

## 파력발전 연계형 마이크로그리드를 위한 에너지저장장치 운용 알고리즘 검증에 관한 연구

노 찬<sup>1</sup> · 임창혁<sup>1</sup> · 김경환<sup>2</sup> · 홍기용<sup>2</sup> · 신승호<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 연구원  
<sup>2</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 책임연구원

### A Study on Verification of Energy Storage System Operational Algorithm for Wave Energy Converters Linked Microgrid

Roh Chan<sup>1</sup>, Chang-Hyuk Lim<sup>1</sup>, Kyong-Hwan Kim<sup>2</sup>, Key-Yong Hong<sup>2</sup>, and Seung-Ho Shin<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>2</sup>Principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

#### 요 약

파력발전은 입력에너지 특성상 변동성이 크기 때문에 직접적으로 계통에 연계하는 것에 대해서 어려움이 발생할 수 있다. 특히 도서지역과 같이 불안정한 계통에서는 변동성이 큰 재생에너지를 직접적으로 연계하면 계통의 불안정성이 더욱 커질 수 있다. 이에 따라 도서지역 계통에 파력발전을 적용하기 위해서는 출력 변동성을 저감시킬 수 있는 에너지저장장치가 필요하다. 본 논문에서는 도서지역에 적용하기 위한 파력발전을 연계한 마이크로그리드의 에너지저장장치의 운용 알고리즘에 대해서 검증한다. 우선적으로 도서지역에 대한 파력발전 연계형 에너지저장장치의 운용 알고리즘을 검증하기 위해서 도서지역 계통 모델링, 전력 부하 모델링, 에너지저장장치 모델링, 파력발전장치 모델링을 진행하였고, Matlab/Simulink를 이용해서 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 파력발전 연계의 적합성, 사고 및 고장 모의, 파력발전을 연계한 배전망 최적 운용을 위한 다양한 운용알고리즘을 수행을 통해 파력발전을 연계한 마이크로그리드의 특성을 분석하였다. 파력발전 연계형 마이크로그리드를 위한 에너지저장장치의 운용 알고리즘은 Matlab의 StateFlow기반으로 구성하였고, 실시간 시뮬레이션을 위해서 OPAL-RT를 적용하였다.

**Abstract** – Since wave energy converter is highly volatile due to the nature of input energy, difficulties may arise in directly connecting to the system. In particular, in an unstable system such as an island region, the instability of the system may be increased by directly linking renewable energy with high volatility. Accordingly, in order to apply wave power to island systems, an energy storage system capable of reducing output variability is required. In this paper, we verify the operation algorithm of the energy storage system in connection with wave energy converter linked microgrid for application to the island region. First of all, in order to verify the operation algorithm of the energy storage system connected to the wave power generation for the island area, we conducted system modeling for the island area, power load modeling, energy storage device modeling, and modeling of the wave power generation device and simulated using Matlab/Simulink. Proceeded. In addition, the characteristics of microgrid linked to wave energy converter were analyzed through various operational algorithms for optimal operation of the distribution network in connection with wave power generation, suitability for accidents, failure simulation, and wave power generation. The operating algorithm of the energy storage device for the wave power-linked microgrid was constructed based on StateFlow of Matlab, and OPAL-RT was applied for real-time simulation.

**Keywords:** Micro-grid(마이크로그리드), Energy storage system(에너지 저장장치), Wave energy converter(파력발전장치), Simulation(시뮬레이션), operational algorithm(운용 알고리즘)

<sup>†</sup>Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

### 1. 서 론

재생에너지 기반의 마이크로그리드는 화석연료의 사용을 줄일 수 있는 방법으로 최근 많은 연구가 이루어지고 있다(Lee and Son[2013]; Kim *et al.*[2014]). 분산전원으로서 마이크로그리드에 주로 사용되는 재생에너지(태양광발전, 풍력발전)는 자연 친화적인 그린 에너지라는 장점이 있지만, 도서지역과 같은 불안정한 전력계통 운용에서 발전량이 일정치 않고 간헐적으로 발전되는 에너지원이라는 큰 단점을 가지고 있다(Piotr and Lukasz[2009]; Tomislav *et al.*[2012]).

재생에너지는 예측하기가 어려우며 불규칙하게 변하는 확률적인 특성이 강하다. 이러한 특성을 제대로 분석하기 위하여 불규칙하게 변하는 재생에너지를 고려하는 마이크로그리드의 운용 기법 연구가 진행되어 왔다(Lidula and Rajapakse[2011]; Laaksonen *et al.*[2006]). 하지만 과력발전은 기존의 많이 연구된 재생에너지(태양광발전, 풍력발전)보다 변동성이 훨씬 더 크기 때문에(Roh *et al.*[2019]; Roh *et al.*[2020]; Markel and John[2016]), 이를 위한 에너지저장장치 구성 및 연계 방법에 대한 연구가 필요하고, 과력발전을 연계한 마이크로그리드의 대한 분석이 필요하다.

재생에너지 시스템을 연계한 마이크로그리드 운용 시 실제로 구축 단계에서 예상하지 못한 많은 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 문제들은 추가 기간 및 비용을 초래할 수 있다. 특히 다양한 시스템이 통합되어 운용되는 대규모 시스템의 경우에 발생하는 문제들은 더욱 해결하는 것이 어렵다. 따라서 사전에 다양한 문제를 검토하

고, 해결하여 설계에 반영할 수 있는 사전 모의 시스템이 필요하다(Aymen *et al.*[2012]; DeSieno *et al.*[1970]).

본 논문은 도서지역(추자도)의 계통 현황 및 부하 데이터, 예상 발전 데이터를 활용하여 현장과 유사한 전산상의 환경을 구축하였다. 정확한 시뮬레이션을 위해서 추자도 배전망, 에너지저장장치 시스템 및 과력발전장치 전체 모델링을 진행하였고, 시뮬레이션의 결과로는 과력발전 연계의 적합성, 사고 및 고장 대처 방안, 그리고 과력발전을 연계한 배전망의 최적 운용 알고리즘을 도출하였다. 이러한 결과를 통해 시스템의 다양한 운용 전략을 사전 모의하여 데이터를 확보하고, 실증을 위한 설계 과정에 활용할 것이다. 또한 과력발전 시스템은 총 발전량 평균 대비 순시로 발생하는 피크 전력이 크기 때문에 에너지저장장치 용량을 적절히 선정하여 안정도를 높인 에너지저장장치 연계 시스템에 대한 분석도 진행하였다. 이를 Matlab/Simulink를 이용해서 시뮬레이션을 진행하였고 실시간 시뮬레이션을 위해서 OPAL-RT를 적용하였다. 마지막으로 마이크로그리드 및 에너지저장장치의 운용 알고리즘은 Matlab의 StateFlow 기반으로 구성해서 운용 알고리즘의 성능을 검증하였다.

### 2. 마이크로그리드 시스템 구성요소 전산모사를 위한 구성 및 해석

#### 2.1 도서지역 배전망 구성 및 부하 분석

Fig. 1은 추자도의 배전선로에 대해서 나타내고 있다. Fig. 1에 나타난 것처럼 과력발전 연계형 마이크로그리드 및 에너지저장장

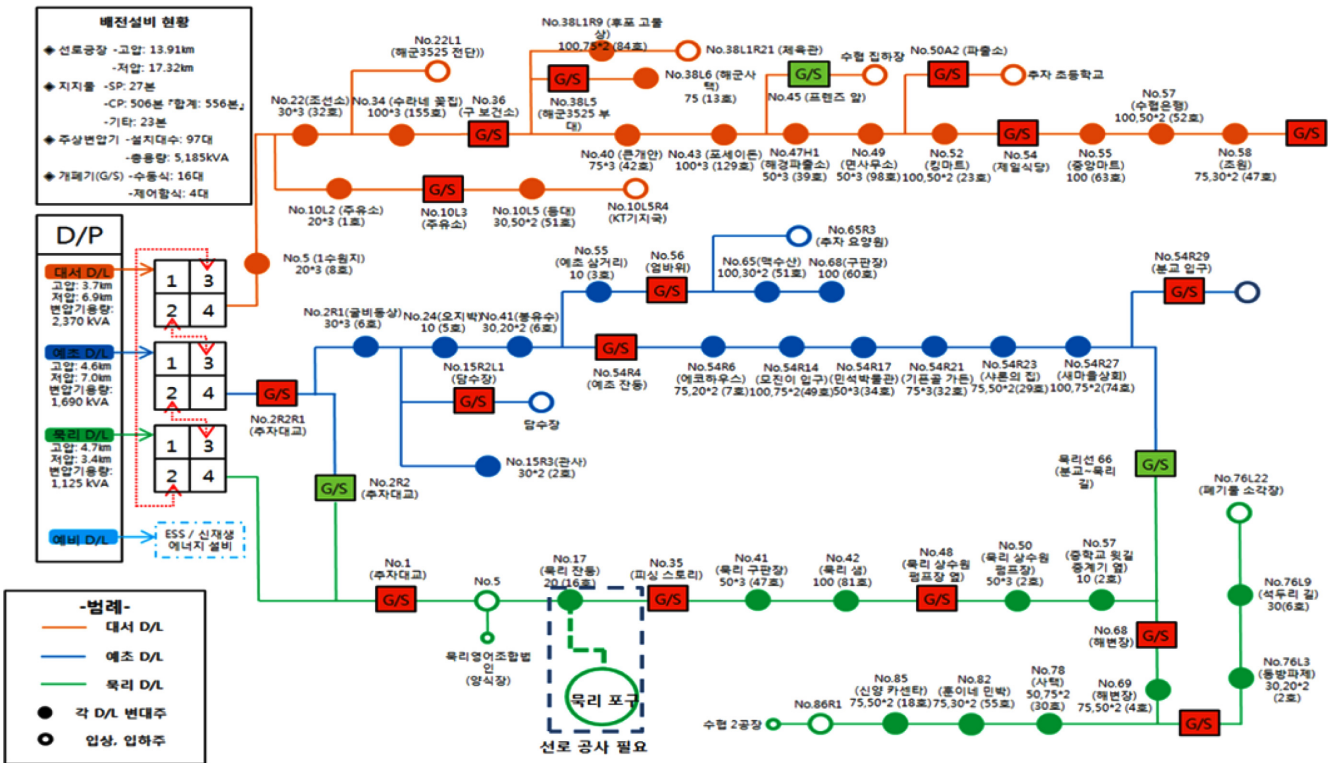


Fig. 1. Distribution line diagram of Chujado island.

치 시스템 적용 예정지인 목리포구는 추자도 발전소에서 분기되는 3개의 배전선로(Distribution Line, D/L) 중 목리 D/L에 연계되어 있다. 목리 D/L은 변압기 용량기준으로 추자도 전체 부하의 21.7%를 차지한다.

2018년도 전력계를 설치하여 측정한 결과 490 kW의 평균전력을 사용하였고, 특징적으로 목리 D/L은 몇몇 양식장 및 수협 2공장 등 특정 계절 및 시간대에 전력 사용량의 급변 가능성이 있는 주요 부하들과 연계되어 있었다.

Fig. 2는 목리의 부하 데이터를 나타낸다. 이를 통해서 최대 유효전력과 최대 복소전력에 대한 분석을 진행하였다. 측정 데이터 중에서 최대 유효전력은 4월 14일로 588.3[kW]이며, 최대 복소전력은 741[kVA]이다. 즉, 최대 유효전력을 이용해서 전력변환장치 및 배터리 용량을 선정하고, 최대 복소전력을 이용해서 에너지저장장치 용량 설계를 진행할 수 있다.

