

추자도 마이크로그리드 구축에 관한 연구

A Study on the Establishment of the Microgrid in Chujado Island

강민혁*, 김동완**, 김일환*

Min-Hyeok Kang*, Dong-Wan Kim**, Eel-Hwan Kim*

Abstract

At present, domestic small islands mainly supply electric power using diesel generators. However, diesel generators can cause instability of the power system due to slow response on power load fluctuation, and cause environmental problems due to the emission of carbon gas by using fossil fuels. In order to overcome this problem, this paper proposes a method to establish an optimal microgrid by introducing solar power, wind power, and energy storage device to Chujado Island, which is supplied with electric power through a diesel generator. The economical optimum capacity of each distributed power source is calculated by using HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) program and the proposed microgrid is validated by using PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design/ Electromagnetic Transients including DC) program which can analyze system stability.

요약

현재 국내 소규모 섬들은 주로 디젤발전기를 이용하여 전력을 공급하고 있다. 그러나 디젤발전기는 부하변동에 대한 속응성이 느리기 때문에 계통을 불안정하게 할 수 있고, 화석연료 사용에 의한 탄소가스 배출로 환경문제를 야기한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 본 논문에서는 주전원을 디젤발전기를 통하여 전력을 공급받고 있는 추자도에 태양광발전, 풍력발전, 에너지저장장치를 도입하여 최적의 마이크로그리드를 구축하는 방안을 제안한다. 이때 각 분산형 전원의 경제적 최적용량은 HOMER(Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) 프로그램을 이용하여 산정하였고, 이를 계통의 안정성을 분석할 수 있는 PSCAD/EMTDC(Power Systems Computer Aided Design/ Electromagnetic Transients including DC) 프로그램을 활용하여 제안한 마이크로그리드의 타당성을 입증한다.

Key words : Chujado Island, Microgrid, Independent Island Microgrid, HOMER, PSCAD/EMTDC

* Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University

** Energy Research & Development Center, Jeju Energy Corporation

★ Corresponding author

E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : +82-64-754-3674

※ Acknowledgment

This work was supported by the 2019 education, research and student guidance grant funded by Jeju National University
Manuscript received Mar. 8, 2019; revised Mar. 23, 2019; accepted Mar. 28, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

2017년 제주특별자치도 CFI(Carbon Free Island) 2030 용역 보고서에 따르면 2030년까지 제주특별자치도에에서 소비되는 전력량을 해상풍력 1.9 GW, 육상풍력 450 MW, 태양광 1,411 MW 등 총 3.76GW 용량의 신·재생에너지로 공급하겠다는 계획을 마련하고 실행에 옮기고 있다[1]. 이러한 정책에 맞추어 본 논문에서는 제주특별자치도내 부속 섬 중 전력부하가 가장 큰 추자도를 모델 섬으로 정하여 모델링하고자 한다. 추자도는 주 섬인 상추자와 하추자도로 나뉘어져 추자대교로 서로 연결되어 있으

며, 상추자도에 대서D/L(Distributed Line)과 추자 내연발전소가 있고 하추자도에 예초D/L 및 목리 D/L이 있다. 추자도 내 주요 시설로는 추자초등학교와 중학교, 담수시설, 해군부대와 보건소, 경찰서, 소방서가 있다. 이러한 추자도내 부하에 전력을 공급하기 위해 내연발전소에 7대의 디젤 발전기가 있다[2]-[4]. 하지만 디젤 발전기는 환경 오염원을 배출하고 연료 가격 상승 시 경제성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 신재생 에너지를 이용한 태양광발전과 풍력발전 설비를 구축하고자 하는데 이는 부하 패턴에 맞추어 발전하는 것이 아니라 일사량과 풍속에 의존하기 때문에 출력 예측이 어렵고 변동성이 심하여 계통의 전력품질과 안정성을 떨어뜨린다는 단점을 가지고 있다. 신재생 에너지를 안정적인 전원으로 사용하기 위하여 마이크로그리드 구축 시 에너지저장장치(ESS : Energy Storage System)를 도입하여 신재생에너지원 및 부하변동을 제어한다. 본 논문에서는 마이크로그리드 구축을 위한 각각의 분산형 전원의 발전 용량은 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory) 연구소에서 개발한 HOMER(Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) 프로그램을 이용하여 산정하였고, 설계된 시스템의 전력계통 안정성을 평가하기 위해서는 전력전자 시스템과 계통안정성 해석이 가능한 PSCAD/EMTDC(Power Systems Computer Aided Design/ Electromagnetic Transients including DC) 프로그램을 사용하여 경제성과 계통 안정성을 고려한 마이크로그리드 설계방안을 고찰한다[5]-[7].

