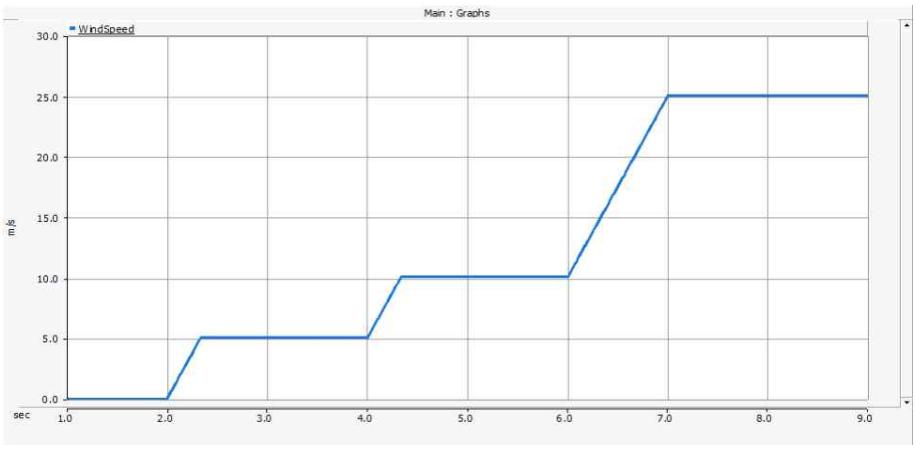
Table 8. Detailed parameters for the WTG

Parameters			Values
WTG	Wind turbine	Blade radius [m]	50
		Air density [kg/㎥]	1.225
		Maximum power factor	0.419
		Rated wind speed [m/s]	10
	PMSG	Rated generator power [MW]	2
		Rated RMS line to line voltage [kV]	0.69
		Rated electrical frequency of the machine [Hz]	30
		Generator inertia constant [s]	4 s
		Unsaturated direct-axis reactance [p.u.]	0.55
		Unsaturated quadrature-axis reactance [p.u.]	1.11
		Unsaturated direct-axis reactance [p.u.]	0.62
		Unsaturated quadrature-axis reactance [p.u.]	1.17
	Converter	Filter inductance [mH]	0.6
		Filter capacitance [uF]	700
		Switching frequency [Hz]	3369
		DC link capacitance [uF]	15000
		DC link voltage [kV]	1.45



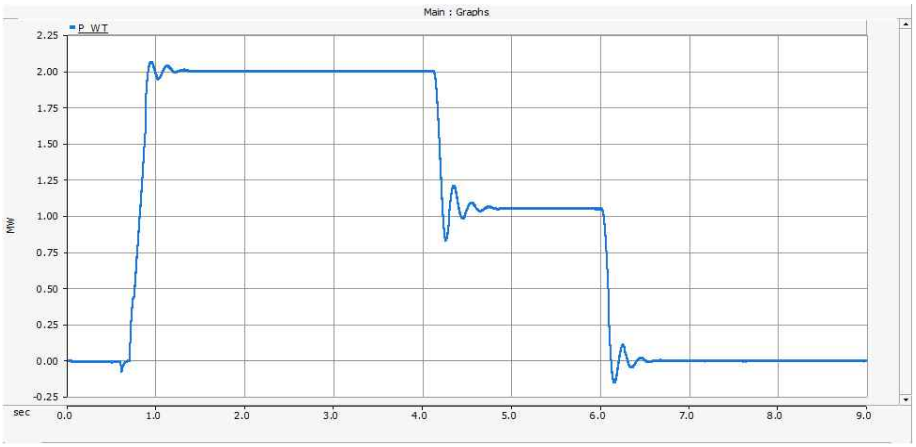
(a): WTG power

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

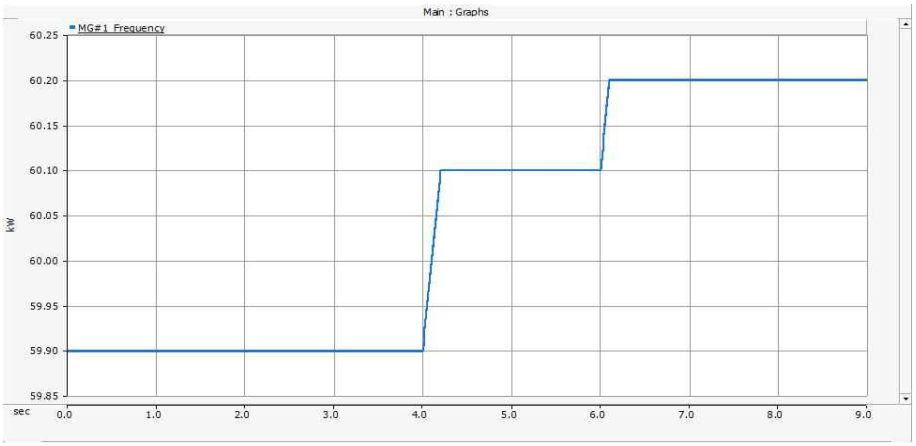


(b): wind speed

Fig. 24 WTG simulation results 1



(a): Power of WTG



(b): Grid frequency of MG #1

Fig. 25 WTG simulation results 2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2 시뮬레이션 결과

제안된 방안의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 해석 시나리오는 실제 운영 시 발생할 수 있는 상황을 모의해석하였다. 시나리오 1은 MG #1의 PV가 정상운영 될 때이며, 시나리오 2는 PV 발전이 없는 경우이다. 이때 MG #2의 전력 수급 상황을 주파수를 통해 파악하고 MG #1에서 잉여전력 또는 부족 전력을 송·수전의 가능 여부를 결정하였다.