Fig. 3은 목리 계통의 주파수 변동과 전압 불평형 데이터를 나타낸다. 목리 계통의 주파수를 측정한 결과, 60[Hz]를 기준으로 변동이 심하며 한전의 주파수 관리 기준인 0.2[Hz]보다도 많이 벗어났

고, 계통 보상장치가 없기 때문에 불안정한 상태는 더욱 악화될 우려가 있다. 또한 전압 불평형이 발생하는 경우가 많기 때문에 계통 보상장치가 필요한 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 전력부하 모델링

전력부하 모델링은 MATLAB/Simulink의 ‘Dynamic Load Library’를 이용하였고, 이는 유효전력(P) 및 무효전력(Q)을 입력하여 원하는 부하량을 갖는 부하 모델로 만들 수 있다. Fig. 4에 나타난 것처럼 (+)값으로 P/Q를 입력하면 수전을 하게 되고, (-)값으로 입력하면 발전하는 부하이다.

하루 동안의 부하 전력 데이터는 초 단위로 데이터를 받아올 경우 86,400개다. 하지만 컴퓨터의 성능 한계로 인하여 구현이 불가능하기 때문에 시뮬레이션 단위를 1초가 아닌 5분단위로 수행하였다.

추자도 내연발전소의 배전선로에 전력분석기를 설치하여 얻은 4개월 부하 전력 데이터를 확보했고, 그 중에서 하루를 선정하여 시뮬레이션 데이터로 적용하였다. 추자도에는 총 3개의 D/L으로 구성되어 있고, 그 중에서 예초 D/L과 대서 D/L은 Fig. 5에 나타난

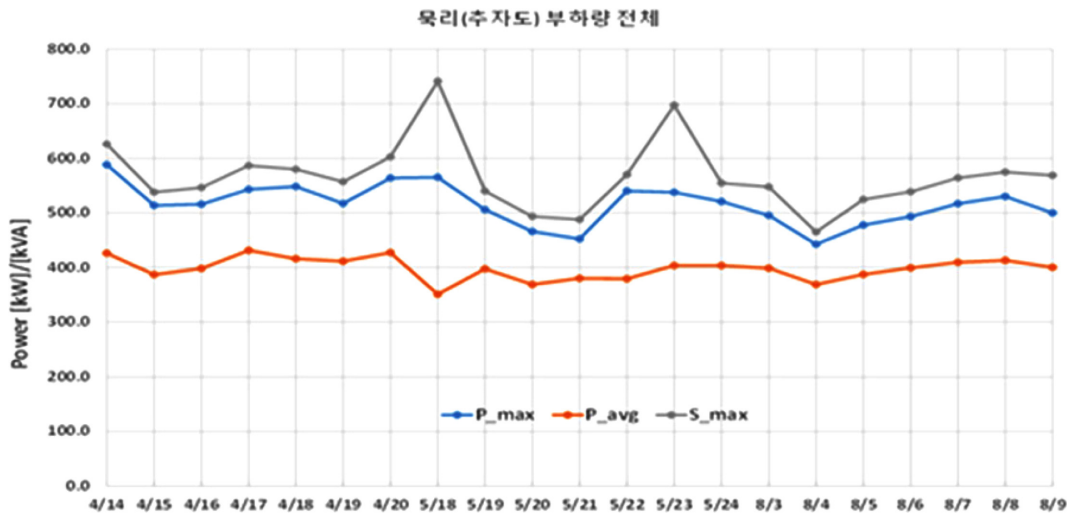


Fig. 2. The Diagram of Muk-ri Load.

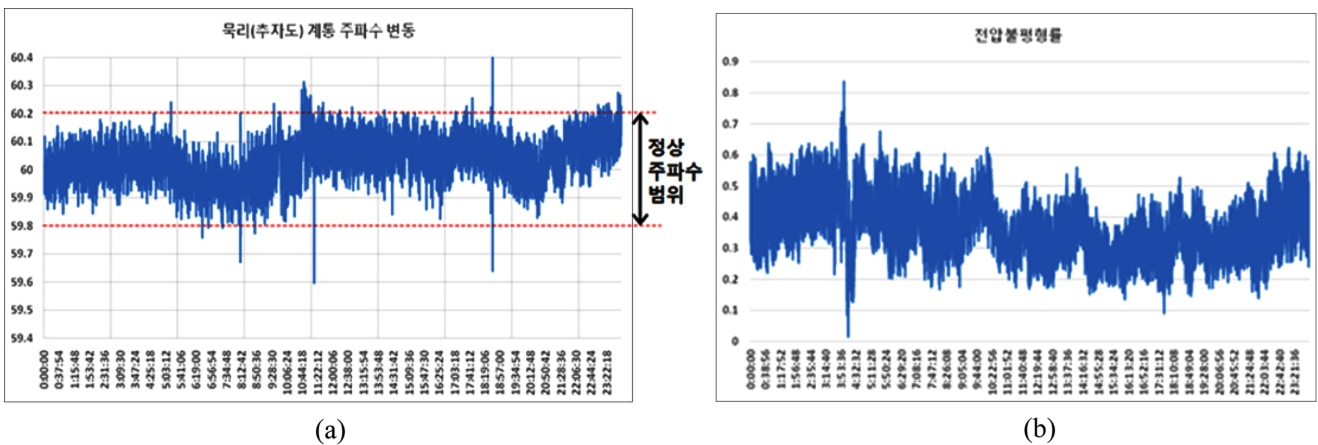


Fig. 3. (a) Grid frequency variability data of muk-li in Chujado island, (b) voltage unbalance data.

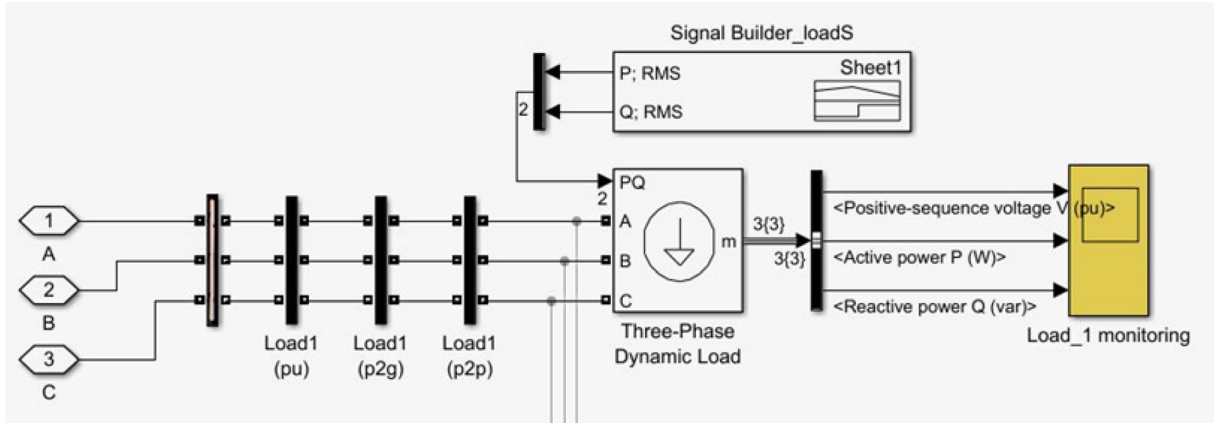


Fig. 4. Load Model with Dynamic Load in Matlab.

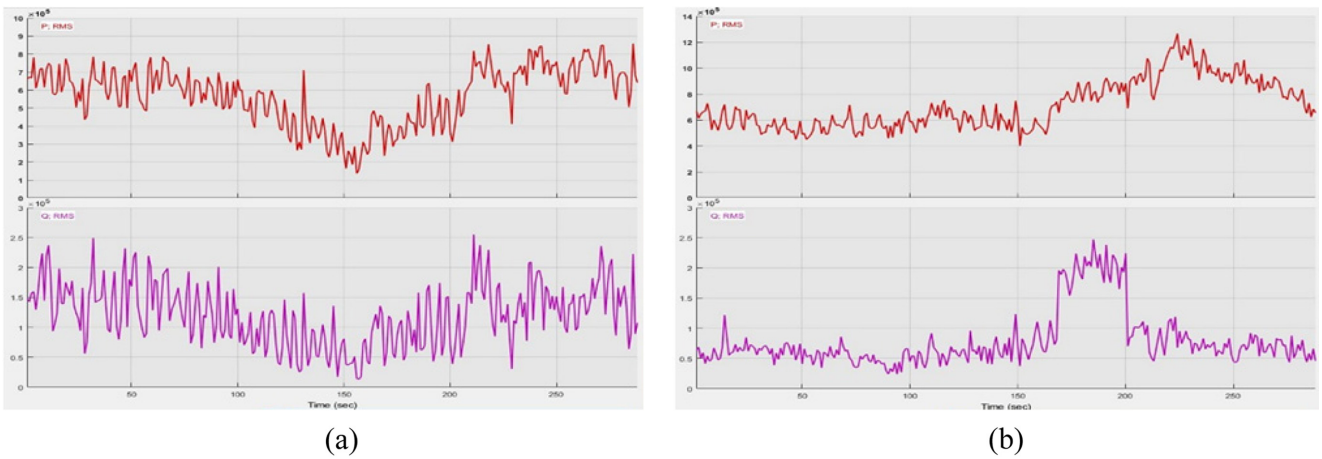


Fig. 5. Daily active(red)/reactive(pink) power(P, Q) of (a) Yecho D/L-Line and (b)Daseo D/L-Line.

것처럼 각각 하나의 부하로 직접 측정된 데이터를 이용해서 부하 모델을 구성하였다. 목리 D/L은 배전망 자료를 기반으로 주요 8개의 부하로 분리해서 Fig. 6과 같이 모델링을 진행하였다.

2.3 분산전원(디젤발전기) 모델링

디젤 발전기는 OPAL-RT 실시간 시뮬레이터를 통해 실시간 모의가 가능하도록 RT-LAB과 연동이 가능한 ‘Discrete Library’를 활용하여 모델링하였다. 디젤발전기 구성은 동기발전기, 조속기, 여자기로 나눌 수 있고, 디젤 발전기 모델링은 Fig. 7에 나타난다.

Fig. 8(a)에 나타난 것처럼, 조속기의 속도 제어 시스템은 디젤 발전기의 실제 동작을 나타내기 위해 액추에이터와 디젤 엔진의 지연 시간 제어 블록으로 모델링했다. 차단기를 기준으로 계통 연계형과 독립형을 구분하여 내부에 주파수 제어기, 외부에 유효전력 제어기 구조로 설계했다. 주파수는 디젤 발전기의 주파수가 60 Hz 주파수를 추종하도록 제어하고, 유효전력은 디젤 발전기에서 출력되는 유효전력이 설정된 값에 따라 발전하도록 제어했다. 또한, Fig. 8(b)에 나타난 것처럼, 디젤 발전기를 제어하는 여자시스템은 크게 직류여자시스템(DC Excitation System), 교류여자시스템(AC Excitation

System), 그리고 고정여자시스템(Static Exciter System) 세 가지로 구분된다. 여자시스템은 직류자계(DC field)를 생성하기 위해 교류 발전기 또는 정류기를 사용하며, 본 시뮬레이션에 적용한 여자기 모델은 내부에 작은 동기가 있는 형태의 교류여자시스템(AC Excitation System)으로 IEEE Standard AC4A모델 참고하였다. 무효전력 제어기는 디젤 발전기에서 발생하는 무효전력 성분을 제거하여 0으로 만들기 위해 사용했다. 하지만 실제 디젤 발전기는 무효 전력을 0이 아닌 디젤 발전기가 허용하는 크기 이내로 제어한다.