II. 본론

1. 추자도 마이크로그리드 용량산정

그림 1은 추자도 마이크로그리드 구축 시 발전 시스템 계통도이다. 디젤발전, 풍력발전, 태양광발전, ESS가 AC 계통에 연결되어 부하에 전력을 공급한다. 디젤발전기는 추자도 계통전압과 주파수의 기준점을 제공하는 역할을 가지며 용량산정을 위해 HOMER 프로그램에서의 디젤발전기 모델은 현재 추자도에 설치되어 있는 디젤발전기 용량과 출력이 동일한 모델로 사용하였다. 풍력발전은 풍력 터빈을 이용해서 바람에너지를 전기에너지로 변환하는 발전이다. 풍속으로부터 얻을 수 있는 풍력발

전의 출력은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

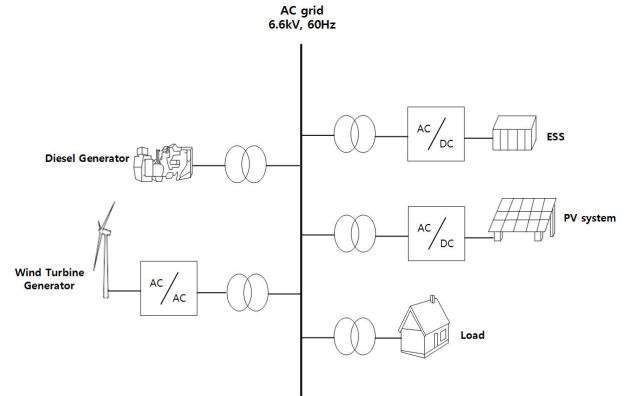


Fig. 1. Chujado Island Microgrid.
그림 1. 추자도 마이크로그리드

$$P_m(t) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{Pmax} \tag{1}$$

위 식에서 ρ 는 공기밀도[1.225 kg/m³], A 는 로터의 회전단면적[m²], C_{Pmax} 는 풍력발전의 최대출력 계수이다. 따라서 풍력발전 출력은 풍속의 세제곱에 비례한다는 것을 알 수 있으며 추자도의 풍속 와이블 분포는 그림 2와 같다. 여기서 와이블 분포의 형상계수 k 는 2.1이고, 척도계수 c 는 9.2[m/s]이다. [4]에 의하면 78m의 Enercon 2 MW 풍력발전기가 설치되었을 때 예측 풍속은 8.2[m/s]이다.

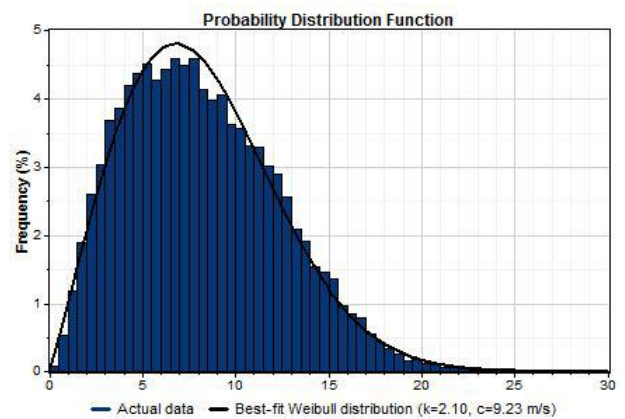


Fig. 2. Weibull distribution in Chujado Island.
그림 2. 추자도 풍속 와이블 분포

이는 제주도 최대 풍속이 약 7.0[m/s]임을 감안할 때 매우 높은 풍속이라는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 고도 78 m에서 Enercon E-82 2 MW 모델의 출력 곡선이다.

