


신재생에너지 연계형 마이크로그리드의 하이브리드시스템 최적 설계 연구

이재경, 한용찬, 권성기, 박계춘 

목포대학교 전기및제어공학과

A Study on Optimal Design of Hybrid System of New and Renewable Energy-Linked Microgrid

Jae-Kyung Lee, Yong-Chan Han, Sung-Gi Kwon, and Gye-Choon Park

Department of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

(Received August 18, 2022; Revised August 23, 2022; Accepted August 23, 2022)

Abstract: Microgrid, which enables the production and consumption of electricity to be done independently on a small scale, has been studied on one of the solutions of reinforcement for flexibility of electronic system. This study examined the application effect of new microgrid by applying hybrid battery in electric power storage device. We designed the system to highlight the advantage of each battery and complement the disadvantage by using hybrid system with Lithium-ion battery and interval Redox flow battery. It runs with lithium-ion battery during the initial startup while the Redox flow battery operates for a long time at the end of excessive period, and it enables a discharge of Lithium-ion and Redox flow battery at the same time when the load has a large output. We chose Maldives as a subject of this study for organizing and optimizing independent microgrid. Maldives is the country to accomplish 100% domestic electricity in South Asia, but the whole electric power is supplied through diesel generation imported fossil fuel. We organized and optimized microgrid for energy independence on Malahini island to solve Maldives energy cost problem and global energy environment matters. We analyzed the daily power supply and accumulated the power supply from September 18, 2018~February 11, 2019. The accumulated power supply was about 120.4 MWh and the daily power supply was about 800~1000 kWh. Based on the collected information, we divided the cases into three models which are only diesel generator, solar generator as well as diesel generator, and solar+ESS+diesel generator. We analyzed the amount of oil consumption compared to the cost of construction and power output. The result showed that solar+ESS+diesel generator was most economically feasible. As well, we obtained that our considering hybrid battery system reduced the fuel consumption for diesel power generation about 10~15%.

Keywords: Hybrid system, Energy storage system, Energy management system, Microgrid, Homer program

✉ Gye-Choon Park; pgccgp@mokpo.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
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.

화석연료의 무분별한 사용으로 인해 온실가스 농도가 급격히 증가하였으며 이는 기후변화 문제를 야기한 주요인으로 평가된다. 한편 화석연료와 함께 차세대 에

너지 자원으로 주목받았던 원자력 역시 치명적인 환경 재앙을 야기할 수 있음이 2011년 9월에 발생한 후쿠시마 원전사고를 통해 확인되었다.

안전성, 환경오염 및 기후변화의 가속에 대한 우려가 커짐에 따라 기존의 화석연료 및 원자력에 대한 대체 가능 수단으로 신재생에너지 등 다양한 기술개발과 보급정책이 이루어지고 있다. 최근 태양광 발전의 가격 하락은 이러한 에너지전환의 가능성을 증대시키는 효과를 야기시켰으나, 재생에너지의 변동성은 높은 비율의 재생에너지 전력 공급 가능성에 대한 의문을 제기한다. 재생에너지 공급 비율을 높이기 위해서는 재생에너지의 유연화, 전력계통의 확장, 수요관리의 강화, 전력저장장치 등을 통한 전력시스템 전체의 유연성 강화가 필요한 실정이다. 전력시스템 유연성 강화를 위한 대안으로 소규모 단위에서 전력의 생산과 소비가 독립되어 이루어지는 마이크로그리드가 확산되고 있다. 마이크로그리드는 기존 공급자 위주의 단방향 전력 운영시스템으로부터 독립된 분산형 전원 중심의 지능형 전력망이다. 청정에너지인 신재생에너지와 전기 에너지 저장장치로 구성된 마이크로그리드는 에너지 공급의 안정성, 재생에너지 수용성, 에너지 효율을 향상시킬 수 있다고 평가된다. 특히 경제적 및 지형적 특성을 고려하였을 때 태양광 발전은 마이크로그리드의 에너지 발생원으로 매우 효과적이라 할 수 있다 [1,2].

최근 송배전 계통 연결이 어렵고, 대규모 발전설비의 구축이 어려운 섬 등의 격오지에 마이크로그리드를 도입하고자 하는 실증 사업이 확산되고 있다. 통상적으로 격오지의 전력 생산 수단은 디젤 발전이 유일한 것으로, 이는 유가의 상승과 맞물려 높은 전력 생산 비용을 나타내고, 수용가의 전기 사용 문화 상승 욕구에 능동적으로 대응하지 못하고 있는 현실이다. 격오지의 몇 안 되는 수용가에 전력을 공급하기 위해 철탑 송전 또는 해저케이블 송전 등 송배전 시설을 구축하는 것 또한 어려움이 있기에, 마이크로그리드는 격오지 내에서 독립적 친환경적 전력망을 형성하고자 하는 것을 목적으로 한다. 국내에서는 제주 가파도, 전남 가사도 등에서 마이크로그리드 실증단지를 구축함으로써 격오지 도입을 위한 마이크로그리드 기술 개발 및 실증을 지속하고 있다. 그러나 현재까지 연구 개발되고 있는 격오지 마이크로그리드 적용 기술은 에너지 발전원으로 태양광 또는 풍력 발전 설비를 도입하고 기존 디젤 발전기를 예비 또는 백업으로 한 에너지저장장치(energy storage system, ESS) 설비로 구성된 형태가 대부분이다 [3].