Fig. 9는 디젤 발전기에 연계하는 부하를 단계적으로 투입함에 따라 나타난 출력이다. 0.5초에서 디젤 발전기를 On 하였으며, 0.3 [p.u.] 저항부하에 전력을 공급한다. 1.5초에 추가로 0.5 [p.u.] 부하를 투입하여 총 0.8 [p.u.]의 부하에 전력을 공급하고 있다. 0.5 [p.u.]의 부하가 투입되는 1.5초에는 디젤 발전기의 전압을 안정적으로 제어하기 위하여 약 5초 정도의 시간이 소요되는 것을 확인하였다. 이 지연시간은 제어기의 파라미터 조절을 통해 조절이 가능하며 실제 대상 적지에 적용하는 디젤 발전기에 대한 정보가 있다면 적용이 가능하다.

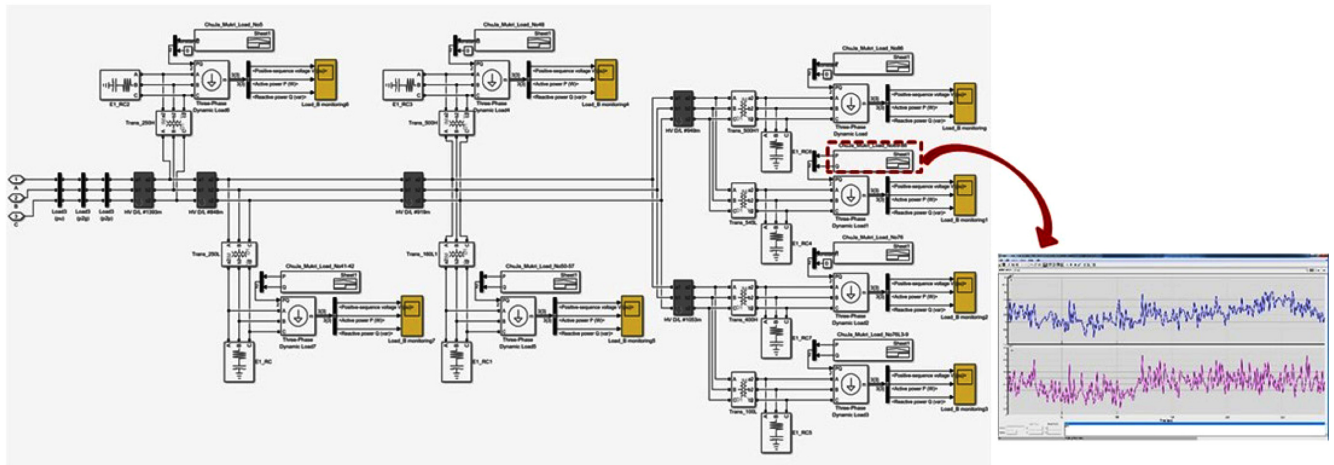
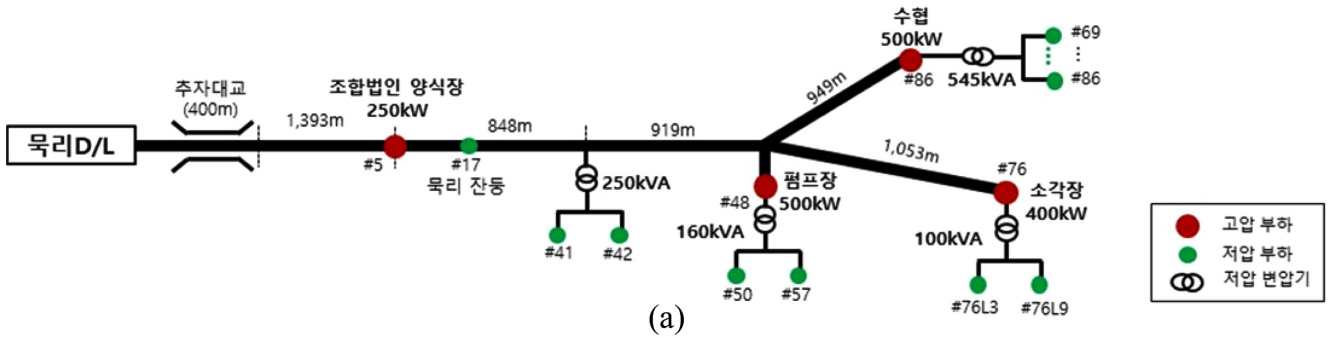


Fig. 6. (a) Distribution structure and (b) simulink model of Muk-li D/L-Line.

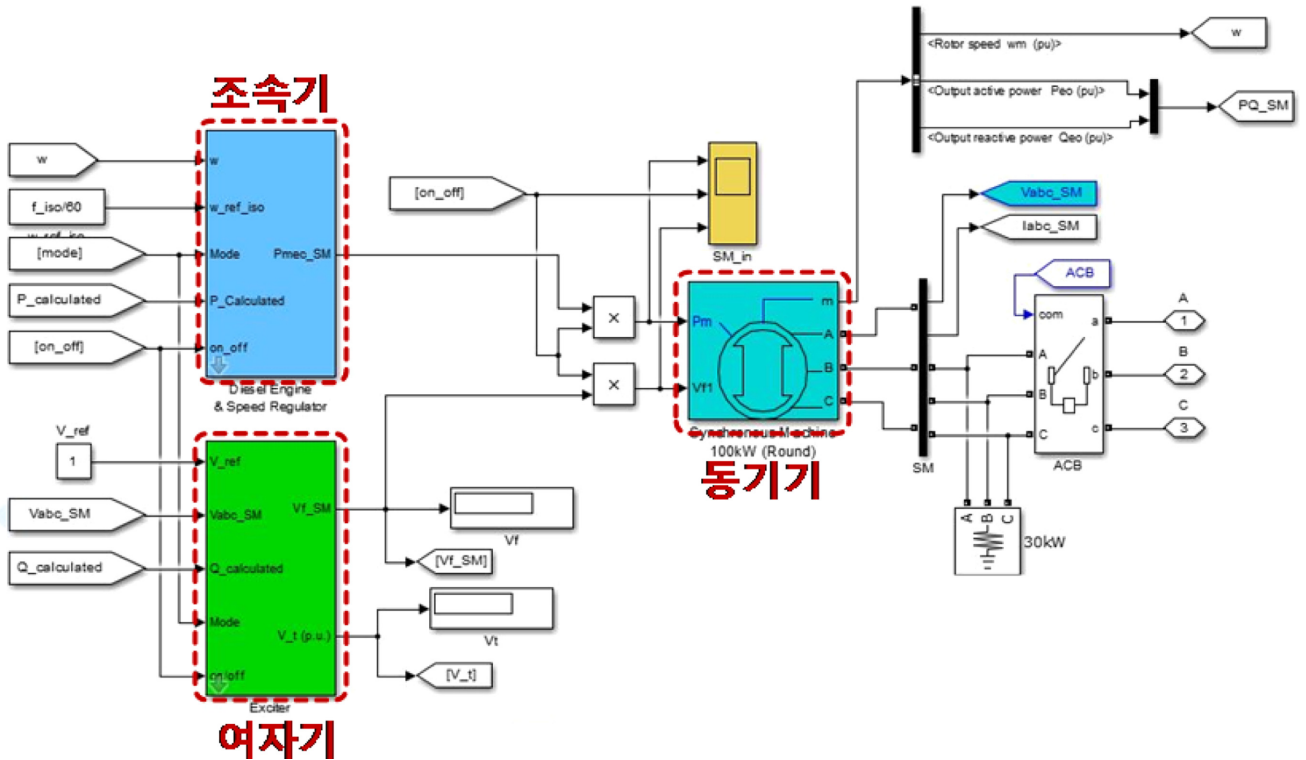


Fig. 7. MATLAB/Simulink based high performance generator model.



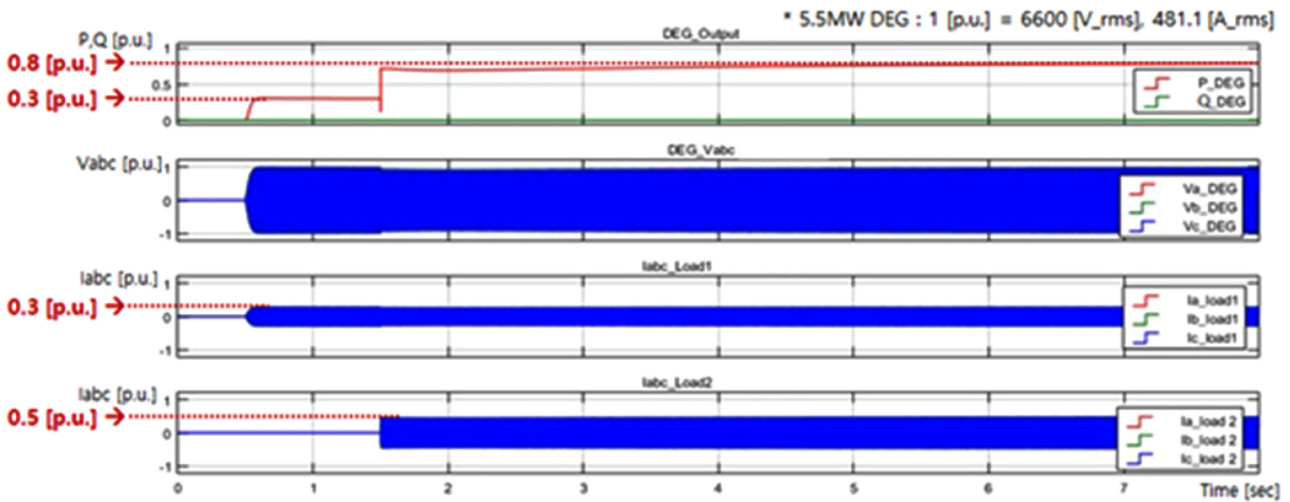


Fig. 9. Diesel Generators response waveform according to load.

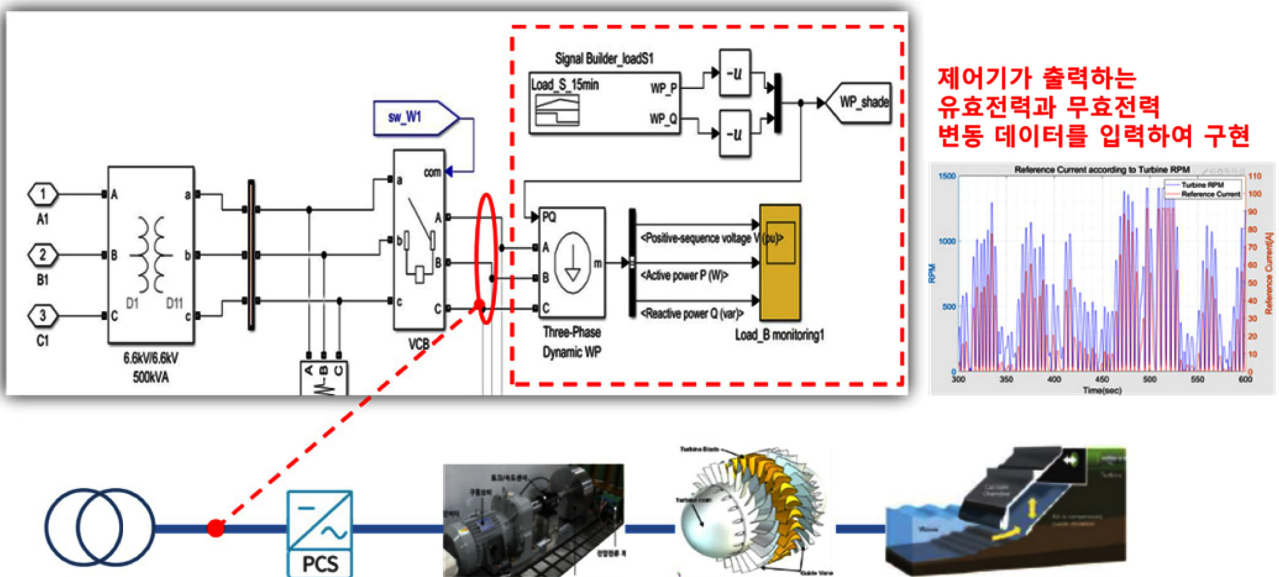


Fig. 10. AC-linked wave energy converter system modeling.