Table 9. Expression of simulation results - Active & Reactive power

Parameters	Remarks
MVDC	Green
PV	Red
WTG	Dark brown
Power load	Pink
BESS	Blue
DG	Orange

3.2.1 시나리오 1

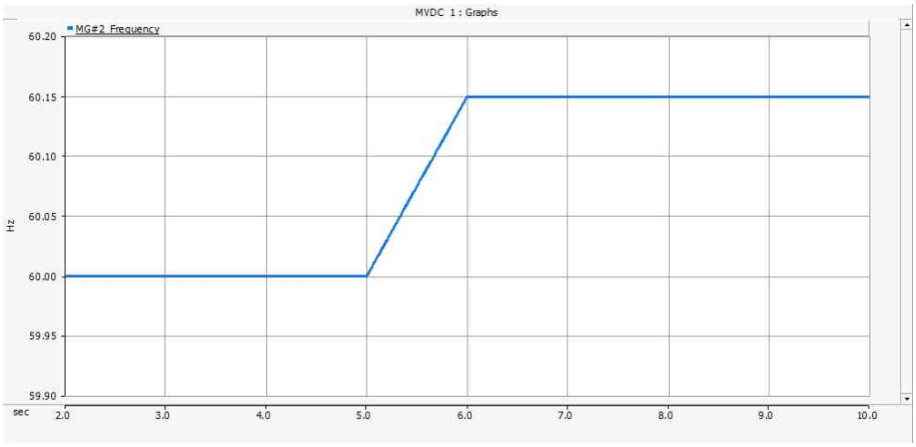


Fig. 26 Grid frequency in MG #2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

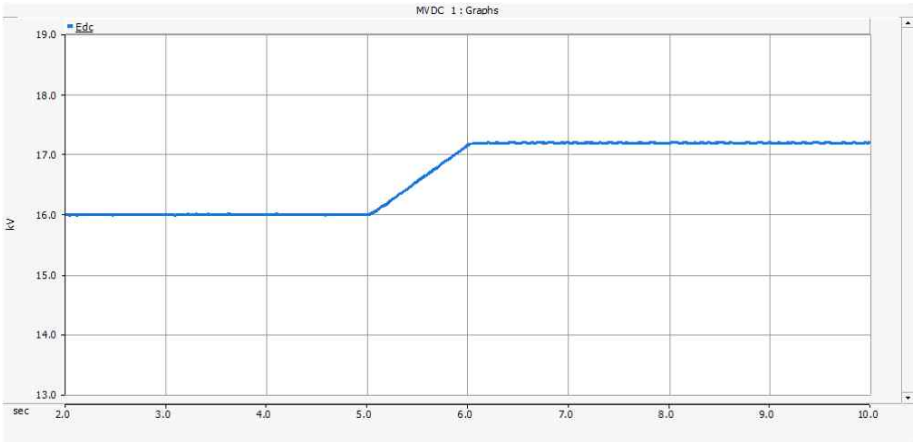
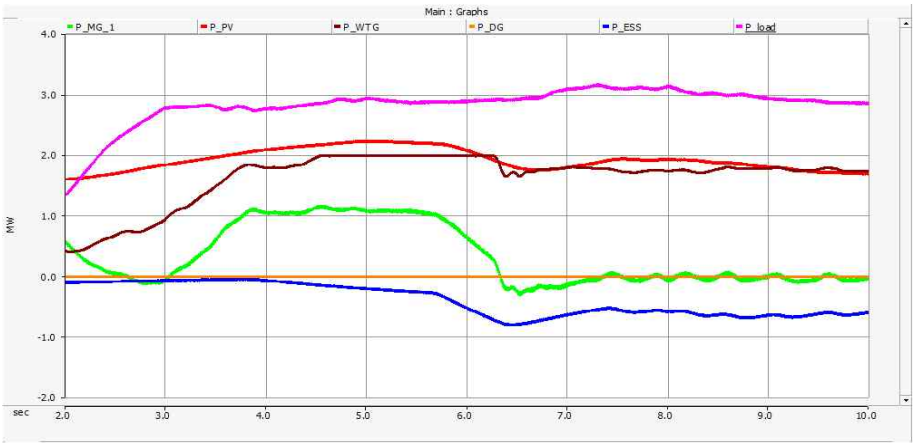