태양광 모듈은 출력 전력량 증가를 위해 여러 개의 태양전지를 전기적으로 상호 연결한 다음 봉지(encapsulation) 한 구조이다. 보편적인 태양광 모듈의 구성은 36개의 태양

전지가 직렬 연결된 형태이다. 태양전지가 25°C AM 1.5 조사 하에서 약 0.6 V의 전압을 나타낼 때 태양전지 36개가 직렬로 연결되면 21 V의 개방전압이 얻어진다. 최대 출력점과 작동 온도에서의 작동 전압은 태양광 시스템의 구성요소에 의해 야기되는 전압 강하를 고려하여 약 17~18 V로 한다. 태양광 모듈의 전압은 태양전지의 개수에 의해 결정되는 반면 전류는 태양전지의 크기와 효율에 의존하며 출력되는 전류는 모듈의 온도에 영향받지 않고 경사각에 크게 의존한다 [4].

태양광 발전 시스템은 구성 방식에 따라 독립형과 계통 연계형으로 구분된다. 독립형 태양광 발전시스템은 기존의 전력계통과 분리된 시스템으로 계통으로부터 전력을 공급받을 수 없는 도서 및 산간벽지 등에 사용되며 계통 연계형은 태양광발전 시스템을 상용 계통에 접속하여 태양광 발전 출력이 수용가 부하보다 큰 경우 잉여 전력을 계통으로 회생시키고, 수용가 부하보다 작은 경우 잉여분에 대해 계통으로부터 공급받는 형태이다. 독립형 태양광 발전 시스템은 전력 계통으로부터 전력의 공급이 어려운 지역에서 전력을 사용하기 위한 신재생 에너지원으로써 분산전원의 100%를 수용할 수 있어야 한다. 일반적으로 신재생 발전 날씨와 시간적 제약에 따라 디젤발전기와 결합하여 사용하는 형태가 일반적이거나 최근에는 신재생에너지 발전을 통해 발전한 전력을 소비하고 사용 후 남은 전력을 에너지저장장치(ESS)에 저장하였다가 신재생에너지 발전이 어려운 시간대에 사용하는 하이브리드 방식이 사용되고 있다. 에너지저장장치 사용 시 독립형 태양광발전시스템의 효율적 운용이 가능하나 에너지저장장치의 가격이 높고 충·방전 손실 발생에 따라 효율이 저하되는 단점이 있다. 계통 연계형 태양광발전 시스템은 기존 전력계통에 병렬로 연결되기 때문에 태양광발전시스템의 출력과 부하 간 전력이 일치하지 않아도 되므로 에너지저장장치가 필요하지 않다. 따라서 독립형 태양광 발전 시스템에 비해 경제적이며 저장장치 충·방전에 따른 손실이 발생하지 않는 장점이 있지만, 부하에 공급하고 남은 잉여 전력을 계통으로 보낼 때 계통전압과 동상으로 전류를 보내야 하기 때문에 동기화가 요구된다. 또한 계통과 직접 연결되기 때문에 인버터에서 발생하는 고조파 및 유효전력과 무효전력의 동요는 전력계통선에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 이로 인해 안정성과 관련된 기술적인 해결 방안 및 시스템의 제어장치가 필요하게 된다 [5].

에너지저장장치(ESS)는 스마트그리드 운영을 위해 유연성과 신뢰성 및 경제성과 친환경성은 물론 전력 품질 개선 등의 효과를 직접적으로 제공하는 스마트그리드 핵심 기술로 그 역할과 중요성이 매우 높다. 주로 전력사용량이

적은 시간에 전력을 배터리, 플라이 휠(fly wheel) 등의 에너지를 에너지저장 서브시스템에 저장하였다가 전력사용량이 많은 시간에 전기에너지로 다시 환원하여 사용하는 전력변환장치를 의미한다. 현재 개발 및 보급 중인 에너지 저장장치(ESS)는 풍력발전시스템과 태양광발전시스템에서 생산한 전력을 저장하여 필요시에 효율적으로 공급하는 대용량 시스템과, 가정 및 빌딩에서 전기요금 단가가 낮은 심야 전기를 저장해 두었다가 피크 타임 때 사용하는 소용량 시스템 등 다양하게 발전하고 있다. 또한 주파수조정용, 피크감소용 및 신재생에너지원의 출력안정용 등으로 활용되고 있다. 이러한 에너지저장장치(ESS) 기술의 확산을 위해 국제전기위원회(IEC)의 TC 120을 중심으로 국제표준화를 진행 중이다 [6,7].