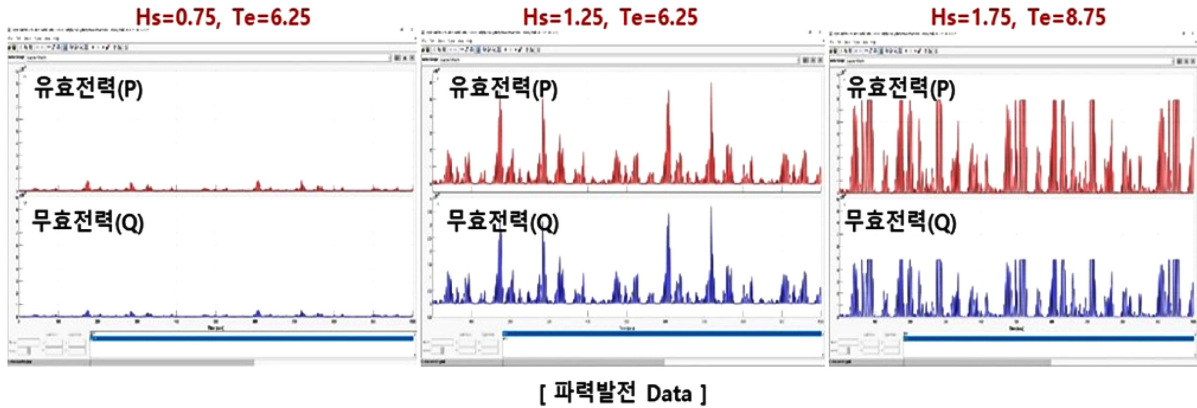
파력에 의한 물리 특성을 에너지 형태로 변환하여 각 장치의 효율 및 관성을 고려 후, 데이터를 활용하여 계통으로 전류를 주입했다. 기존 ‘Dynamic Load’ 도구는 전력을 소비하기 위해 사용되기 때문에 (-) 부호를 사용하여 거꾸로 발전이 될 수 있도록 구성했다. Fig. 10에 나타난 것처럼 유효/무효전력 형태로 계산된 파력발전 데이터를 ‘Dynamic Load’ 도구의 입력으로 구성하게 된다.

#### 2.4.2 DC 연계형 파력발전시스템

직류 연계 방식의 경우에는 파력발전 특성을 고려해서 에너지저장장치 배터리단에 직접 연결되기 때문에 교류 연계 방식과는 다르게 모델링 되어야 한다. 하지만 파력에 의한 물리 특성을 에너지 형태로 변환한 데이터를 활용하여 각 장치의 효율 및 관성이 고려

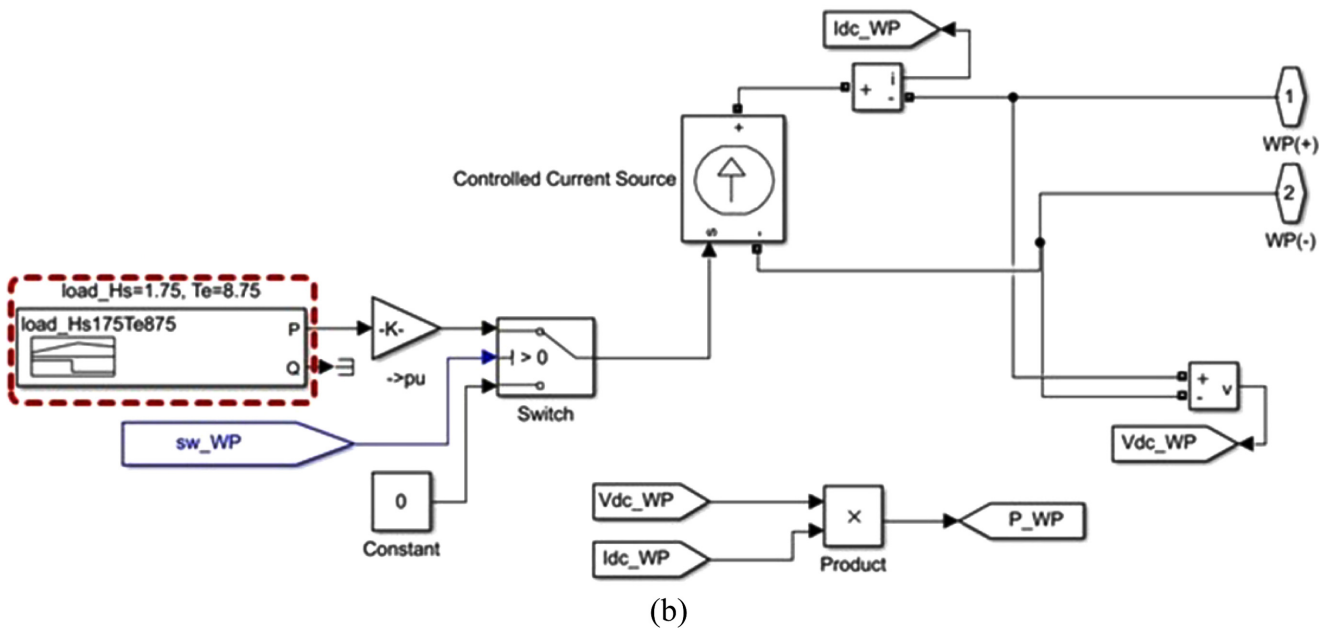
된 발전기 출력까지는 동일한 데이터가 활용했다. 직류 연계 방식에서는 배터리단인 직류전압단에 전류원을 이용하여 전류를 주입하도록 꾸며진다. 그래서 파력 발전 데이터는 전력 형태이기 때문에 Fig. 11에 나타난 것처럼 유효전력을 배터리 전압으로 나눈 전류를 전류원의 제어신호로 입력했다. 본 시뮬레이션에서 사용한 파고(Hs)와 파주기(Te)는 본 시뮬레이션 대상지인 추자도에서 발생하는 주요 파랑조건이다.

또한, 파랑에너지를 이용하는 파력발전용 전력변환장치는 다른 재생에너지용(태양광, 풍력 등) 전력변환장치와는 다른 특성이 필요하다. 파랑에너지는 에너지 변동 주기가 수 초 단위로 변하기 때문에 파력발전용 전력변환장치는 빠른 동적 응답이 필요하다. 빠른 동적 응답을 얻을 수 없으면 최대출력제어(Maximum Power Point



[ 파력발전 Data ]

(a)



(b)

Fig. 11. (a) Time series output power data of wave energy converter (b) DC-linked wave energy converter system modeling.

Tracking, MPPT)를 위한 최적의 부하를 줄 수 없기 때문에 파력발전장치의 출력 발전량이 감소할 수 밖에 없다. 즉, 파력발전을 구성하는 장치들(진동수주실, 터빈, 발전기, 전력변환장치) 중 입력에너지에 대한 부하는 전력변환장치 밖에 줄 수 없기 때문에 전력변환장치가 빠른 동적 응답성을 가지고 최적의 부하를 주는 것이 파력발전장치의 전체적인 효율을 향상 시킬 수 있는 방법이다.

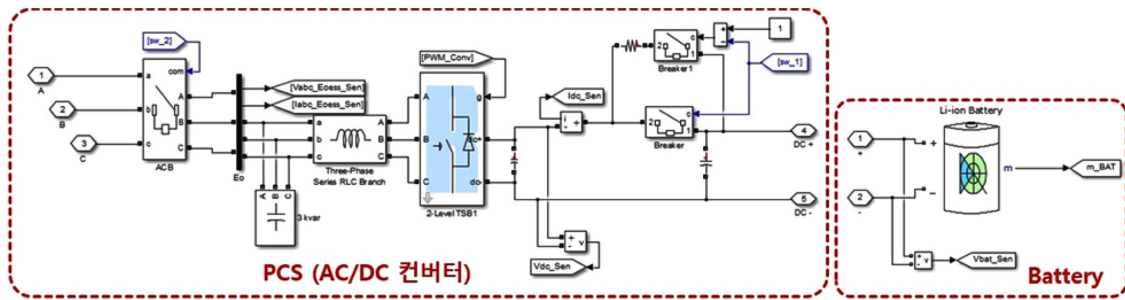
2.5 에너지저장장치 시스템 모델링

Fig. 12(a)는 Matlab/Simulink 기반 에너지저장장치 모델을 나타낸다. 에너지저장장치는 계통으로부터 배터리에 전력을 충전하거나 방전을 수행하는 전력변환 시스템을 나타낸다. 직류를 교류로 변환하거나 역변환하기 위한 전력변환장치가 필요하며, ESS PCS 출력필터를 통해 배터리 전압이 평활된다. 커패시터가 포함하기 때문에 Fig. 12(b)에 나타난 것처럼 Ramp Control을 통해서 초기 충전회로가 필요하며, 차단기를 통해 계통과 연계했다. 그리고 계통

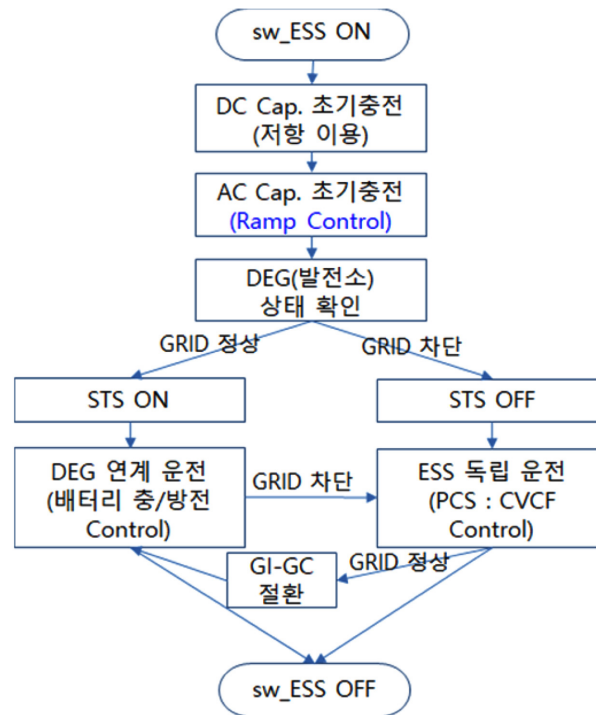
의 위상 검출을 위한 PLL 알고리즘, 전류제어 알고리즘을 적용했고, 계통과 전압을 맞추고 전기적 절연을 위해 변압기가 사용했다. 또한 계통 차단시에는 에너지저장장치가 독립적으로 부하에 전력을 공급해야 하기 때문에 정전압, 정주파수 제어 알고리즘을 적용했다. Fig. 12(b)는 에너지저장장치 시스템의 운용 시퀀스플로우차트로 나타낸다.