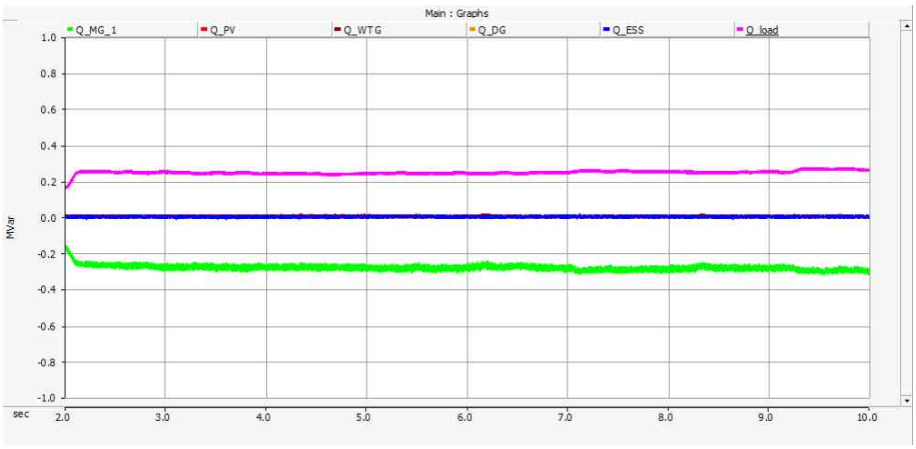
Fig. 27 DC link voltage of MVDC

MG #2의 분산전원의 발전량이 부하량보다 많아짐에 따라 Fig. 26과 같이 주파수가 상승할 수 있다. 5초에 MG #2의 주파수가 상승하여 60.15 Hz가 되면 식 (1)에 따라 Fig. 27의 DC 링크 전압이 17.2 kV로 증가하여 V_{dc}^{*} + 5%를 초과한다. 이에 따라 MG #1에서 잉여전력 발생 시 MG #2로 전력 송전이 불가능하게 된다.

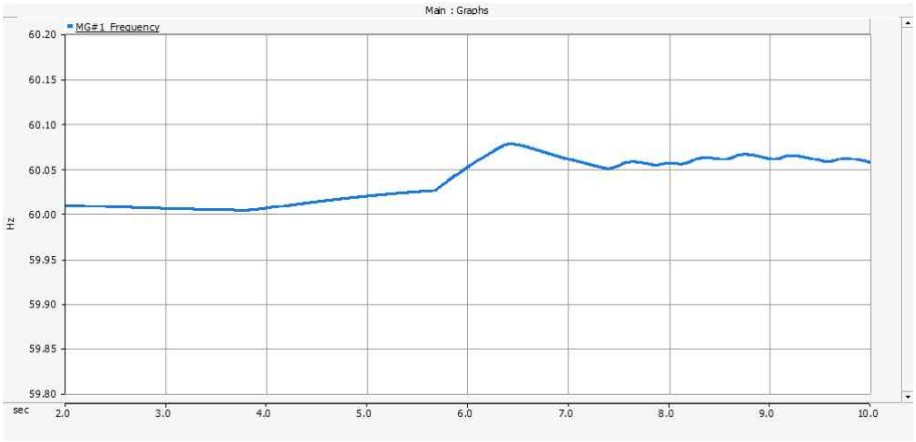


(a): Active power of MG #1

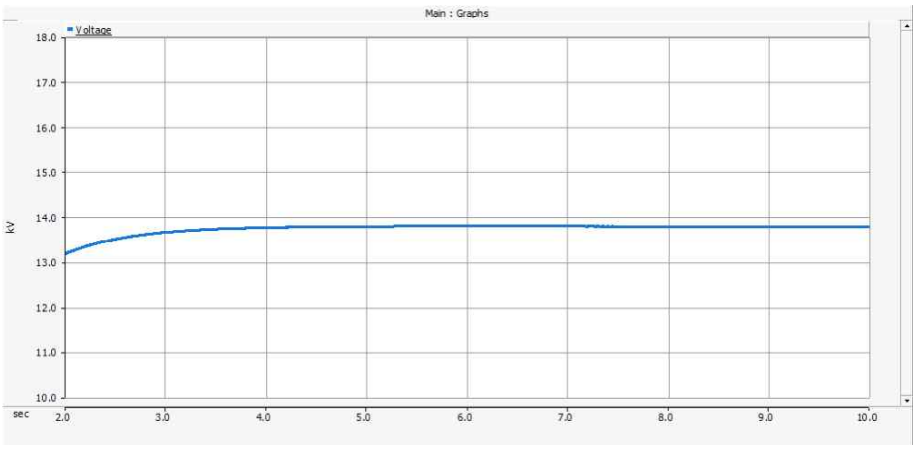
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b): Reactive power of MG #1