리튬이온 배터리(lithium ion battery, LIB)는 양극 활물질, 음극 활물질, 전해질, 분리막으로 구성되어 있다. 이온상태로 존재하는 리튬(Li⁺)이 방전 시에는 양극에서 음극으로, 충전 시에는 음극에서 양극으로 이동하면서 전기를 생성한다. 즉, 방전 시 양극에서 Flxa 이온을 활성화시켜 음극으로 전달해주고 충전 시에는 음극의 리튬이 활성화되어 양극으로 이동하게 된다. 리튬이온 배터리는 타 배터리와 비교 시 많은 강점이 있다. 첫째로 리튬이온 배터리는 가볍기 때문에 에너지 밀도가 매우 크다. 리튬이온 배터리의 에너지 밀도는 160 Wh/kg으로 니켈-카드뮴 전지의 약 2배, 납축전지의 약 6배 수준이다. 둘째로 리튬이온 배터리의 기전력은 3.6 V로 타 배터리 대비 높은 기전력을 얻을 수 있다. 니켈 기반 배터리의 기전력이 1.2 V인 것을 감안하면 니켈 기반 배터리 세 개를 직렬 연결한 수준의 기전력은 의미한다. 셋째 자기 방전에 의한 전력 손실이 적다. 리튬이온 배터리의 자가 방전율은 5%/month로 니켈 기반 배터리의 1/4 수준이다. 단, 리튬이온 배터리는 제조된 직후부터 열화가 진행되어 사용 여부와 관계없이 시간의 흐름에 따라 노화가 진행된다. 평균 수명은 2~3년 수준이다. 리튬이온 배터리는 온도에 민감하여 온도가 높을수록 노화가 빨리 진행된다. 0°C에서는 연간 약 6%, 25°C에서는 약 20%, 40°C에서는 약 35%의 용량 감소가 일어난다. 또한 고온에서 폭발 위험성의 단점이 있다 [8,9].

레독스 플로어 배터리는 환원과 산화 및 흐름의 특징을 가진 전지이다. Fe, Cr, V, Cu, Ti 및 Sn 등의 산화수가 변하는 전이금속을 강산 수용액에 용해하여 전해질을 제조하고 펌프를 이용하여 셀에 공급하는 전지이다. 전해질은 전지 내의 용기에 저장되어 있지 않고 외부의 탱크에 액체 상태로 저장되어 있으며, 충·방전이 필요한 경우에만 펌프를 통해 셀 내부로 공급된다. 이런 특성으로 인해 전력계통에 연계했을 경우 필요에 의해 신속한 기동정지가 가능하

고 장기간 정지해도 전력손실이 적은 특징을 갖는다. 또한 전극 자체는 화학변화 없이 전극표면과 전해질 사이에서 불균일 반응을 하는 비활성 전극으로 전지의 수명이 길다는 점에서 기존의 전지와는 구분이 된다. 레독스 플로어 배터리는 상온 작동이 가능하며, 수명이 2만 사이클 및 20년으로 매우 길고 출력과 에너지를 완벽하게 독립적으로 설계할 수 있어 2시간 이상의 출력 지속시간을 갖는 장주기 ESS로 활발히 연구되고 있다. 출력을 결정하는 스택과 용량을 결정하는 전해액이 외부의 탱크에 보관되어 있어 유연한 설계가 가능하므로 대용량의 전력 저장으로 매우 유망한 시스템이다. 현재 레독스 플로어 배터리에 대한 연구는 바나듐 레독스 플로어 배터리(vanadium redox flow battery, VRFB)에 집중되고 있으며, 낮은 에너지 밀도를 향상시키기 위해 연구되고 있다 [10].

본 연구는 격오지의 에너지자립을 위한 마이크로그리드 구성 및 최적화를 위해 몰디브를 연구대상으로 선정하였다. 몰디브는 1,192개의 작은 섬으로 이루어져 있고 그 중 194개의 섬에 약 360,000명의 인구가 거주하고 있다. 몰디브는 남아시아에서 100% 가정용 전기를 달성한 유일한 나라이나 전체 전기는 디젤 발전을 통해 공급되고 이는 수입한 화석연료에 의존한다. 때문에 몰디브는 지역 내 전기 생산량 당 이산화탄소 배출이 가장 높은 나라 중 하나로 평가되고 있다. 2014년 기준 몰디브 섬 내 약 141 MW의 디젤발전설비가 설치되어 있으며, 일부 섬에 설치된 디젤발전기로부터 발생한 전력을 작은 분산 네트워크를 통해 가까운 작은 섬들에 공급하는 형태이다. 몰디브의 에너지 비용 문제 및 세계적 에너지 환경문제를 해소하기 위해 몰디브 Malahini 섬을 대상으로 하여 에너지자립을 위한 마이크로그리드를 구성 및 최적화하였다. 마이크로그리드 에너지 발생원은 섬의 입지적 조건에 따라 태양광 발전을 선택하였고 전기에너지저장장치는 단주기 리튬이온배터리와 장주기 레독스 플로어 배터리를 적용하였다.