Fig. 13은 에너지저장장치 운용에 따른 출력 파형을 나타낸다. Fig. 13(a)는 계통 전력을 이용하여 에너지저장장치의 배터리에 충전 및 방전 테스트를 나타낸다. (+)는 1.0 p.u.인 1C-Rate 기준 1 MWh로 배터리 방전을 수행하고, (-)는 0.5[p.u.]인 0.5C-Rate 기준 0.5 MWh를 충전한다. 충전/방전 레퍼런스가 0인 구간은 출력이 발생하지 않는다. Fig. 13(b)는 계통 연계 여부에 따른 에너지저장장치 출력 상태를 나타낸다. 6초를 기준으로 계통과 연계되는 계통연계모드로 수행되며, 배터리를 방전하여 계통과 부하로 전력을 공급한다. 0.5 [p.u.]를 방전하고 있으며, 이중 0.18 [p.u.]는 계통으로, 0.32 [p.u.]





(a)



(b)

Fig. 12. (a) MATLAB / Simulink based ESS model, (b) ESS Operation Sequence Flow Chart.

는 부하로 공급된다. 6초 이후에 계통을 차단하면 에너지저장장치는 단독운전모드로 전환되어 전압제어를 수행한다. 이 때 부하에는 안정적인 전원을 공급하고 기존의 0.32 [p.u.]에 안정적인 전력이 공급되고 있다. 파력발전을 연계한 마이크로그리드 시스템 통합 모델은 Fig. 14에 나타난다.

### 3. 파력발전 연계형 마이크로그리드 운용전략을 위한 알고리즘 검증

#### 3.1 파력발전 연계형 에너지저장장치 시스템 운용 알고리즘 검증

파력 발전원은 파랑 데이터인 파고(Hs) 1.75, 파주기(Te) 8.75를 기준으로 운용하였으며 파력발전 특성을 반영하여 수일간 파력발전 전력을 에너지저장장치의 배터리에 충전하다가 파력발전이 없는 시점부터는 배터리 방전을 통해 부하에 전력을 공급하는 형태이다.

파랑 데이터 선택 조건은 본 시뮬레이션 대상지인 추라도에서 발생할 수 있는 최대 에너지 조건과 유사하다. 이때, 시뮬레이션 상 5분은 1초, 하루가 288초로 시뮬레이션 되기 때문에 2,000초는 약 7일을 나타낸다.

Fig. 15는 파력발전 출력 및 에너지저장장치 시스템의 특성을 나타낸다. Fig. 15(a)에 나타난 것처럼 파력발전은 변동성이 크기 때문에 적절한 에너지저장장치 용량 선정이 필요한 것을 확인할 수 있다. 또한 발전이 되지 않는 기간에도 부하에 전력을 공급하기 위한 에너지저장장치 용량이 필요할 것이다. Fig. 15(b)에 나타난 것처럼, 본 연구에서 선정한 에너지저장장치 용량은 파력발전 출력 변동성이 크더라도 에너지저장장치의 용량이 충분히 크기 때문에 배터리에는 영향이 가지 않으며 안정적으로 충전되어 SOC가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 파력발전용 에너지저장장치 시스템은 다른 재생에너지보다 최고 발전량 대비 평균 발전량이 매

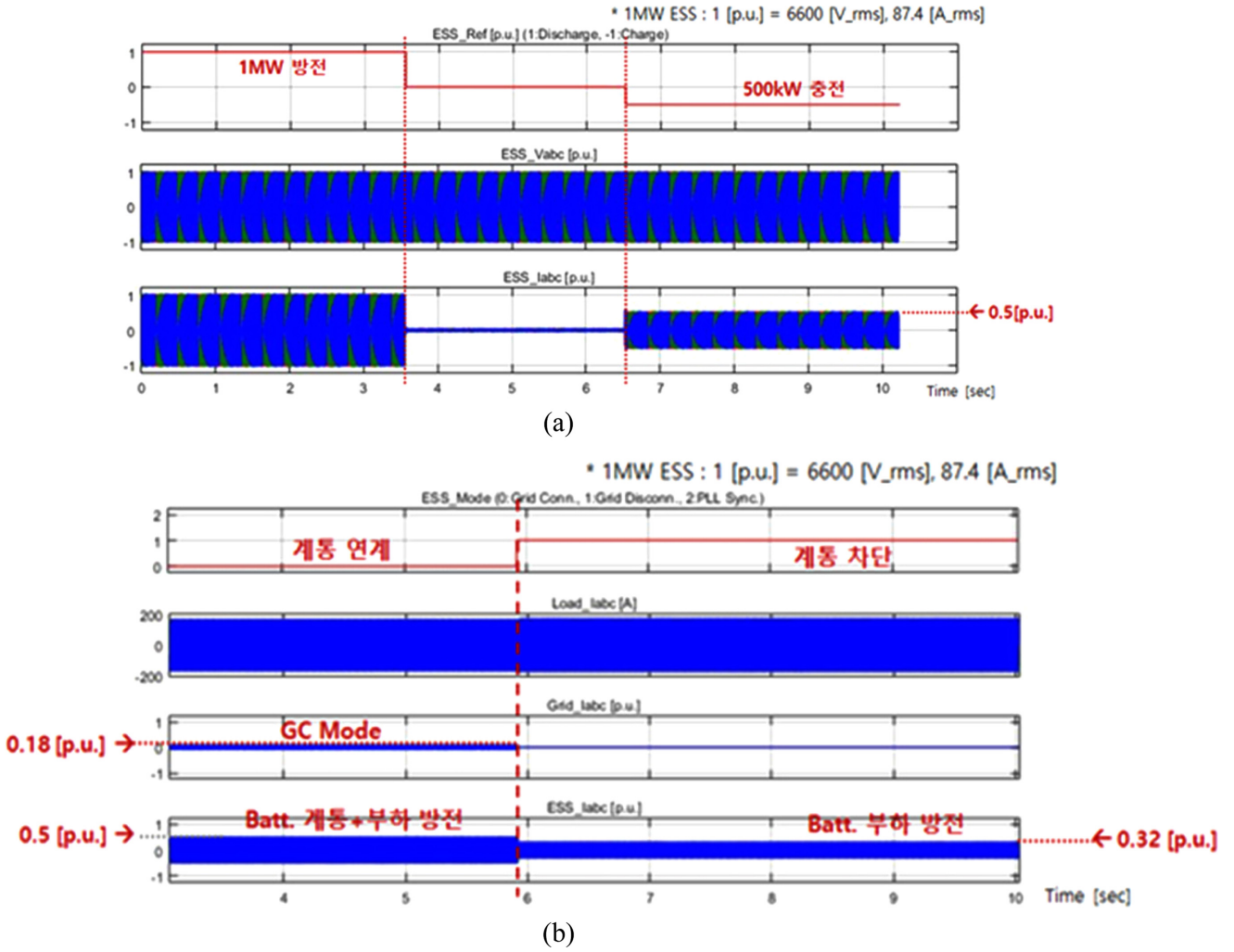


Fig. 13. (a) ESS output waveform according to charge/discharge, (b) Output waveform according to the grid state (ESS Mode).

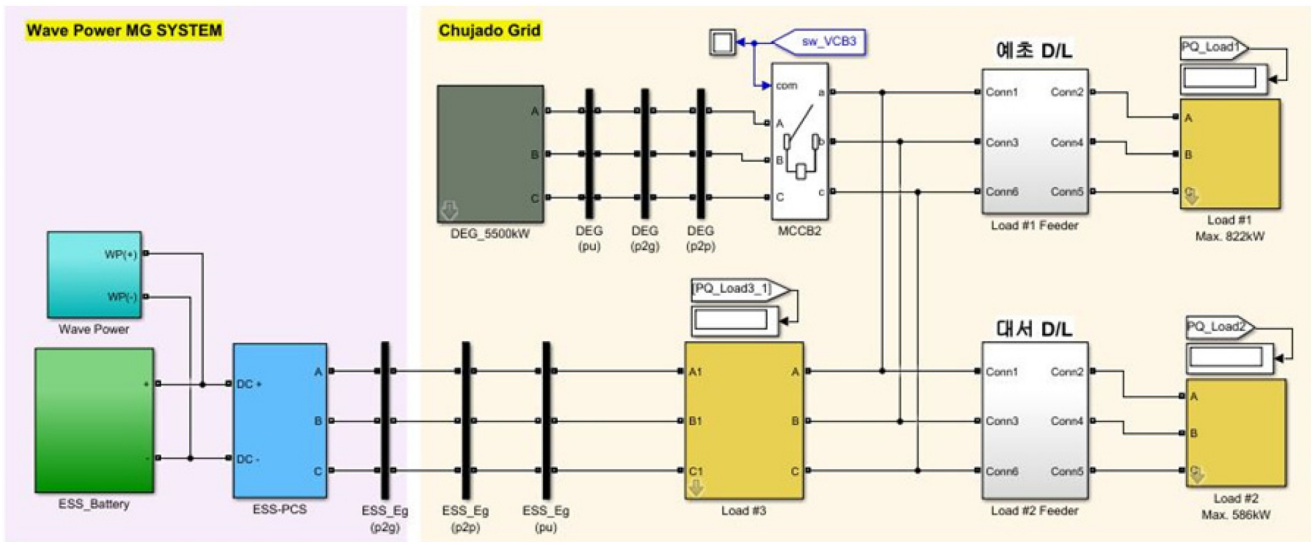


Fig. 14. Integrated model of Chujado grid and wave energy converter system.

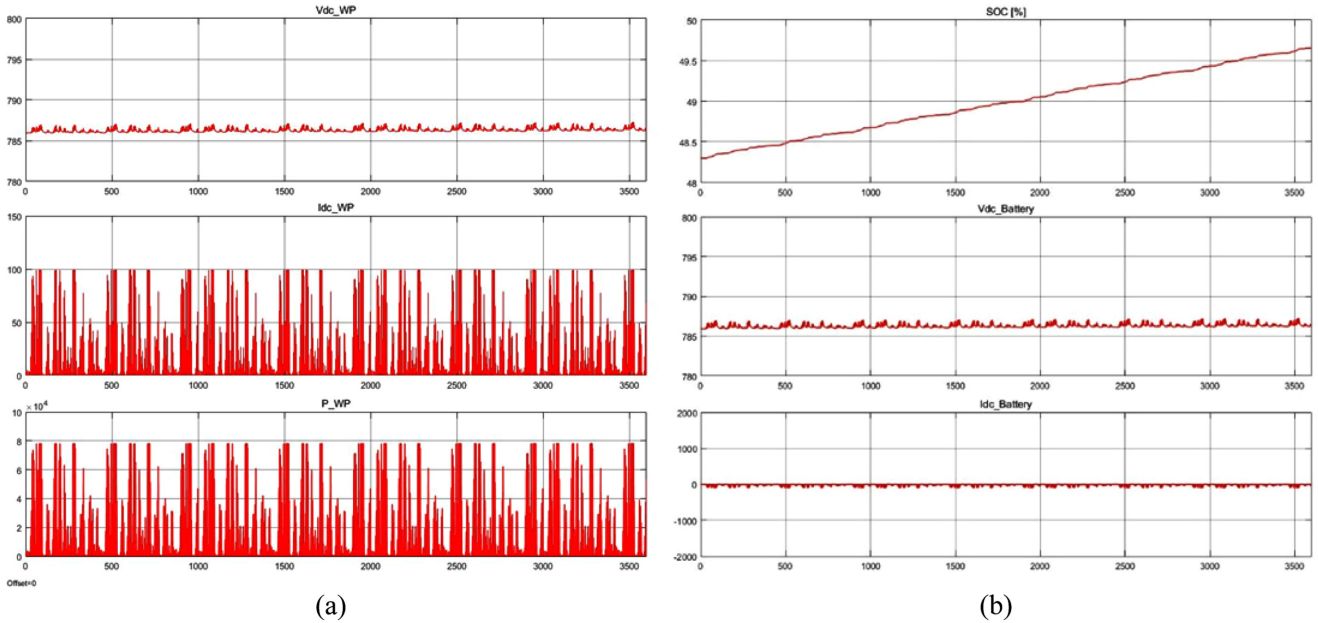


Fig. 15. (a) Wave energy converter output characteristics: DC Voltage, Current and Power, (b) Characteristics of energy storage system: battery SOC, voltage, current.