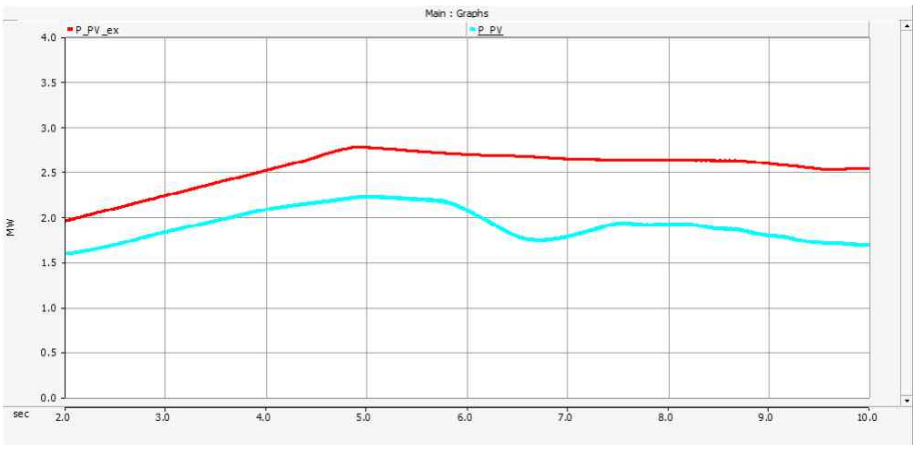
(c): Grid frequency of MG #1



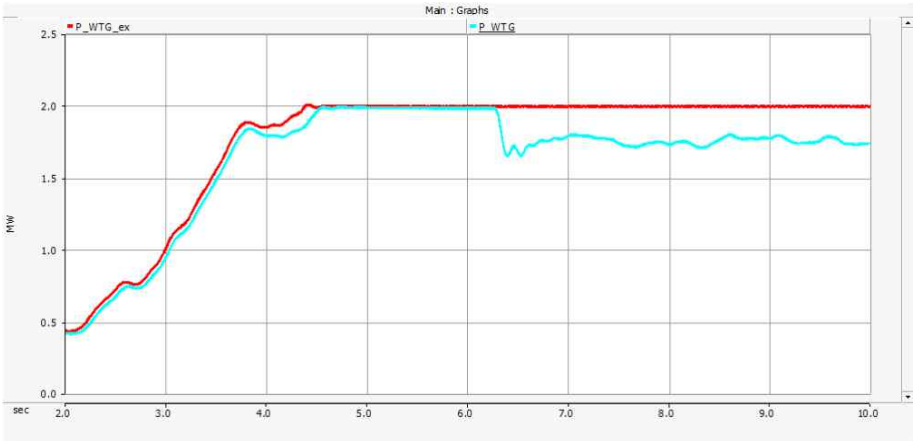
(d): Grid voltage of MG #1

Fig. 28 Simulation results 1 - scenario 1

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a): PV output power



(b): WTG output power

Fig. 29 Simulation results 2 - scenario 1

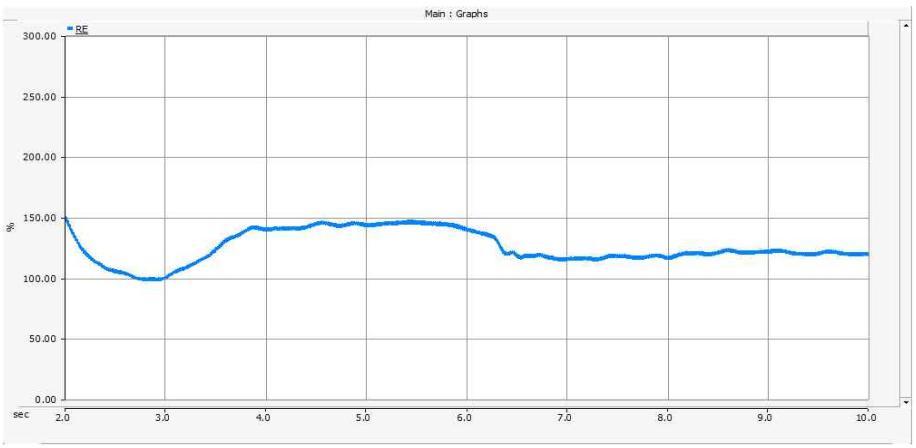


Fig. 30 Renewable energy sharing

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

MVDC의 출력에 따라 Fig. 28(c)의 주파수가 결정되었으며, Fig. 28(d)의 계통 전압은 MVDC의 정전압제어를 통해 13.8 kV으로 유지되었다.

Fig. 28(a)에서 PV와 WTG가 전력부하량 이상으로 발전되어 MVDC를 통해 역송하는 전력이 1.3 MW를 초과할 때 주파수는 60 Hz보다 증가하게 된다. 따라서 PV와 WTG는 각각의 드룹계수를 적용하여 출력제한제어를 수행한다. 이는 Fig. 29의 PV 및 WTG의 출력 결과에서 출력제한제어 수행 전·후의 비교를 통해 확인할 수 있다. Fig. 29(a), (b)의 P_PV_ex, P_WTG_ex(빨간색 선)는 출력제한을 하지 않은 기존의 일사량, 온도 그리고 풍속에 따른 결과이며, P_PV, P_WTG(파란색 선) 결과는 출력제한제어를 수행한 결과이다. 본 연구에서는 전력계통 운영자의 지시 없이 주파수 기반으로 분산전원 출력을 제어하였기 때문에 과한출력제한을 예방할 수 있었고, 계통 전압 및 주파수 유지 범위 이내에서 안정적으로 운영할 수 있었다. 또한 BESS에 적용된 드룹계수에 따라 배터리를 충전하여 재생에너지 자립률을 향상 시킬 수 있었다. 기존의 전력계통 운영에서는 재생에너지 출력의 불확실성으로 인해 재생에너지 자립률을 높이기 어렵다. 하지만 전력계통 자동화 운영을 통해 Fig. 26과 같이 재생에너지 자립률을 최대 140% 이상으로 높여 재생에너지 발전량을 증대시킬 수 있다.