태양광 일사량 측정 결과 일일 누적 최소 일사량은 27 kWh/m², 일일 누적 최대 일사량은 61 kWh/m²이고 일일 누적 평균 일사량은 평균 50.8 kWh/m²로 몰디브 평균 일사량 5 kWh/m²를 감안하더라도 일조시간 10시간에 해당하는 측정 결과를 확인할 수 있었다. 외기온도는 주간시간 최고 34.6°C, 최저 23.5°C로 기록되었으며 평균온도는 30.8°C이다. 주간 온도의 편차는 소나기성 강우로 인한 것으로 보이며, 평균 일사량에 큰 영향은 없는 것으로 조사되었다. 아울러 해당 지역에서의 주간시간 평균풍속은 1.424 m/s로 미미한 수준이다. 전력 현황을 측정하기 위하여 그림 1과 같이 전력분석기를 발전기 실 인출부위에 거치하였고 이를 통해 얻어진 발전 전력 패턴을 그림 2에 나타내었다.

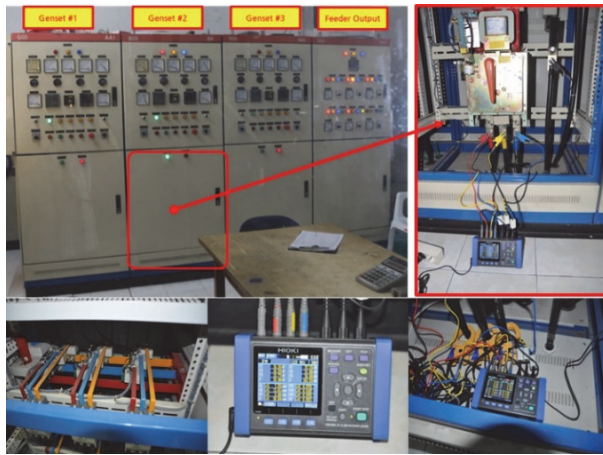


Fig. 1. Power plant output status.

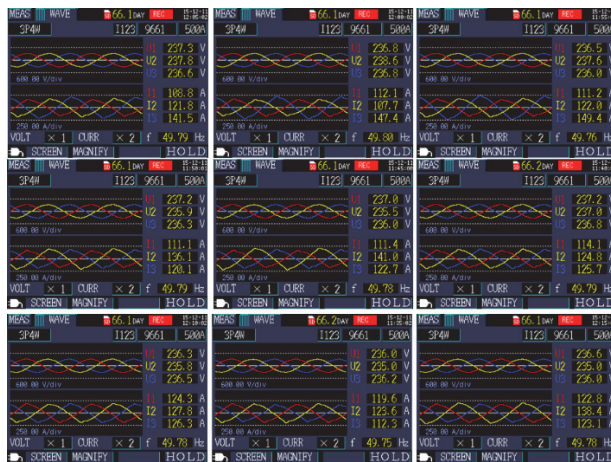


Fig. 2. Development status.

태양광 발전 용량 산정을 위해 고려되어야 할 것은 해당 부지에 필요한 전력량 및 부지 면적에 따른 태양광 발전 설치 가능 용량이다. 몰디브 Malahini 섬은 디젤 발전을 통해 평균 약 640 kW 발전 중으로 태양광 발전용량은 약 50%인 300 kWp를 선정하였다. 해당 섬은 관광 사업을 목적으로 섬 내 부지에 태양광 발전 시스템을 설치하는 것은 미관을 저해하는 요소로 인식하고 있어 일부의 Staff house에만 설치 가능하다. 섬 내 구축된 건물의 지붕을 태양광 발전 시스템 구축장소로 지정하고 지붕의 방향, 각도, 강도 등을 고려하여 설치 가능한 태양광 발전의 최대 용량을 계산해 보았을 때 약 300 kWp가 확보되었다.