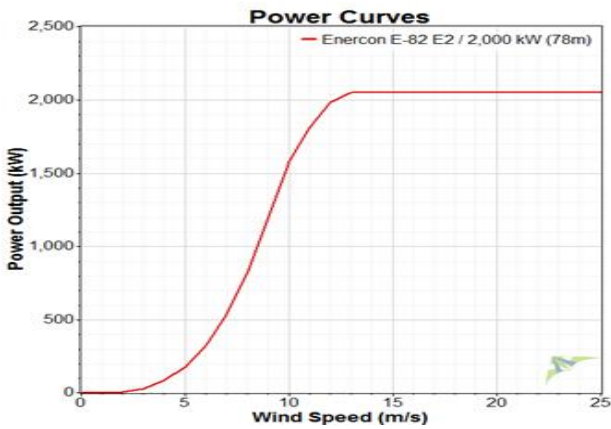


Fig. 3. Power curve of the Enercon E-82.
그림 3. Enercon E-82 출력 곡선

태양광발전은 태양전지를 발전소자로 사용하여 광기전력 효과를 통해 태양에너지를 전기에너지로 변환하는 발전으로 태양광발전 출력은 식(2)과 같이 표현된다.

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{G_T}{G_{T,STC}} \quad (2)$$

여기서 f_{PV} 는 PV derate 계수[%], Y_{PV} 는 PV 어레이의 정격용량[kW], G_T 는 PV 어레이의 태양복사 [kW/m^2]이고 $G_{T,STC}$ 는 표준테스트조건에서의 입사복사 [kW/m^2]이다. 이에 HOMER 프로그램에서 태양광발전 용량 산정을 위한 자료는 NASA Surface Meterology and Solar Energy 데이터를 활용하였다.

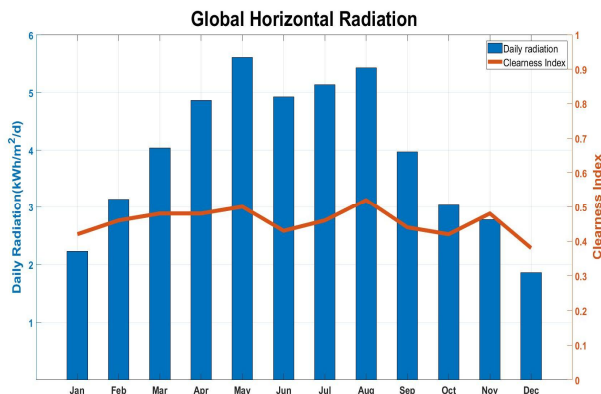


Fig. 4. Daily Radiation and Clearness Index in Chujado Island.
그림 4. 추자도 일사량 및 청명도

그림 4는 NASA Surface Meterology and Solar Energy에서 제공한 일사량 및 청명도이다. 일사량

은 4월부터 8월까지 높으나 이때 6월과 7월은 청명도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 에너지저장장치는 Li-ion 전지와 같은 2차 전지를 사용하여 전력을 충·방전한다. 구성은 배터리와 PCS(Power Conversion System)로 이루어져 있으며 본 논문에서는 신재생 에너지발전의 변동과 부하 변동을 제어하는 역할을 수행한다.

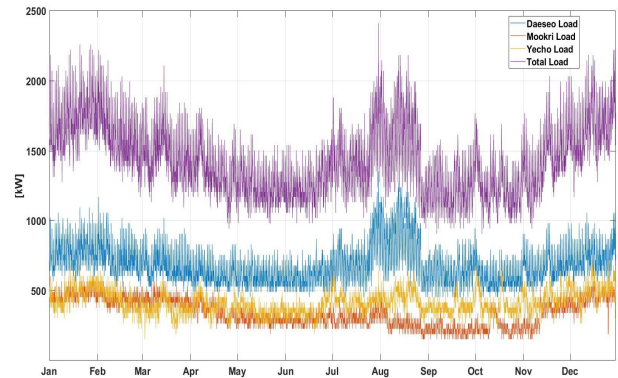


Fig. 5. Chujado Island Power Load in 2016.
그림 5. 2016년도 추자도 전력부하

그림 5는 2016년도 추자도 전력부하를 나타낸다. 위 그림에서 전반적으로 대서의 부하가 높고 예초와 목리가 비슷하게 전력을 사용하는 것으로 나타난다. 그러나 8월부터 11월 초까지는 예초 부하가 조금 더 높은 것을 확인할 수 있다. 각 D/L에서의 최대, 최소, 평균 부하는 표 1로 나타난다.