DC 링크전압이 V_{dc}^{*} + 5%를 초과하는 시점인 약 5.7초에 MVDC를 통한 송전은 불가능하게 된다. MVDC의 송전전력은 점차 감소하여 0 MW가 되고 MG #1의 주파수는 더욱 증가하게 된다. 이에 따라 재생에너지의 출력제한이 강화되었고, BESS로 충전량이 증가하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2.2 시나리오 2

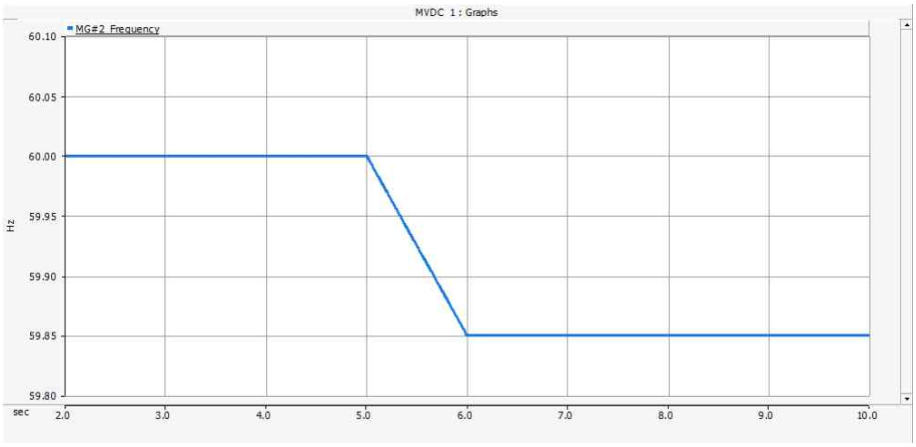


Fig. 31 Grid frequency in MG #2

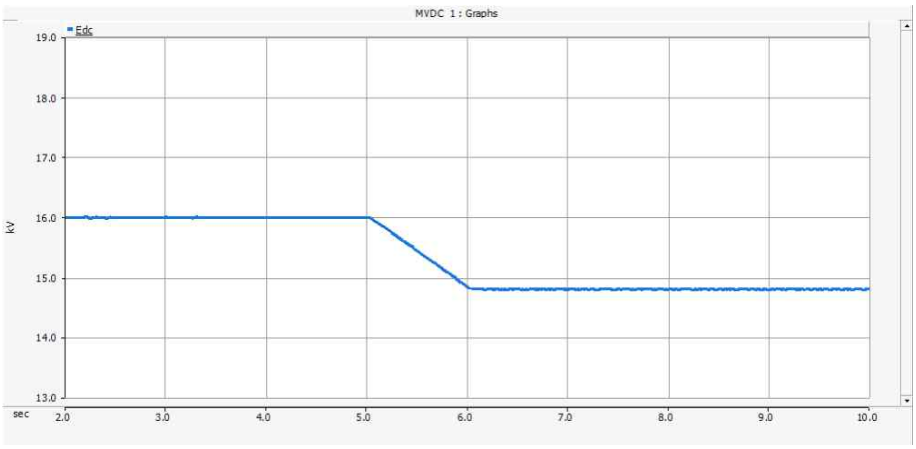
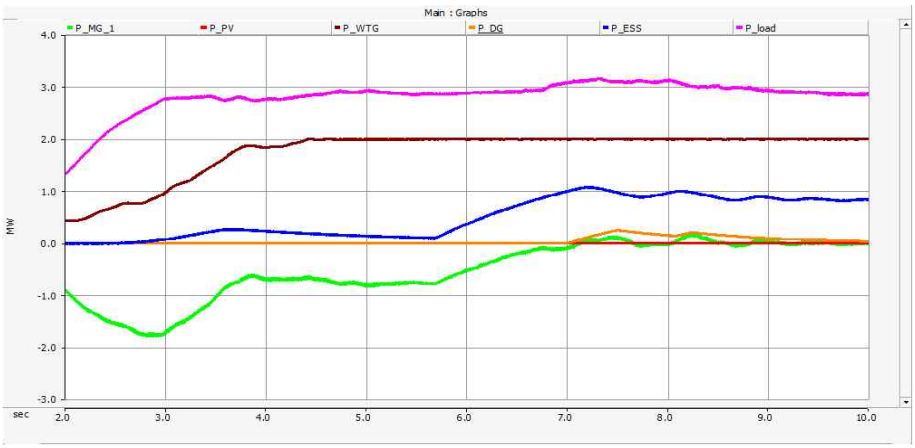