LIB가 적용된 배터리시스템 사양선정을 수행하였으며 해외 수출형을 고려하여 성능, 신뢰성, 안전성 확보가 된

제조사 제품으로 검토하였다. 배터리 및 배터리모듈은 LG화학제품을 선정하였으며 이는 미국, 유럽, 일본 등의 국제공인기관의 성능 및 안전성에 관한 인증을 획득한 제품이다. LIB 배터리시스템 사양선정을 위하여 배터리 제조사에서 제공하는 사양서를 검토하였으며, 주거시설용, 상업용, 주전원용 ESS시스템 적용 시 적합성 확인을 위해 전압, 용량, 시스템 구성, 프로토콜 사양에 대한 세부기술사항을 검토하였다. 실증사이트의 리튬배터리시스템은 리튬배터리 19.5 kWh급 (155.4 V/126 Ah)으로 6.5 kWh (51.8 V/126 Ah)모듈이 3개 직렬구성으로 이뤄져 있으며, 시스템 출력차단 등 안전제어를 위한 BPU (battery protection unit)와 BMS (battery management system)로 시스템 구성이 되어 있다. 주전원용으로 운용하기 위한 LIB 배터리 시스템은 LIB65kWh급 (518 V/126 Ah)사양으로 Rack 단위로 구성되며 6.5 kWh(51.8 V/126 Ah)모듈이 10개 직렬구성으로 이뤄져 있으며 배터리시스템 출력차단 등 안전제어를 위한 BPU (battery protection unit)와 BMS (battery management system)로 시스템 구성이 되어 있다. 본 시스템에 적용되는 65 kWh급 Rack 단위 배터리 시스템은 2개의 Rack을 병렬 구성하여 130 kWh급(518 V/252 Ah)으로 설치하여 운영하는 방안으로 사양을 고려하였다.

몰디브 현지에 신재생 발전 시스템이 설치된 섬을 대상으로 ESS 시스템의 효율적인 모니터링 및 원격관리를 위해 섬에는 LOC (local operating center)를 설치하고, 몰디브의 수도섬인 말레에 위치한 몰디브 공공전력회사인 STELCO와 국내에 TOC (total operating center)를 구축하여 몰디브 섬에 대한 ESS 시스템 확장 시 통합관리를 할 수 있도록 시스템 구성을 검토하였다. 몰디브 현지의 TOC에서는 섬에 구축된 LOC의 운영상황 및 전력상황을 모니터링하여 시스템에 이상발생 시 현지에서 바로 유지/보수 등 문제해결을 할 수 있도록 하며 국내 TOC에서도 시스템 통합관리, 모니터링, S/W 업데이트 등의 기능을 할 수 있도록 하여 유기적인 업무공조가 이뤄질 수 있도록 시스템을 검토하였다. 원격지 다중연계 ESS의 운영을 위한 LOC, TOC 구축 개념도를 그림 3에 나타내었다.

에너지관리시스템(energy management system, EMS)은 국내의 정보통신기술과 제어기술을 활용하여 몰디브 현지의 섬에 구축된 ESS시스템을 대상으로 전력 부하현황, 패턴, 요금, 시스템 운영상태 등을 실시간으로 관리할 수 있도록 하기 위해서는 인터넷 망을 이용하여 LOC와 TOC간 통신네트워크를 구성하고 섬의 LOC와 ESS 시스템간은 유선 LAN망을 구축하여 통신연계가 가능하도록 검토하였다.



Fig. 3. Conceptual diagram of LOC and TOC construction.

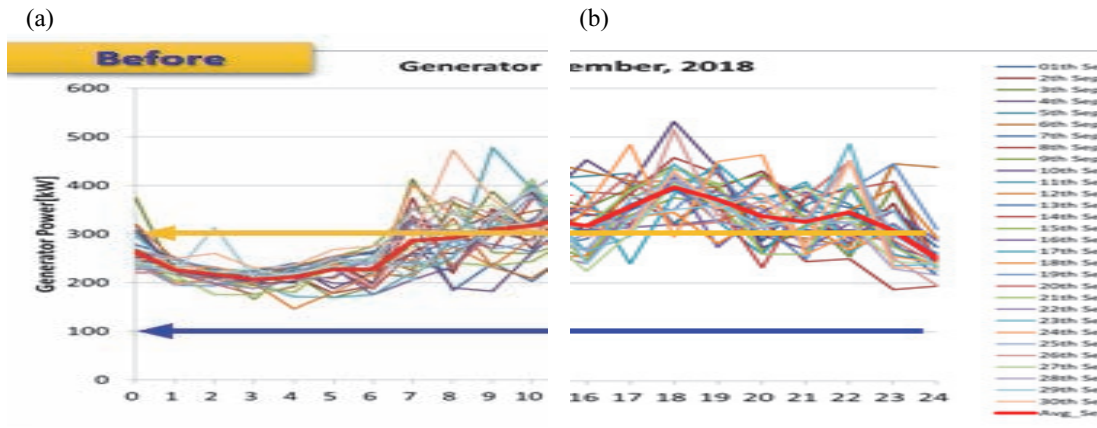


Fig. 4. Pattern of development. (a) Before applying the system and (b) after applying the system.