우 작기 때문에 충분한 용량 확보가 필요한 것을 본 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있다.

### 3.2 정전 및 사고 상황 모의를 통한 운용 알고리즘 검증

파력발전장치가 연계된 추자도 배전망이 정전되었을 경우를 시뮬레이션을 통해 모의하였다. 추자도의 배전망은 디젤발전기 총 5.5MW로 구성된 내연발전소이며 디젤 발전원이 탈락했을 경우 정전이 발생하게 된다. 파력발전 통합 시스템은 목리 부하 내 목리 잔동에 연계하여 목리 부하를 마이크로그리드 부하로 선정하였다. 따라서 추자도 망에 정전 발생 시 목리 마을은 정상적으로 전력을 공급 받으나 그 외의 부하는 모두 전력 공급을 받지 못한다. 이러한 정전 과정을 모의하고 마이크로그리드 부하에 전력을 안정적으로 공급하는 알고리즘을 수행하였다.

우선적으로 전력 계통은 대부분 교류 3상 회로로 구성되며 여기서 발생할 수 있는 대표적인 사고의 종류는 가공선에서의 단선사고 및 가공선로와 지중 Cable 선로의 지락사고, 단락사고이다. 주로 발생하는 사고는 1선 지락 사고, 2선 지락 사고, 선간 단락 사고, 3상 단락사고 등이 존재하며 사고 종류별 특징은 Table 1과 같이 요약할 수 있다.

Table 1. Comparison by accident type

사고 종류	사고전류 크기	발생 빈도
1 선 지락 사고	↓	↑
선간 단락 사고		
2 선 지락 사고		
3 상 단락 사고		

Fig. 16는 사고 모의를 위한 Matlab/Simulink 모델 구성을 나타내고 있다. 사고 모의는 'Fault block'을 통해 사고가 발생하는 시간과 사고 유형을 선택할 수 있으며, 고장 시간은 'step signal block'을 이용해서 원하는 시점을 선택할 수 있다.

Fig. 17은 사고 모의에 따른 사고 전류의 출력 파형을 나타낸다. Fig. 17(a)처럼, 1상 지락 발생에 의하여 A상 전압은 0이 되고, 사고전류가 발생한다. 사고 파형은 에너지저장장치의 변압기 계통 측 파형이며 사고 전류가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 17(b)처럼, 2선 단락 발생에 의하여 A상 전압과 B상 전압은 크기가 반으로 작아지고 크기가 같게 되며, 단락에 의한 사고전류가 발생한다. 사고 파형은 에너지저장장치의 변압기 계통 측 파형이며 사고 전류가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 17(c)처럼, 3상 지락 발생에 의하여 A상, B상, C상 전압은 0이 되고, 사고전류가 발생한다. 사고 파형은 에너지저장장치의 변압기 계통 측 파형이며 사고전류가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 일반적으로 에너지저장장치는 사고 발생 시, 과전류로 인하여 고장 신호가 발생하고 시스템을 멈추게 된다.

추자도 배전망은 디젤 발전기에 의하여 운용되고 있으며 사고로 인한 정전 발생 시 부하 전력공급이 중단되어 정전이 발생 할 수 있기 때문에 파력발전 시스템을 통한 정전 방지에 대한 시뮬레이션을 수행했다. Fig. 18(a)와 같이 디젤 발전기 운용 중, 28초에 사고를 모의하여 디젤 발전원의 출력을 강제로 중단한 상태이다. 디젤 발전기의 동작이 정지하면 부하의 전력공급은 중단되기 때문에 정전이 발생한다. 하지만 Fig. 18(b)와 같이 목리 부하는 파력발전 시스템을 구축하였기 때문에 에너지저장장치에 의하여 전압 및 주파수가 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 18(c)와

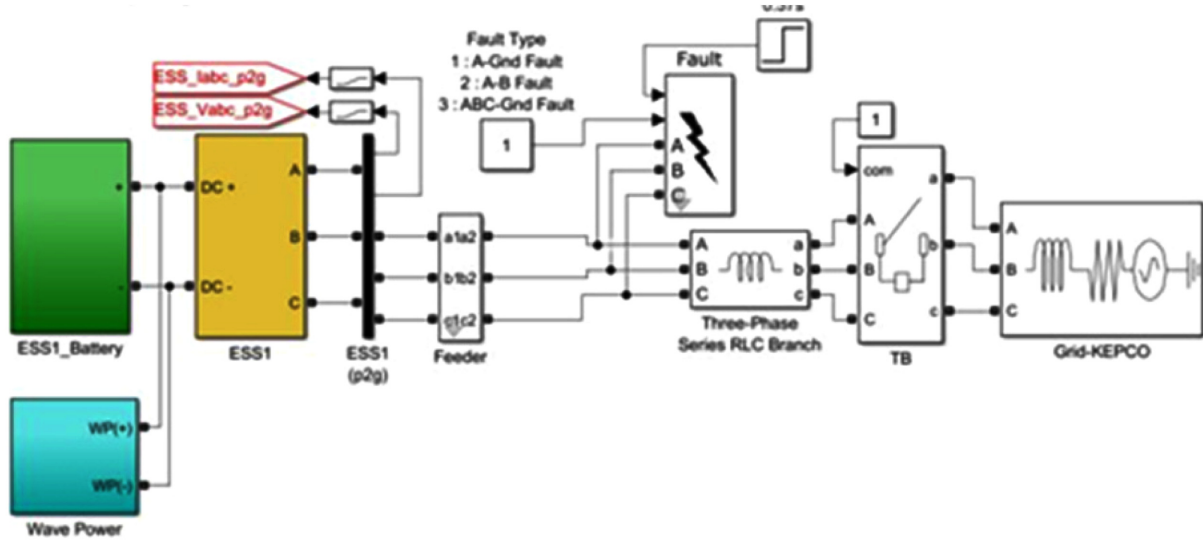


Fig. 16. Matlab/Simulink Model Construction for Incident Simulation.

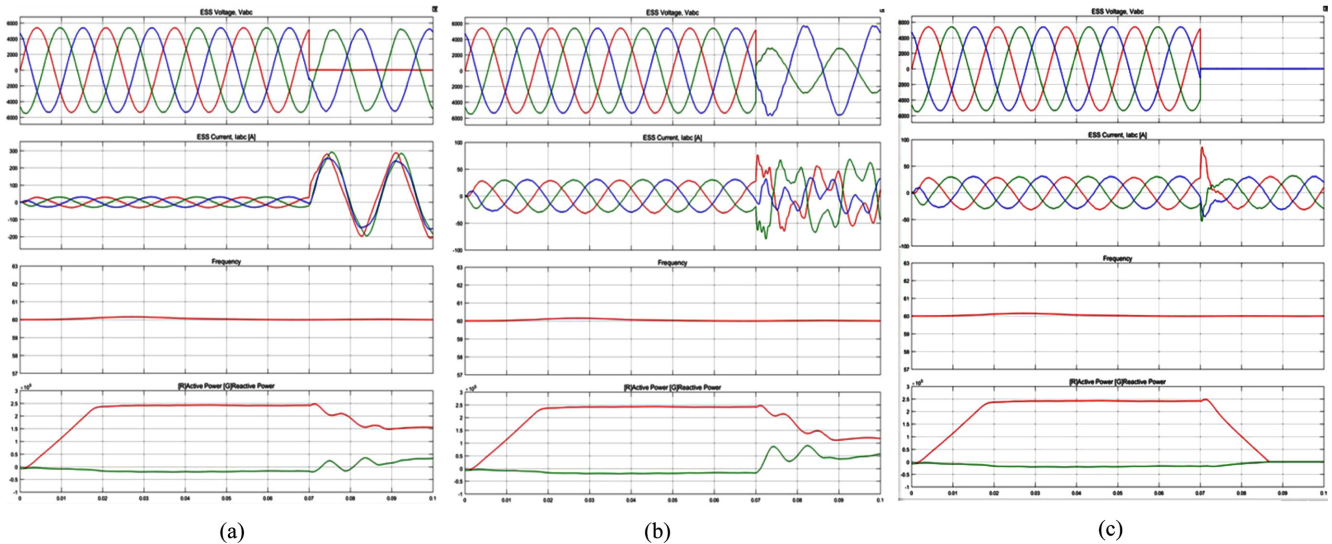


Fig. 17. Fault current of (a) one-phase ground fault accident, (b) two-wire short circuit fault accident, (c) 3-phase ground fault accident.

같이 정전 순간부터 에너지저장장치의 배터리를 통한 부하 전력 공급을 수행하기 때문에 배터리의 SOC가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 ESS 시스템이 연결된 목리 부하는 정전이 발생해도 지속적으로 전력을 공급받을 수 있다.

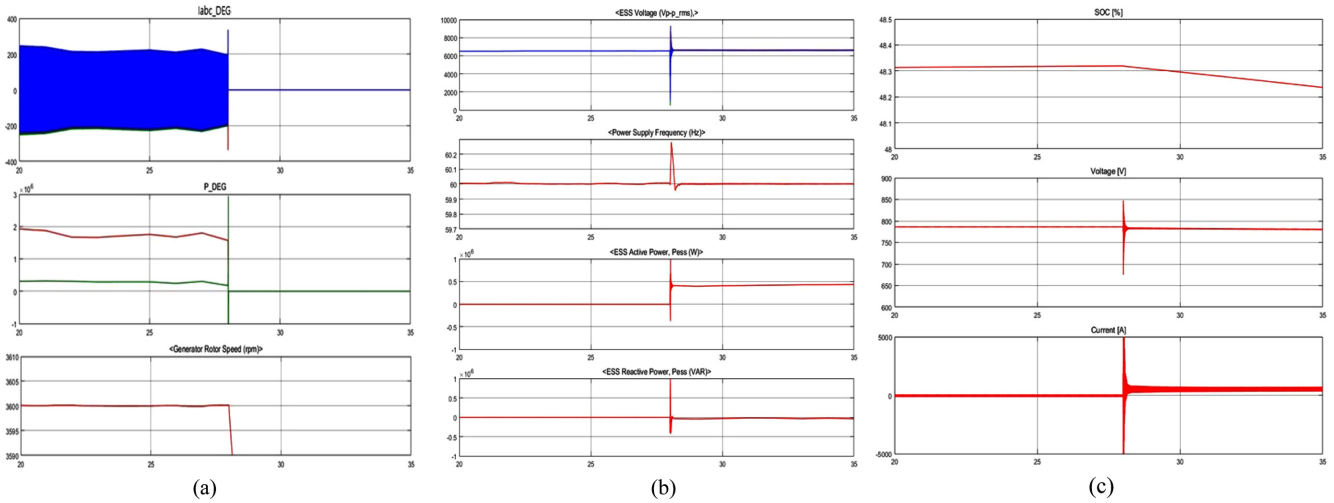
Fig. 19(a)와 같이 디젤 발전기에 의하여 정전이 발생하면 예초 D/L 구간은 디젤 발전소와 같은 지점이기 때문에 정전이 된다. 하지만 Fig. 19(b)와 같이 목리 D/L 구간에는 과력발전 시스템이 구축되어 있기 때문에 정전이 발생하지 않고 안정적인 전력공급이 수행되는 것을 확인할 수 있다. 예초 D/L 구간에서 부하의 전압 파형이 이상한 이유는 계산에 의한 시뮬레이션이기 때문에 연산 오류로 생각할 수 있다. 그리고 디젤 발전기가 멈추는 28초에서 전압 및 주파수가 흔들리는 이유는 순간적으로 모드가 바뀌었고, 변경된 부분도 함께 연산되기 때문이다.