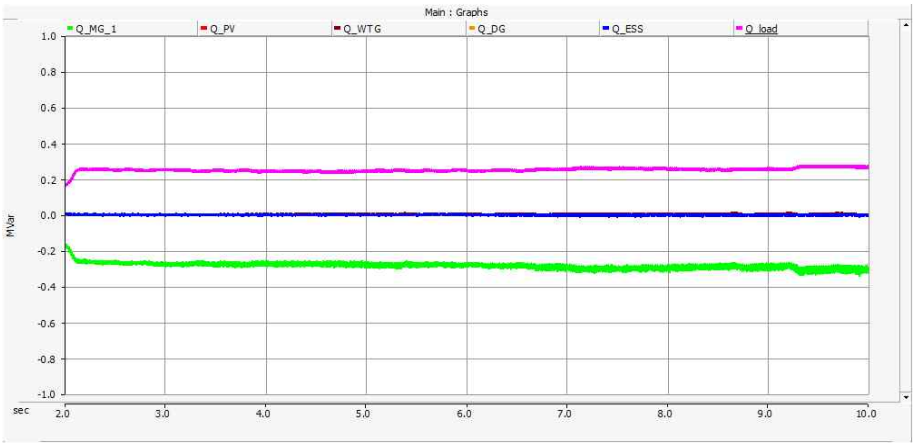
Fig. 32 DC link voltage of MVDC

MG #2의 분산전원의 발전량이 저조하면 Fig. 31과 같이 주파수가 60 Hz 미만으로 감소할 수 있다. 5초에 MG #2의 주파수가 감소하여 59.85 Hz가 되면 Fig. 32와 같이 DC 링크 전압이 14.8 kV로 감소하여 V_{dc}^{*} - 5%를 초과한다. 이에 따라 MG #1은 MG #2로부터 수전이 불가능하게 된다.

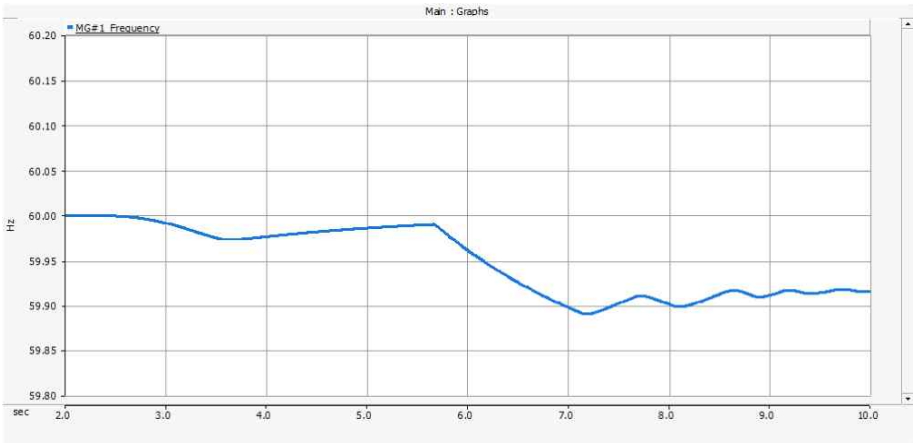
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a): Active power of MG #1

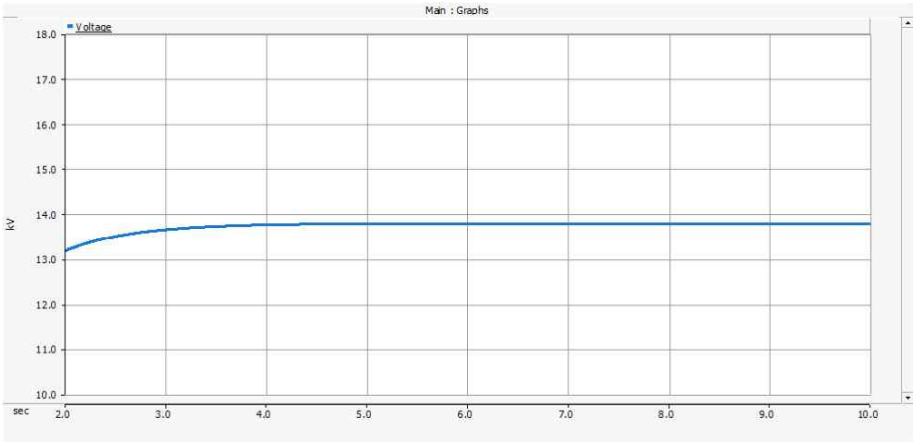


(b): Reactive power of MG #1



(c): Grid frequency of MG #1

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(d): Grid voltage of MG #1

Fig. 33 Simulation results - scenario 2

시나리오 2에서는 PV 발전이 되지 않아 MG #1의 부족전력이 발생하는 경우를 가정하였다. 이에 따라 MG #2에서 MVDC를 통해 부족한 전력을 수전하였고, 수전하는 양이 1.3 MW를 초과하였을 때 MG #1의 주파수는 60 Hz 미만으로 감소하였음을 Fig. 33에서 확인할 수 있다. 이에 따라 WTG는 출력제한 없이 MPPT 제어를 수행하였으며, BESS는 드룹계수에 알맞게 전력 공급에 기여하였다.

Fig. 31에서 5초에 MG #2의 주파수가 감소하여 Fig. 32의 DC 링크전압이 V_{dc}^{*} - 5%인 15.2 kV 미만으로 감소하였다. 약 5.7초부터 MVDC의 수전전력은 점차 감소하여 0 MW가 되었고, MG #1의 주파수는 더욱 감소하였다. 이에 따라 BESS의 출력이 증가하였고, 주파수가 59 Hz 미만으로 감소하였을 때 650 kW DG 한 대가 기동하여 전력수급의 균형을 맞추었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3 결과 고찰

두 가지 시나리오를 통해 제안된 방안의 타당성을 검증하였다. 첫 번째 시나리오에서는 PV가 정상운영 됨에 따라 MG #1의 잉여전력을 MG #2로 송전하였다. 송전되는 전력이 1.3 MW를 초과하여 주파수가 상승하였고, PV 및 WTG는 드룹계수에 따라 자동으로 출력제한을 하였다. BESS 역시 드룹계수에 알맞게 충전하였다. 따라서 과한 출력제한을 예방하고, 잉여전력을 송전함으로써 MG #1의 재생에너지 자립률을 140 % 이상으로 높일 수 있었다. 또한 MG #2의 전력수급 상황에 따라 잉여전력을 송전하지 못할 경우를 MVDC 링크전압 상승을 통해 판단하였으며, 이때 MG #1의 주파수는 더욱 증가하여 출력제한이 강화되었고, BESS로의 충전전력이 증가하였다.