시스템 적용 전, 후 발전소 발전량 패턴을 분석하였고 그림 4에 나타내었다. 발전기의 출력이 100 kW이하로 떨어지지 않도록 시스템의 출력제어를 진행하여 PV발전이 시작되는 오전6시부터 PV발전이 중지되는 오후5시 45분의 발전기 평균발전량이 감소된 것을 확인할 수 있었다. 시스템 적용 전, 후 일일 발전소 발전량을 분석하였고 그림 4에 나타내었다. 시스템 연동 이후 일일 7 MWh 이하로 발전기 출력량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 8월 대비 약 8% 수준으로 감소하였다.

몰디브는 연중 평균 23~31°C의 기온을 유지하고 있으며, 성수기는 12월에서 3월 사이이고, 몬순은 5월에서 10월까

지이다. 기상 조건의 변동에도 불구하고 말라히니 리조트는 일 년 내내 일정하고 안정적인 전기 부하를 지니고 있으며, 매달 전기 부하의 평균은 303.76 kW와 338.57 kW 사이이다. 말라히니 리조트에서 수기로 작성한 시간별 load 데이터를 활용하여 산출한 월간/계절별 부하량은 그림 5와 같다.

System I은 기존의 디젤 발전기만 사용하는 경우, System II는 디젤 발전기와 PV 시스템만 사용하는 경우, 그리고 System III은 기존의 디젤 발전기, PV 그리고 ESS 까지 모두 활용하는 경우를 나타낸다. 각 시스템에 대해 HOMER 산출 결과에 따른 최적 시스템 구성을 그림 6에

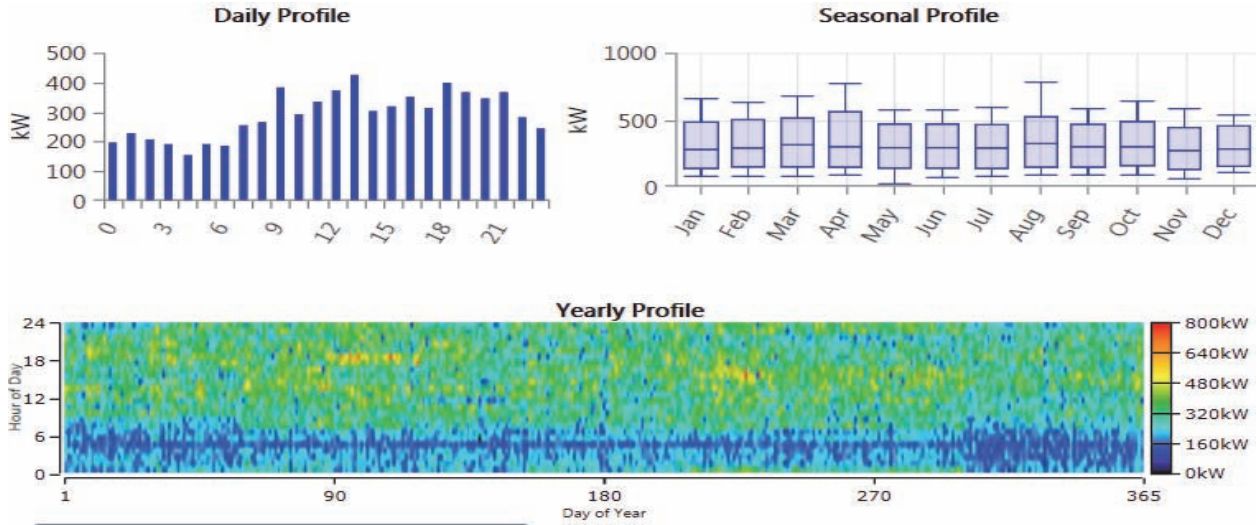


Fig. 5. Annual monthly, and seasonal loads.