Table 1. Max · Min · Avg Load of Chujado Island in 2016.
표 1. 2016년도 추자도 최대 · 최소 · 평균 부하

D/L \ Load	Max(kW)	Min(kW)	Average(kW)
Daeseo	1,355	452	680
Yecho	602	151	339
Mookri	715	151	412
Total	2,409	904	1,431

위와 같은 추자도 부하 데이터와 HOMER 프로그램에서 제공하는 NASA Surface Meterology and Solar Energy 데이터 및 [4]에서 제안한 Enercon E-82를 활용하여 추자도 마이크로그리드 각 발전원별 용량산정을 진행하였다. 이때 마이크로그리드 발전기별 용량과 초기투자비(Capital), 교체비용(Replacement), 운영유지비(O&M)는 표 2이다.

Table 2. Cost of Chujado Island Microgrid.

표 2. 추자도 마이크로그리드 비용

Generator	Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
Diesel	1,000	-	-	24,070
Wind	2,000	4,974,000	4,974,000	3,979
PV	3,002	3,791,278	3,500,000	-
ESS	3,854 (kWh)	2,312,400	1,849,920	38,540

이 외에도 ESS 내부에 전력변환시스템(PCS)는 2,909 kW이며 디젤연료가격은 리터당 1달러로 산정하였다. 이에 현재 국내에서 생산하는 제품에 맞추어 용량을 산정하여 풍력발전 2 MW, 태양광발전 3 MW, ESS 4 MWh, ESS PCS 3 MW로 설계하였다.

2. 추자도 마이크로그리드 계통 안정성 분석

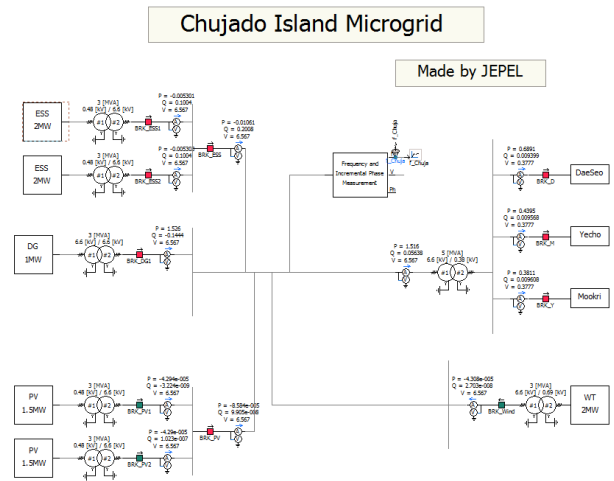


Fig. 6. Chujado Island Microgrid Modelling using PSCAD/EMTDC

그림 6. PSCAD/EMTDC를 활용한 추자도 마이크로그리드 모델링

그림 6은 계통 안정성 분석을 위한 추자도 마이크로그리드 모델링이다. 계통의 정상상태 및 과도상태를 해석하기 위하여 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였으며 모의해석의 신뢰성을 높이기 위하여 2016년도 추자도 전력부하 데이터와 실제 풍력발전 및 태양광발전의 출력 데이터를 사용하였다. 이에 풍력발전 및 태양광발전의 모델링은 그림 7과 같은 인버터 발전원 모델을 사용하여 모의해석을 진행하였다. 디젤발전기와 ESS의 모델링은 그림 8, 9로 나타낸다.

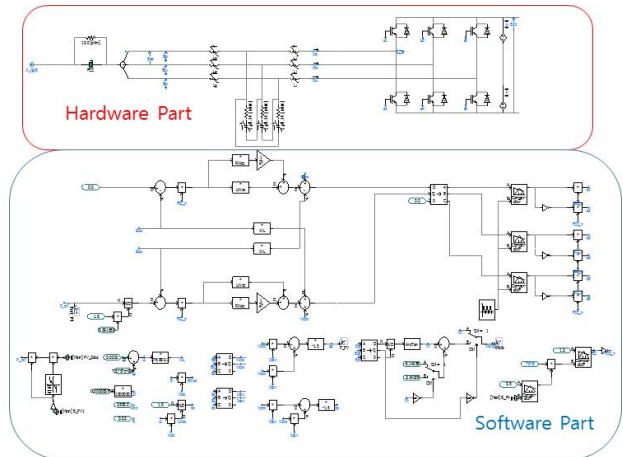


Fig. 7. Inverter Power Source for Wind Turbine and PV. 그림 7. 풍력과 태양광 발전을 위한 인버터 발전원

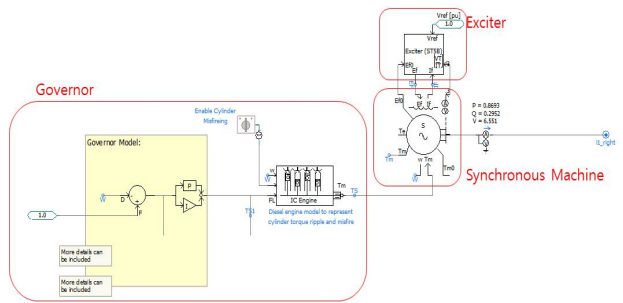


Fig. 8. Diesel Generator Modelling. 그림 8. 디젤발전기 모델링

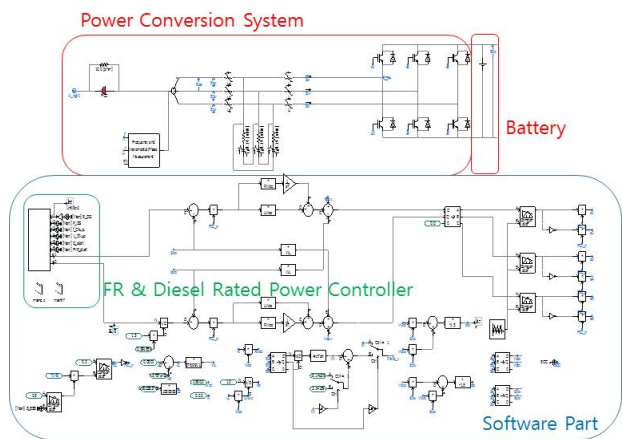


Fig. 9. Energy Storage System Modelling. 그림 9. 에너지저장장치 모델링

그림 9에서 ESS는 디젤발전기를 정출력으로 운전하게 하고 주파수 제어를 통하여 발전과 부하의 변동을 제어한다. 위와 같은 모델링을 통하여 HOMER 프로그램에서 산정한 마이크로그리드의 계통 안정성 분석은 그림 10과 같다.

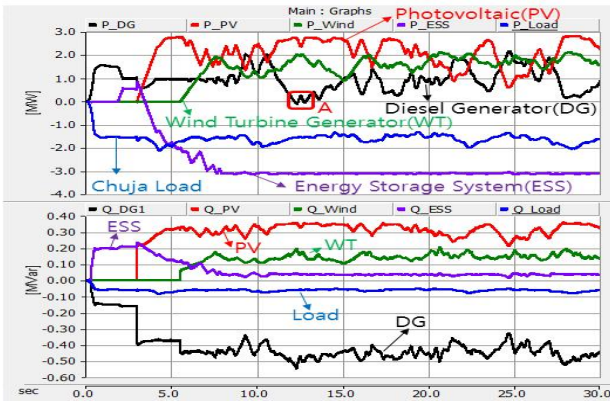


Fig. 10. Analysis of Chujado Island Microgrid(HOMER) using PSCAD/EMTDC program.

그림 10. PSCAD/EMTDC를 이용한 추자도 마이크로그리드(HOMER) 계통분석

그림 10에서 디젤발전기와 태양광발전, 풍력출력이 전부 투입되었을 때 ESS 출력이 PCS 용량에 제한이 걸려 디젤발전기의 출력이 변동하는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 Homer 프로그램을 활용한 추자도 마이크로그리드의 계통 주파수와 전압이다.

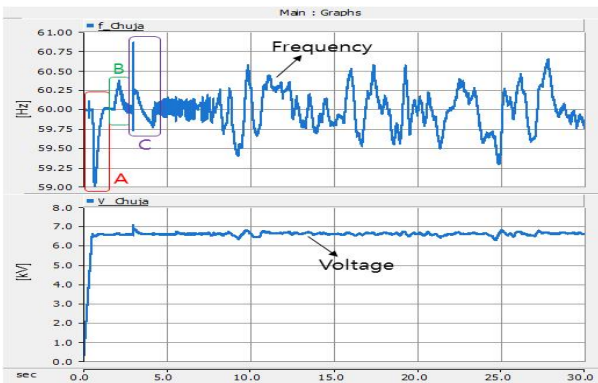


Fig. 11. Frequency and voltage of Chujado Island Microgrid (HOMER) using PSCAD/EMTDC program.

그림 11. PSCAD/EMTDC를 이용한 추자도 마이크로그리드(HOMER) 주파수 및 전압

그림 11에서 A, B, C 지점은 디젤발전기와 태양광발전, 풍력발전이 투입 시 과도상태가 발생하는 것을 나타낸다. 또한 디젤발전기의 출력이 변동함에 따라 주파수가 지속적으로 변동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 그림 10의 A지점에서 디젤발전기 출력이 최대 0 MW로 떨어지는 것을 고려하여 ESS의 PCS 용량을 4 MW로 수정하였다. PCS 용량이 4 MW 일 때 모의해석을 진행한 결과는 그림 12와 같다.

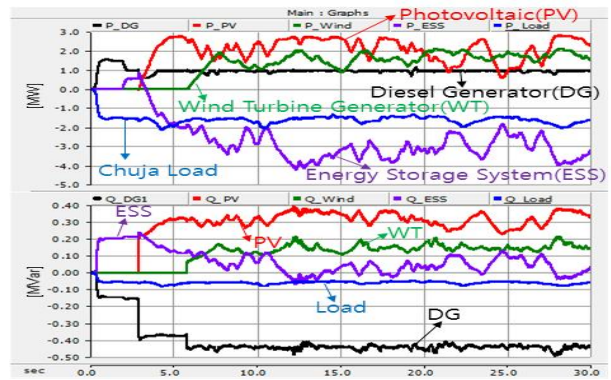


Fig. 12. Analysis of Chujado Island Microgrid(ESS PCS 4MW) using PSCAD/EMTDC program.

그림 12. PSCAD/EMTDC를 이용한 추자도 마이크로그리드(ESS PCS 4MW) 계통분석

그림 12에서 PCS의 용량이 증가함에 따라 디젤발전기가 정출력으로 운전하고 발전원 및 전력부하의 변동을 ESS가 제어하는 것을 확인할 수 있다.

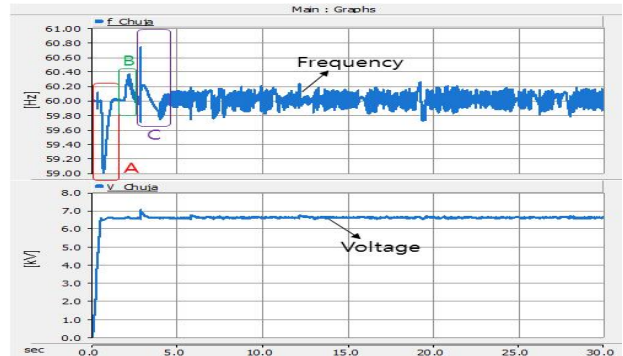


Fig. 13. Frequency and voltage of Chujado Island Microgrid (HOMER) using PSCAD/EMTDC program.

그림 13. PSCAD/EMTDC를 이용한 추자도 마이크로그리드(HOMER) 주파수 및 전압

그림 13은 ESS PCS를 4 MW로 용량설계 시 추자도 마이크로그리드의 주파수와 전압이다. A, B, C지점은 그림 11과 동일한 것을 확인할 수 있으나, 정상상태 시 발전원 및 부하 변동을 ESS가 제어함으로써 디젤발전기가 정격 운전하여 주파수가 안정함을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 HOMER 프로그램을 이용하여 추자도 마이크로그리드를 설계시 각 분산형 전원의 용량을 도출하고 이를 전력전자시스템과 계통 해

석을 할 수 있는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 계통의 안정성을 분석하였다. HOMER 프로그램에서는 시스템을 제어하는 주체의 EMS(Energy Management System) 전략을 구현할 수가 없기 때문에 최적의 경제성을 갖는 용량만을 제시하고 있다. 여기서 제시된 값들이 계통의 안정성을 확인하기 위하여 컴퓨터 모의해석 수행 시 풍력발전과 태양광발전은 MPPT 제어하고, ESS는 디젤 발전기가 정출력으로 유지하도록 제어하여 계통의 주파수를 일정하게 하였다. ESS에 채용된 PCS용량을 3 MW로 하여 컴퓨터 해석결과 디젤발전기의 출력이 0 MW까지 떨어짐을 나타내고 있다. 이것은 ESS에서 충분하게 충전을 하지 못하고 있다는 것을 나타내며, 이로 인해 주파수가 크게 변동되고 있어 계통의 안정성을 떨어뜨리고 있음을 나타내고 있다. ESS에 채용된 PCS용량을 3MW에서 4MW로 확대하여 해석 수행 시 주파수가 정상적으로 유지됨을 나타내고 있다. 따라서 마이크로그리드의 분산형 전원 용량 산정 시 HOMER 프로그램에서 제시하는 결과만을 가지고 설계하는 것보다, 계통의 안정성을 해석 할 수 있는 프로그램을 사용하여 검증할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Jeju Special Self-Governing Province, Service Report of Carbon Free Island Jeju by 2030, 2017.
- [2] Lee Do-Heon, "Determination of ESS Capacity for Introducing the Distributed Generation Facilities in Chuja Island," Master thesis, Jeju National University, 2015.
- [3] Seung Min Lee, "Estimating the Appropriate Output of Diesel Generator for Stability of Off-grid Type Microgrid," Master thesis, Jeju National University, 2016.
DOI: 10.1051/mateconf/201677010
- [4] POSCO ICT, Power Load Measurement and Analysis of Affluent Resource in Chujado Island, 2018.
- [5] S. H. Yang, C. H. Boo and H. C. Kim, "Optimization of Stand-Alone Hybrid Power Systems Using HOMER Program," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 32, no. 2, pp. 11-18, 2012.

DOI: 10.7836/kses.2012.32.2.011

- [6] Jeong Min Ji, "Optimal Energy System Design and Economic Analysis of Isolated Region with HOMER," Master thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2016.
- [7] S. S. Choi, M. K. Kang, H. D. Lee, Y. H. Nam, J. H. Park, D. S. Rho, "A Study on an Evaluation Modeling of Power System Performance for Frequency Regulation ESS Based on the PSCAD/EMTDC," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 8, pp. 1024-1030, 2018. DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.8.1024

BIOGRAPHY

Min-Hyeok Kang (Member)



2017 : B.S. degree in Electrical Engineering, Jeju National University.
2017~Present : M.S. Candidate in Electrical Engineering, Jeju National University.

Dong-Wan Kim (Member)



2012 : B.S. degree in Electrical Engineering, Jeju National University.
2014 : M.S. degree in Electrical Engineering, Jeju National University.
2018 ~ Present : Ph.D. candidate in Electrical Engineering, Jeju National University.

2014~Present : Senior Researcher, Energy Research & Development Center, Jeju Energy Corporation.

Eel-Hwan Kim (Member)



1985 : B.S. degree in Electrical Engineering, Chung-Ang University.
1987 : M.S. degree in Electrical Engineering, Chung-Ang University.
1991 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Chung-Ang University.

1991~Present : Professor, Jeju National University.
1995~1996 : Post Doc, The Ohio State University.
2005~2006 : Visiting Scholar, University of Washington.
2019~Present : Dean of Engineering College, Jeju National University.