PV 발전이 없는 두 번째 시나리오에서는 부족 전력을 MG #2로부터 수전하였다. 수전전력이 1.3 MW를 초과하였을 때 주파수가 60 Hz 미만으로 감소하였다. 이에 따라 BESS가 드룹계수에 알맞게 방전하여 전력 공급에 기여하였고, WTG는 지속적으로 MPPT 제어를 수행하였다. 만일 MG #2로 부터 부족전력 수전이 불가능한 경우엔 MVDC 링크 전압이 감소하였다. 이 경우 BESS의 출력이 증가하였으며, 추가적으로 DG를 기동하여 전력 공급에 기여하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 간에 MVDC를 연계하여 계통 운영자의 지시 없이 분산전원 출력을 제어하는 방안을 제안하였다. MVDC의 DC 링크 전압을 통해 연계된 MG #2의 전력 수급 상황을 파악하였고, 정전압 가변주파수 제어를 기반으로 MG #1이 운영되었다. MG #1에서 잉여전력 혹은 부족전력이 발생할 경우 MVDC를 통해 송·수전하는 전력 크기에 따라 주파수가 계산되었으며, 결정된 주파수는 PV, WTG. BESS 그리고 DG의 출력을 결정하였다. 제안된 운영의 타당성을 PSCAD/EMTDC 계통 해석 프로그램을 통해 검증하였고 수행된 결과는 다음과 같이 도출되었다.

(1) MG #1의 재생에너지의 출력이 증가함에 따라 잉여전력이 발생하였고, MVDC를 통해 MG #2로 잉여전력을 송전하였다. 송전하는 전력의 크기가 1.3 MW를 초과하면 주파수가 60 Hz 이상으로 증가하게 된다. 이때 PV 및 WTG는 각 설비의 드룹계수에 비례해서 출력제한제어를 수행하며, BESS는 드룹계수에 따라 전력을 충전하였다. 이를 통해 전력계통 운영자의 지시 없이 주파수에 따라 자동으로 출력을 제한하였으며, 과잉발전을 하지 않아 계통을 안정적으로 운영할 수 있었다. 또한 기존의 전력계통 운영에서는 재생에너지 출력의 불확실성으로 인해 재생에너지 자립률을 높이기 어렵다. 하지만 전력계통 자동화 운영을 통해 Fig. 26과 같이 재생에너지 자립률을 140% 이상으로 높여 재생에너지 발전량을 증대시킬 수 있었다.

(2) MG #1의 발전량이 저조하여 MG #2를 통해 부족 전력을 수전하였다. 수전전력이 1.3 MW를 초과하였을 때 주파수가 60 Hz 미만으로 감소하였고 이에 따라 BESS가 드룹계수에 알맞게 방전하여 전력 공급에 기여하였다. 그리고 WTG는 지속적으로 MPPT 제어를 수행하였다. 주파수가 59.9 Hz 미만으로 감소하였을 때엔 DG가 기동하여 전력을 공급하였다. 실제 운영 시엔 MVDC 및 BESS의 용량 한계를 고려하여 추가적인 예비전원을 항시 대기할 필요가 있으며, DG의 기동 시간을 고려하여 투입되는 발전기 선정이 중요할

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

것으로 판단된다.

이상과 같은 결과를 종합해 보이면 MVDC와 각 분산전원의 자동 출력 제어를 통해 PV 및 WTG의 개별출력제어의 어려움을 극복하고 재생에너지 자립률을 향상시킬 수 있다. 또한 마이크로그리드 간의 분산전원의 구성 및 용량, 전력 부하의 크기가 다르더라도 각 전력 수급 상황에 따라 협조 운전이 가능할 것으로 사료된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참 고 문 헌

[1] F. Katiraei, R. Iravani, N. and Hatziargyriou, A., “Dimeas, Microgrids management”. IEEE Power and Energy Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May, 2008.

[2] X. F. Wang, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg and Z. Chen., “A Review of Power Electronics Based Microgrids”. Journal of Power Electronics, vol. 12, no. 1, pp. 182-192, Jan., 2012.

[3] B. A. Carreras, E. B. Tchawou Tchuisseu, J. M. Reynolds-Barredo, D. Gomila and P. Colet., “Effects of demand control on the complex dynamics of electric power system blackout”. Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci., vol. 30, Issue 11, Oct., 2020.

[4] Y. Sun, Z. Zhao, M. Yang, D. Jia, W. Pei and B. Xu., “Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation”. CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 6, no. 1, pp. 160-173, Mar., 2020.

[5] S. Kwon, L. Ntaimo and N. Gautam, “Optimal Day-Ahead Power Procurement With Renewable Energy and Demand Response”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3924-3933, Sept., 2017.