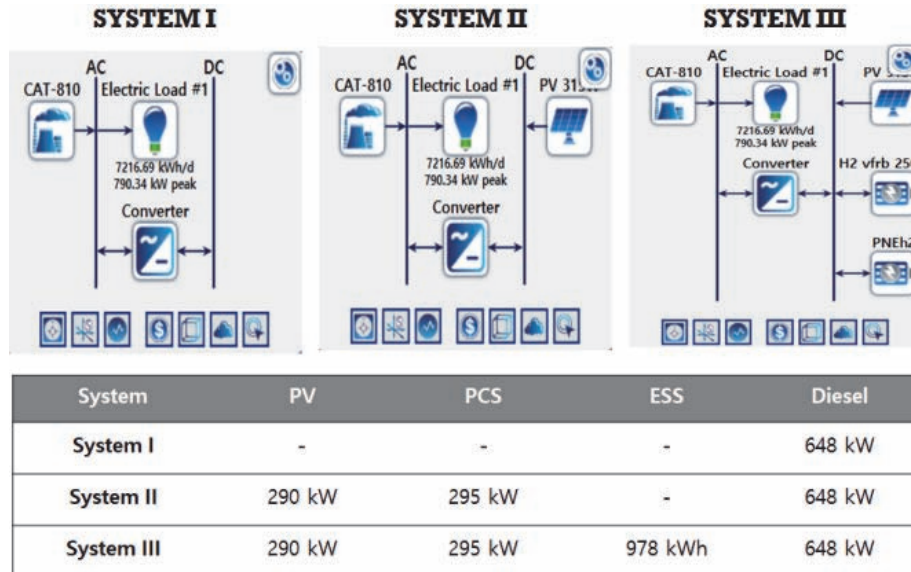


Fig. 6. Optimum system using HOMER.

나타내었다.

PV 및 ESS는 매우 높은 초기 자본 투자비용과 처음 7년 동안 발생했던 부채이자 및 상환으로 인해 그림 7과 같이 시스템 II와 시스템 III는 각각 1.08 및 0.49의 매우 높은 전기발전원별 균등화 발전비용(levelized cost of electricity, LCOE)로 시작하였다. 하지만 시스템이 계속해서 더 많은 전력을 생산함에 따라 LCOE는 계속 감소하였다. 시스템 II (PV + 디젤)의 LCOE는 5.77년(2022년에서 2023년 사이)에 그리드 패리티에 도달 그 후, 프로젝트 기간이 끝나면 LCOE는 계속 감소하고 LCOE는 \$0.3056/

kWh가 된다. 각 시스템 타입별 LCOE값의 변화를 그림 8에 나타내었다.

PV-ESS-디젤 시스템의 LCOE 시뮬레이션 결과는 PV-ESS-디젤 시스템의 평균 LCOE가 \$0.3009/kWh이며 LCOE의 분포가 그림 8과 같이 \$0.2723/kWh와 \$0.3306/kWh 사이이다. 배송 및 설치비용을 포함하여 시스템비용은 초기에 약 130만 달러이며, 평균적으로 추가 비용 16,371 달러가 지연비용으로 추가될 수 있다.

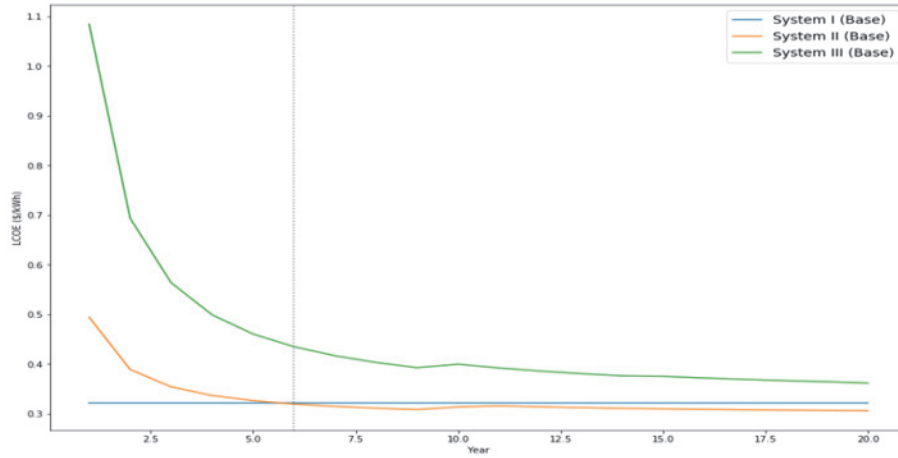


Fig. 7. Changes in LCOE value.

시스템 타입별 LCOE 시뮬레이션 결과, PV-Diesel 시스템은 평균 LCOE가 \$0.2850/kWh로 가장 경제적인 시스템 구성이 가능하며, PV-ESS-디젤 시스템의 평균 LCOE

시스템은 그림 9와 같이 가장 비싼 시스템이라는 결과의 도출이 가능하다.

분석을 통해, 프로젝트 개발자들은 패널 및 ESS 가격 하락으로 인한 혜택을 누릴 수 있지만, 프로젝트 지연과 같은 리스크 요인이 발생하게 될 경우, 결국 프로젝트 개발자는 추가 이자 지불 및 관리 비용과 같은 비용 지출이 늘어나고 결국은 LCOE를 높이는 결과를 초래할 수 있음을 시사한다.

화석연료만으로 구성된 마이크로그리드와 신재생에너지가 연계된 마이크로그리드의 운영 효과를 각 설비의 운영 모드별로 몰디브에서 시스템 구축하여 5개월간 운전하여 본바 누적발전량은 약 120.4 MWh이고 일일 발전량은 800 kWh~1,000 kWh 수준으로 파악되었다. 수집된 정보를 바탕으로 ①디젤발전기만 적용할 경우와, ②태양광발전과 디젤발전기를 적용할 경우, 그리고 ③태양광발전+ESS+디젤발전기를 적용할 경우의 3가지 모델로 구분하여 각각의 경우에 대하여 파악한 결과 첫째, 환경적 측면에서는 연간 CO₂ 배출량이 ①번은 1,991 t, ②번 1,753 t, ③번 1,696 t으로 ①번 대비 ②번 13.6%, ③번 17.4%로 ESS를 조합하였을 때 가장 적게 발생하였고, 둘째 경제적 측면으로는 발전비용이 ①번은 0.3208\$, ②번 0.3056\$, ③번 0.3614\$로 ②번 태양광발전과 디젤발전의 모델이 ①번과 ③번보다 각각 5%와 16% 더 낮은것으로 파악되었다. 디젤 유류비의 상승과, 태양광발전장치와 배터리가격의 꾸준한 하락이 예상되므로, CO₂ 배출 저감 효과와 경제성이 동시에 확보될수 있는 다양한 에너지저장장치를 적용한 마이크로그리드 모델의 연구가 지속적으로 필요함을 제시한다.

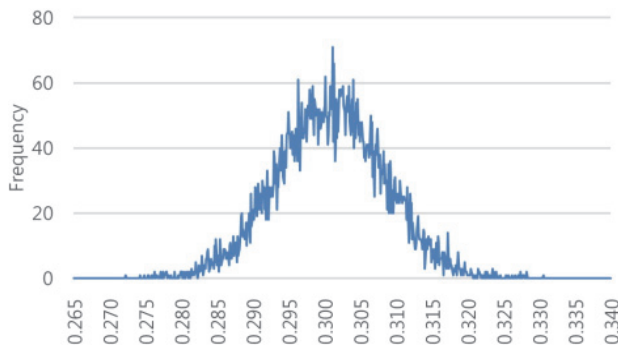


Fig. 8. LCOE (PV, ESS, Diesel) (Unit: \$/kWh).

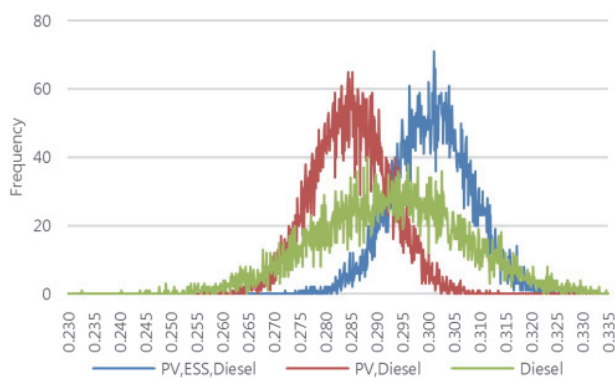


Fig. 9. Comparison of LCOE results.

ORCID

Gye-Choon Park

<https://orcid.org/0000-0002-4946-9059>**REFERENCES**

- [1] M. S. Na and J. O. Kim, *J. KSNRE*, **15**, 55 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2019.3.15.1.055>]
- [2] T. H. Han, J. H. Lee, H. J. Kim, and B. M. Han, *J. TKPE*, **18**, 63 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.1.63>]
- [3] M. H. Kang, D. W. Kim, and K. E. Hwan, *J. IKEEE*, **23**, 289 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.1.289>]
- [4] J. Y. Jeong, S. S. Choi, H. Y. Choi, S. W. Ryu, I. C. Lee, and D. S. Rho, *J. KAIS*, **17**, 723 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.723>]
- [5] S. H. Park, Y. S. Lee, S. W. Jeong, and J. H. Gim, *J. KSES*, **39**, 69 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.4.069>]
- [6] F. Nadeem, S. M. Suhail Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami, and T. S. Ustun, *J. IEEE Access*, **7**, 4555 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497>]
- [7] Y. S. Yoon, J. H. Choi, Y. L. Choi, Y. T. Shin, and J. B. Kim, *J. KJIICE*, **19**, 596 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.3.596>]
- [8] J. W. Lee and W. B. Kim, *J. Korean Powder Metall. & Mater. Inst.*, **21**, 473 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2014.21.6.473>]
- [9] V. H. Nguyen and Y. H. Kim, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 635 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.14478/ace.2018.1092>]
- [10] H. Wang, S. Y. Sayed, E. J. Lubber, B. C. Olsen, S. M. Shirurkar, S. Venkatakrishnan, U. M. Tefashe, A. K. Farquhar, E. S. Smotkin, R. L. McCreery, and J. M. Buriak, *ACS Nano*, **14**, 2575 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01281>]