### 3.3 피력발전을 연계한 추자도 전력망의 운용 알고리즘 검증

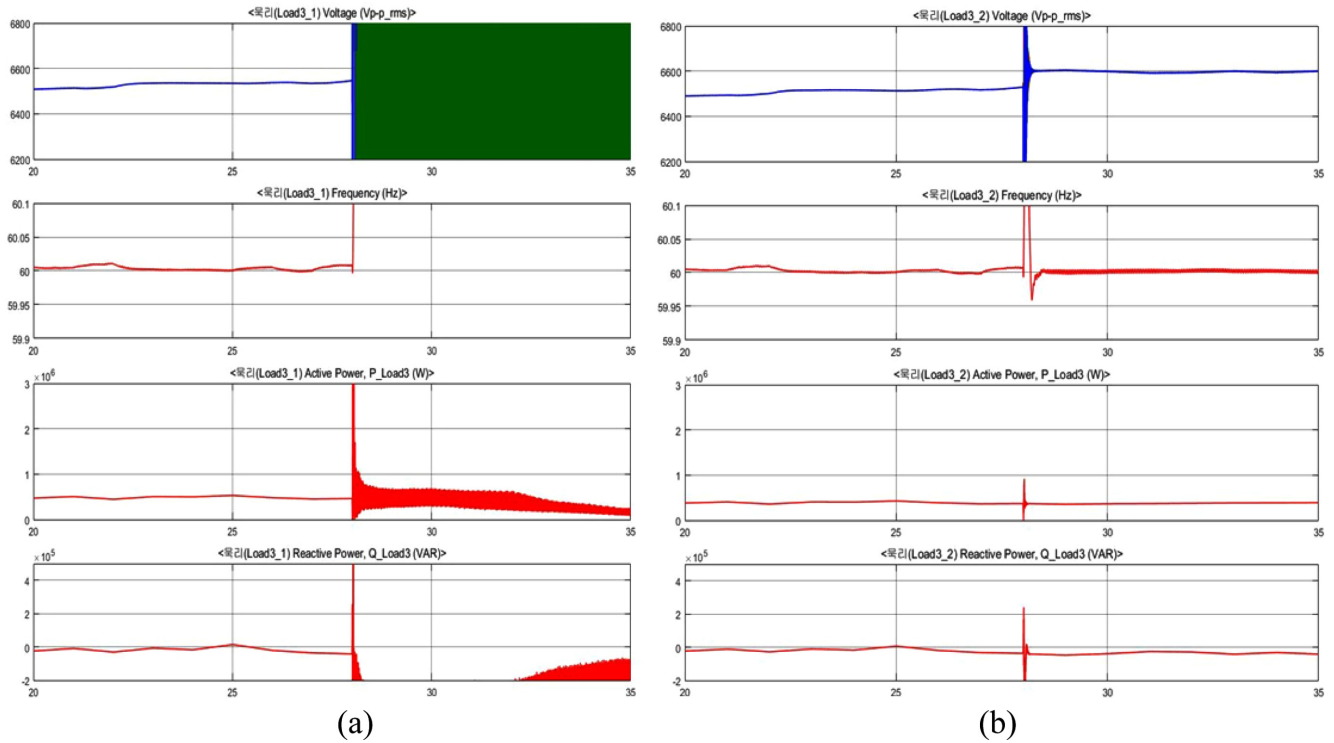
배전망을 안정적으로 운용하기 위해서는 부하용량과 발전용량을 예측하여 설계 및 운용하는 것이 중요하다. 그리고 배전망 대비하여 발전용량이 작은 경우에는 기존에 기저 발전원이 있는 상태이기 때문에 신재생원에 의한 배전망의 전력품질을 저하시키지 않아야 한다. 기존의 배전망이 없는 경우에는 배터리를 통해 부하에 안정적인 전력을 공급하는 것이 목적이며, 신재생원을 통해 배터리를 항상 충전할 수 있어야 한다. 하지만 신재생원의 경우 항상 발전이 가능하지 않기 때문에 예측을 통한 최적 운용이 필요하다. 과력발전을 연계한 추자도 배전망의 최적 운용 알고리즘을 위해 고려해야 하는 기능은 다음과 같다.

#### 3.3.1 전력안정화(Power Smoothing) 기능

전력 안정화(Power Smoothing) 기능은 디젤 발전기의 전력 변

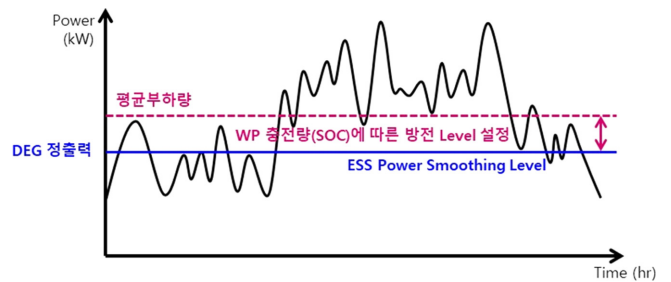


**Fig. 18.** (a) Diesel generator output voltage, PQ, Rotor speed (28s power failure), (b) ESS output voltage (Vrms), frequency, active power, reactive power, (c) SOC, Voltage and Current of battery.



**Fig. 19.** (a) Yecho D/L-Line and (b) Muk-li D/L-Line voltage (Vrms), frequency, active/reactive power.

동 및 부하의 전력변동을 저감하여 디젤 발전기의 운전 범위를 감소하여 연료 소비를 줄이는 고효율 운전 방식이다. 이 기능을 위해서는 에너지저장장치의 약 250 kWh의 배터리로 부하 평균 전력량보다 디젤 발전기 출력량이 큰 경우 충전을 수행하고, 반대의 경우 방전을 수행하여 1일 운용 평균 전력량이 일정하도록 한다. 파력발전 시스템은 파력에 의해 평균 21 kWh씩 배터리를 충전하게 된다. 이 에너지에 의하여 배터리는 초기 0 MWh에서 지속적으로 충전을 하게 되며, 일정 시간이 지나면 계속적으로 충전되어 완충 상태가 된다. 하지만 신재생원의 발전을 최대한으로 저장할 수 있어야 발



**Fig. 20.** Power smoothing Algorithm Using ESS System for reducing diesel generator output.

전 손실이 발생하지 않기 때문에 항상 완충 상태가 되지 않기 위해서 기존의 전력 안정화(Power Smoothing) 기능과는 다른 운용 알고리즘에 보완이 필요하다. Fig. 20는 본 논문에서 제안하는 전력 안정화(Power Smoothing) 기능을 나타낸다. 즉, 전력 안정화(Power Smoothing) 기능은 평균 부하량을 기준으로 전력 변동을 보상하는

데 평균 부하량보다 디젤발전기의 설정 전력을 낮추어 운용을 수행하여 이 문제를 해결 할 수 있다. 설정 전력을 낮추게 되면 디젤발전기의 출력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 배터리를 동시에 방전할 수 있기 때문에 항상 충전 상태를 만들 수 있다.

Fig. 21(a)에 나타난 것처럼 전력 안정화(Power Smoothing) 알

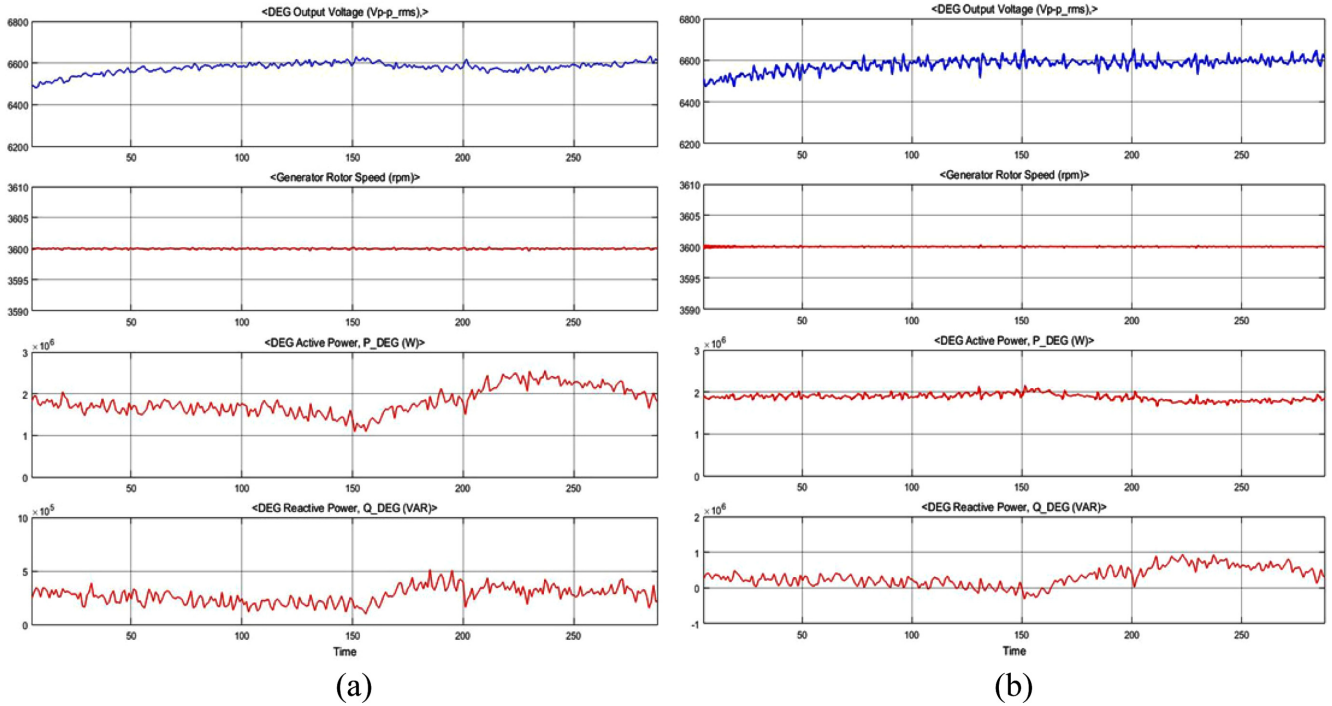


Fig. 21. Diesel generator output (a) before the algorithm and (b) after the algorithm is applied (Vrms, Rotor Speed, P, Q).

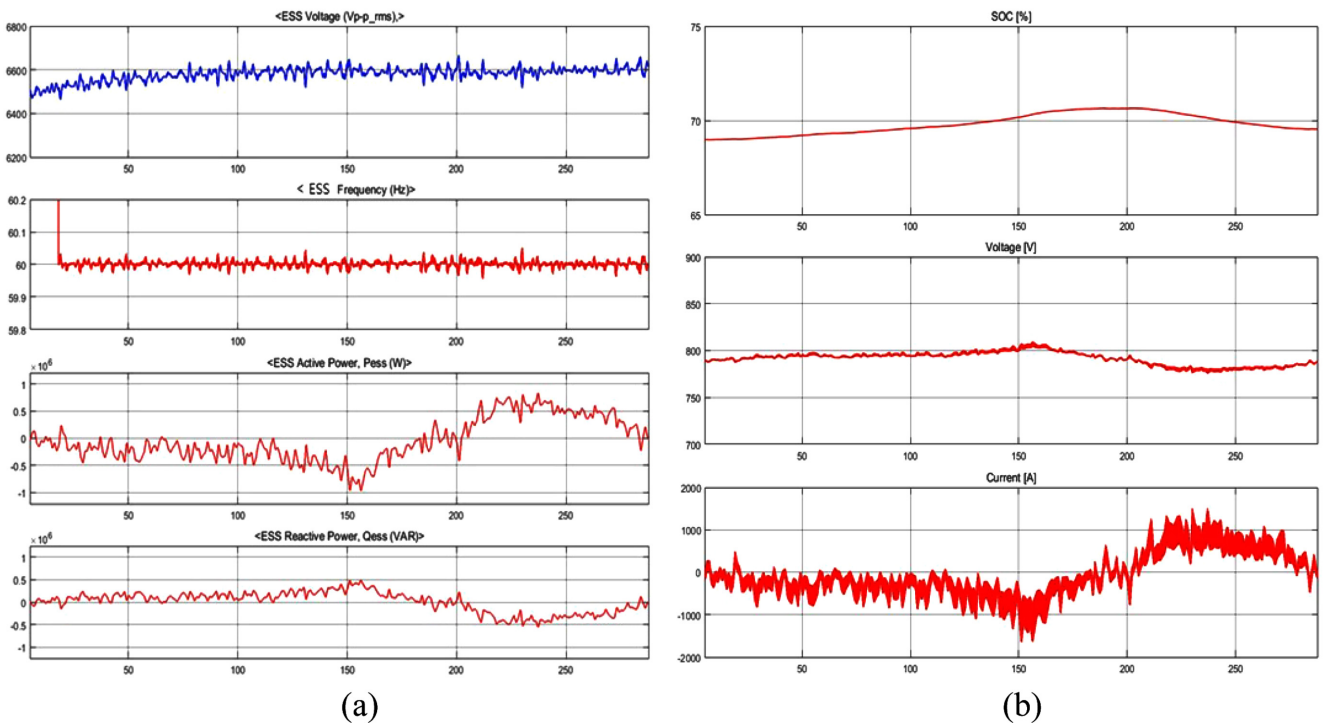


Fig. 22. (a) ESS output (Vrms, Freq., PQ), (b) Battery SOC, voltage, current in ESS operation.

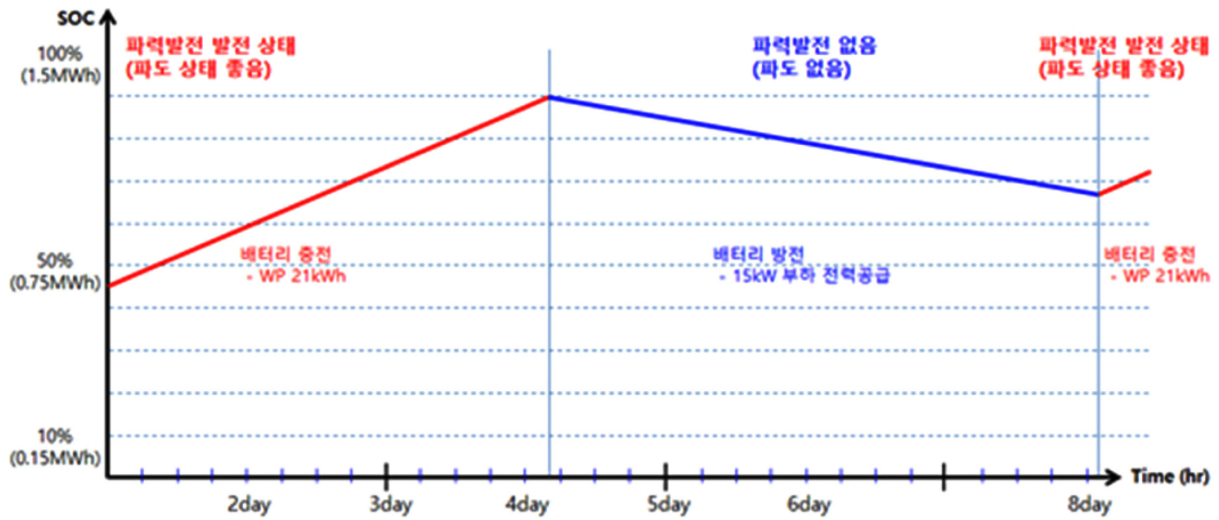


Fig. 23. Grid operation plan according to diesel power plant status and battery SOC.

고리즘을 적용하기 전에는 추자도 내 부하가 실시간으로 변화함에 따라 디젤발전기의 출력이 1.1 MW에서 2.5 MW로 2배 이상으로 크게 변동하는 것을 확인하였다. 이러한 이유로 실제 추자도 망은 한전의 전압 및 주파수 규정을 넘어서는 등 전력 품질이 좋지 않다. 하지만 Fig. 21(b)와 같이 에너지저장장치를 투입하여 전력 안정화(Power Smoothing) 알고리즘을 적용한 경우 디젤발전기의 출력 변동량은 1.6 MW에서 2.1 MW 사이로 이 전보다 훨씬 안정적으로 운전되고 있음을 확인하였다. 이때 부하의 변화량에 대해서는 에너지저장장치의 전력변환장치가 응답성도 빠르고 용량도 크기 때문에 모두 대응이 가능하다. 특히, 디젤발전기는 일정 출력선을 유지하는 고효율 운전이 요구되는 분산전원으로 에너지저장장치의 이러한 기능을 적용하면 경제성 및 안정성 모두 확보할 수 있다. 또한 Fig. 22은 전력 안정화(Power Smoothing) 알고리즘 적용 시의 에너지저장장치 출력 및 배터리 과형을 나타낸다. 계통이 안정된 만큼 ESS 시스템의 출력 전력과 전류가 크게 변화하는 것은 확인할 수 있다.

### 3.3.2 파력발전 통합 시스템 독립 운전 시 최적 운용

기존 배전 시스템이 없어서 전력 공급을 받지 못하는 도서에 전력을 공급하기 위해서는 에너지저장장치를 통한 정전압/정주파수(CVCF) 기능이 필요하다. 또한 파력발전 특성에 따라서 연속되는 많은 에너지량을 저장할 수 있고, 수일에 걸쳐 발전이 되지 않는 상황에도 배터리에 저장된 에너지를 이용해서 전력을 공급할 수 있는 용량이 필요하다. 즉, Fig. 23과 같이 파력발전을 통한 충전이 불가능해도 배터리를 통해 부하에 수일간 전력 공급이 가능할 수 있도록 에너지저장장치 시스템이 설계되어야 한다. 이와 같은 독립 시스템의 경우, 항시 파력 발전원이 동작하여 배터리가 완충되는 경우에는 파력발전 시스템의 운용을 중지하거나 여러 대 중에서 한 대 운용으로 전환해야 한다. 그리고 가장 중요한 것은 부하와 파력발전을 정확히 예측하여 설계 및 운용에 반영하는 것이 필요하다.

## 4. 결 론

파력발전 연계형 마이크로그리드를 위한 에너지저장장치 시스템에 대해 분석하기 위해서 본 논문은 추자도 배전망을 기반으로 한 에너지저장장치 알고리즘 시뮬레이션을 진행하였다. 기존의 재생에너지(태양광발전, 풍력발전)보다 더욱 입력 에너지의 변동성이 큰 파력발전을 도서지역 배전망에 연계하기 위한 에너지저장장치 시스템의 구성 방안 및 적합성에 대해서 분석하였고, 고장 및 사고 대처 방안 그리고 배전망 최적화 운용알고리즘을 수행하였다. 이를 기반으로 도서지역의 파력발전을 연계한 마이크로그리드의 특성을 분석하였다. 시뮬레이션의 정확성을 높이기 위해서 추자도 배전망 모델링은 직접 측정된 부하데이터를 이용해서 진행했으며, 파력발전 특성을 반영하기 위해서 직접 계측된 입력 파랑에너지를 이용해서 모델링을 진행하였다. 이를 Matlab/Simulink를 이용해서 시뮬레이션을 진행하였고 실시간 시뮬레이션을 위해서 OPAL-RT를 적용하였다. 마지막으로 마이크로그리드 및 에너지저장장치의 운용 알고리즘은 Matlab의 StateFlow기반으로 구성해서 운용 알고리즘의 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 결과는 향후 추자도 배전망에 파력발전을 연계한 마이크로그리드 및 에너지저장장치 시스템 운용에 사용될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 ‘방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발(PMS4280)’의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

[1] Aymen, C., Rashad, M.K., Ridha, A., Ken, N., 2012, Multi-objective Intelligent Energy Management for a Microgrid, IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 60(4), 1688-1699.
- [2] DeSieno, C.F., Marchenko, P.P., Vassell, G.S., 1970, General Equations for Fault Currents in Transmission Line Ground Wires, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89(8), 1891-1900.
- [3] Kim, D.W., Ko, J.H., Kim, S.H., Kim, H.M., Kim, E.H., 2014, Renewable Energy Configuration Plan of Micro-Grid in Gapa Islan, J. the Korean Sol. Energy. Soc., 34(2), 16-23.
- [4] Laaksonen, H., Saari, P., Komulainen R., 2006, Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid, IEEE 2005 International Conference on Future Power Systems.
- [5] Lee, K.B., Son, K.M., 2013, A Study on the Grid-Interfacing Storage System for Migrating Customers with Renewable Energy Sources into Microgrid, J. the Korean Inst. of Illum. and Electr. Install. Eng., 27(5), 46-53.
- [6] Lidula, N.W.A., Rajapakse, A.D., 2011, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems", ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 186-202.
- [7] Markel, P., John, V.R., 2016, A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters, energies, 9(506), 1-45.
- [8] Piotr, B., Lukasz, M., 2009, Simulink Models of Power Electronic Converters for DC Microgrid Simulation, IEEE Compatibility and Power Electronics.
- [9] Roh, C., Choi, J.S., Kwak, S.S., Kim, K.H., 2020, A Study on Model Predictive Current Control Method of Power Converter for Fast Dynamics Response in OWC Wave Energy Converter, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy., 23(1), 1-12.
- [10] Roh, C., Kim, K.H., Kim, J.H., Hong, K.Y., 2019, A Comparison of PWM methods for Power Converter of OWC Wave Power Generation System, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy., 22(2), 84-94.
- [11] Tomislav, P., Toni, B., Zeljko B., 2012, Simplified Averaged Models of DC-DC Power Converters Suitable for Controller Design and Microgrid Simulation, IEEE Transactions on Power Electronics, 28(7), 3266-3275.

---

Received 9 April 2020

Revised 27 April 2020

Accepted 18 May 2020