[6] L. Yong Woo, Y. Jin Sol and M. Young Hyun., “A Study on Reliability Evaluation for Korean Power System Considering Load Uncertainty” KIEE, pp. 29-31, Nov., 2016.

[7] K. Dong-Min and Jin-O Kim., “Reliability Evaluation considering Fuzzy-based Uncertainty of Peak Load Forecast”. KIEE, pp. 111-112, Jul., 2008.

[8] V. Nougain, S. Mishra and A. K. Pradhan., "MVDC Microgrid Protection Using a Centralized Communication With a Localized Backup Scheme of Adaptive Parameters". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, no. 3, pp. 869-878, Jun., 2019.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

[9] A. Jin Hong and K. Eel-Hwan., “Implementation of a Microgrid Scheme Using a MVDC Connection between Gapado Island and Marado Island in South Korea”, Energies 2019, no. 1, pp. 187, Jan., 2019.

[10] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, S. Zabihi and J. P. S. Catalão., "Dynamic Model, Control and Stability Analysis of MMC in HVDC Transmission Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 3, pp. 1471-1482, Jun., 2017.

[11] Z. Li and G. Tan., “A Black Start Scheme Based on Modular Multilevel Control-High Voltage Direct Current”, Energies, 11, no. 7, pp. 1715. Jul., 2018.

[12] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero., “Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 4, pp. 882-892, Dec., 2014.

[13] F. Thams, R. Eriksson and M. Molinas., “Interaction of droop control structures and its inherent effect on the power transfer limits in multi-terminal VSC-HVDC”. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-1, Jul., 2017.

[14] L. Gyu-Sub, K. Do-Hoon and M. Seung-Il, “Method for Determining the Droop Coefficients of Hybrid Multi-Terminal HVDC Systems to Suppress AC Voltage Fluctuations”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 6, pp. 4944-4947, Nov., 2020.

[15] Guangdao Tan, Chao Xu, Fengzhi Wu, Chunfeng Qi, Dejun Wang, Peihao Yang and Yangmin Feng., “Research on primary frequency regulation of wind turbine based on new nonlinear droop control”. 2020 4th International Conference on HVDC, pp. 170-174, Nov., 2020.

[16] S. Miwazawa, F. Nakanura and N. Yamada., “A New Method for Developing the Control Scheme of a CVVF Cycloconverter”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-33, no. 3, pp. 304-309,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Aug., 1986.

[17] S. N. Mahendra, S. Velisetti and K. Aditya, “Implementation of VVVF, CVVF & CFVV control strategies for control of LIM”. 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp. 141-145, Sept., 2012.

[18] Q. Huo, T. Wei, L. Han and D. Jia, “Methods for multi-functional converter control in micro-grid,” 2015 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, pp. 1-6, Aug., 2015.

[19] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, “Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications” Wiley, no. ISBN: 978-0-470-52156-4, 2010.

[20] T. Dogruer and N. Tan, “Design of PI Controller using Optimization Method in Fractional Order Control System”. IFAC, vol. 51, pp. 841 - 846, Jun., 2018.

[21] O. Yaniv and M. Nagurka, “Robust pi controller design satisfying sensitivity and uncertainty specifications”. IEEE Trans. Autom. Control 48, pp. 2069 - 2072, Nov., 2003.

[22] N. Priyadarshi, V. Ramachandaramurthy, S. Padmanaban and Azam, F. “An Ant Colony Optimized MPPT for Standalone Hybrid 386 PV-Wind Power System with Single Cuk Converter”. Energies, 12, no.1, pp. 167, Jan., 2019.

[23] A. Sangwongwanich and F. Blaabjerg, “Mitigation of Interharmonics in PV Systems With Maximum Power Point Tracking Modification”. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 9, pp. 8279-8282, Sept., 2019.

[24] C. Jung-Sik, K. Jae-Seop and J. Dong-Hwa, “Development of Tracking Method and MPPT Controller of Photovoltaic System”. KIIEE, vol. 21, no. 8, pp. 54-63, Sept., 2007.

[25] A. Gil-Velasco and C. Aguilar-Castillo, “A Modification of the Perturb and Observe Method to Improve the Energy Harvesting of PV

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Systems under Partial Shading Conditions". Energies, 14, no. 9, pp. 2521, Apr., 2021.

[26] J. Byoung-Chang, K. Byoung-Wook and S. Seung-Ho., "Improvement of Grid Interface Inverter Power Ripple with Wind Turbine Power Control". KIEE, pp. 251-254, Oct., 2003.

[27] X. Zhang, Y. Li and Y. He. "A Novel Model Predictive Current Control Method for Open-Winding PMSG Fed by Dual Inverter". 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1450-1454, Oct., 2018.

[28] C. N. Wang, X. K. Le and W. C. Lin, "Modelling and Simulation of Autonomous Control PMSG Wind Turbine". 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, pp. 1144-1147, Jun., 2014.

[29] B. Pavan Babu and V. Indragandhi, "Analysis of Back To Back (BTB) Converter Control Strategies in Different Power System Applications," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 906, p. 012016, Aug., 2020.

[30] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Power Management and Power Flow Control With Back-to-Back Converters in a Utility Connected Microgrid," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 2, pp. 821 - 834, May, 2010.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY