

Real-time Optimal Operation Planning of Isolated Microgrid Considering SOC balance of ESS

Yoon Cheol Lee*, Ji Yeon Shim**, Jeongmin Kim*, Kwang Ryel Ryu*

Abstract

The operating system for an isolated microgrid, which is completely disconnected from the central power system, aims at preventing blackouts and minimizing power generation costs of diesel generators through efficient operation of the energy storage system (ESS) that stores energy produced by renewable energy generators and diesel generators. In this paper, we predict the amount of renewable energy generation using the weather forecast and build an optimal diesel power generation plan using a genetic algorithm. In order to avoid inefficiency due to inaccurate prediction of renewable energy generation, our search algorithm imposes penalty on candidate diesel power generation plans that fail to maintain the SOC (state of charge) of ESS at an appropriate level. Simulation experiments show that our optimization method for maintaining an appropriate SOC balance can prevent the blackout better when compared with the previous method.

▶ Keyword: Isolated microgrid, Rolling-horizon scheduling, Optimization, Genetic algorithm, ESS (Energy Storage System)

I. Introduction

독립형 마이크로그리드는 중앙으로부터 전력을 공급받지 못하는 환경 하에서 풍력이나 태양광과 같은 신재생 에너지를 이용하여 자체적으로 전력을 생산하여 공급하는 지역적 전력공급 시스템을 말한다. 우리나라에서는 주로 도서 지역을 대상으로 독립형 마이크로그리드를 설치하기 위한 연구 개발과 실증단지 구축 등에 투자가 이루어지고 있다. 풍력이나 태양광 발전은 연료비가 들지 않을 뿐 아니라 탄소 배출이 없다는 큰 장점을 지니고 있지만, 대신 전력 수요에 따라 필요한 시점에 원하는 만큼의 전력을 생산할 수 없다는 문제도 지니고 있다. 따라서 보통 독립형 마이크로그리드에서는 이러한 수급 불균형의 문제에 효과적으로 대처할 수 있도록 잉여 시 전력을 저장하기 위한 ESS(energy storage system)와

부족 시 전력을 추가로 생산하기 위한 디젤 발전기를 갖추어 운영하고 있다. 본 논문에서는 풍력과 태양광 발전을 하면서 ESS와 디젤 발전기를 운영하는 적정 규모의 독립형 마이크로그리드를 대상으로, 블랙아웃(blackout)이 없는 안정적 전력공급을 보장하면서도 디젤 발전비용을 최소화할 수 있는 실시간 운영계획 최적화 기법을 제안하고자 한다.

본 논문에서 제안하는 운영계획 최적화 기법은 미래의 일정 기간을 대상으로 그 기간 동안의 전력 수요와 신재생 발전량 및 ESS의 충전 상태(SOC: state of charge)를 감안하여 블랙아웃이 나지 않도록 하면서 비용이 최소인 디젤 발전계획을 유전알고리즘을 이용하여 탐색한다. 계획 기간 중의 전력 수요와

-
- First Author: Yoon Cheol Lee, Corresponding Author: Kwang Ryel Ryu
 - *Yoon Cheol Lee (yuncher5430@gmail.com), Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pusan National University
 - **Ji Yeon Shim (sjy20104@yinet.co.kr), Unique Network Co, Ltd.
 - *Jeongmin Kim (jeongminkim.islab@gmail.com), Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pusan National University
 - *Kwang Ryel Ryu (krryu@pusan.ac.kr), Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pusan National University
 - Received: 2018. 08. 27, Revised: 2018. 10. 09, Accepted: 2018. 10. 11.
 - This paper is presented at the 56th Summer Conference of Computer Information Society of Korea in 2017("Standalone MicroGrid Operational Plan Optimization with SOC Balance in ESS")
 - This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University
 - This work was supported by BK21PLUS, Creative Human Resource Development Program for IT Convergence.

신재생 발전량은 과거 데이터로부터 학습한 모형을 이용하여 예측하는데, 특히 신재생 발전량을 제대로 예측하기 위해서는 기상 데이터가 학습에 사용된다. ESS는 전력 수요량과 공급량의 차이에 따라 충전 혹은 방전되어 그 SOC가 변한다. SOC가 0인 상황에서 수요가 공급을 초과하면 디젤 발전기가 없을 경우 블랙아웃이 발생하게 되고, 디젤 발전기가 운영된다라도 그 발전 용량이 초과 수요를 감당할 수 없는 수준이라면 역시 블랙아웃을 피할 수 없게 된다. 탐색 중 각 후보 발전계획은 발전 비용이 적을수록 더 우수한 것으로 평가하되 블랙아웃이 발생하면 크게 패널티를 부과함으로써 블랙아웃이 없으면서 비용이 최소인 계획을 찾을 수 있도록 유도한다. 그럼에도 불구하고 간혹 제한된 탐색시간 내에 블랙아웃이 없는 발전계획을 찾아내지 못할 뿐 아니라, 찾더라도 그 계획을 실행해 보면 실제로는 블랙아웃이 발생하는 경우도 생긴다.

예측을 기반으로 한 계획은 원천적으로 예측 오차 때문에 실행 결과가 계획대로 되지 않는다. 이 문제에 대한 일반적인 해결책은 흔히 horizon이라 부르는 계획 기간이 만료되기까지 기다리지 않고 새로운 계획을 수립하여 원래 계획 대신 실행하는 과정을 반복하는 것이다. 이러한 재 계획과 실행을 일정 간격으로 반복하는 방식을 rolling-horizon 방식이라 부르는데 이에 대한 상세한 내용은 3절에서 설명한다. 이 방식은 예측 오차가 많이 누적되기 전에 계획을 갱신함으로써 불확실성에 상당 부분 대처할 수 있게 해 주지만 그렇다고 해서 블랙아웃까지 완전히 막아주는 것은 아니다. 더욱이 재 계획의 반복 주기가 짧을 경우 그 시간 내에 새로운 계획의 탐색을 완료해야 한다는 실시간 제약이 생기기 때문에 어려움이 가중되는 측면도 있다. 탐색 소요시간을 줄이는 가장 쉬운 방법으로 horizon을 짧게 가져가는 방법도 있겠지만, 단기적 안목으로 수립된 계획일수록 실행 시 블랙아웃 발생 가능성은 더 커진다는 것이 문제다. 본 연구에서는 horizon을 충분히 길게 하면서도 horizon 후반부의 계획을 개략적 수준으로만 수립함으로써 탐색 소요시간을 줄이고 ESS의 SOC를 일정 수준으로 유지하도록 유도함으로써 블랙아웃을 최대한 방지하는 저 비용의 발전 계획 수립 방안을 제안한다.

이하 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서는 관련 연구를 살펴본다. 3절에서는 독립형 마이크로그리드의 초기 설비 규모를 경제성 있게 결정하기 위해 장기 운영계획을 기반으로 탐색하는 방안을 소개한다. 4절에서는 이렇게 결정된 설비를 전제로 본 논문이 제안하는 저비용 무정전 발전계획 수립 방안을 설명한다. 5절에서는 시뮬레이션 실험 결과를 보고하고, 6절에서 결론을 맺는다.

II. Related Works

마이크로그리드에 관한 연구는 독립형 보다는 주로 연계형에 관한 것이 대부분을 차지하고 있다. Mohamed와 Radwan은 중앙

전력 시스템과의 연계 하에서 부드러운 모드 전환과 안정적 운영을 가능하게 하는 계층적 제어 시스템을 제시하였고[1], 이상욱과 박준호는 마이크로그리드에서 SOC균형을 고려한 ESS의 충·방전 전력배분 방법을 제안한 바 있으며[2], Marinova와 Guliashki는 ESS의 충방전 계획과 더불어 디젤 발전기의 경제적 운영계획 수립 방안에 대한 연구 결과를 보고하였다[3]. 연계형 마이크로그리드의 경우 블랙아웃 위험성이 감지되면 바로 중앙 전력 시스템으로 모드 전환을 하면 되기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 반면 본 연구에서 다루는 독립형 마이크로그리드에서는 저비용의 운영계획일수록 디젤 발전을 적게 하게 됨에 따라 블랙아웃 위험성이 더 커진다는 어려움이 있기 때문에 연계형 마이크로그리드의 운영 방안을 그대로 적용할 수가 없다는 문제가 있다. Lopes와 Moreira는 마이크로그리드가 독립적으로 운영될 때의 안정적 운영을 위한 제어 전략을 제시하고 있지만[4], 중앙 전력으로부터 독립적 운영으로의 모드 전환 시 그리고 전환 후의 운영에 관한 것이지 중앙과의 연계가 불가능한 독립형 마이크로그리드 운영의 문제를 다루고 있지는 않다.

직접적으로 독립형 마이크로그리드에 관한 최근 연구로는 Xiao 등이 Discrete Fourier Transform을 기반으로 ESS와 디젤 발전기의 최적 규모를 결정하는 방안을 제안한 것이 있다 [5]. Ross 등은 독립형 마이크로그리드를 대상으로 ESS와 디젤 발전기의 운영비용을 최소화하는 계획 수립 방안을 제시하였다[6]. ESS의 충·방전량이나 디젤 발전량을 적절히 계획하기 위해서는 미래의 신재생 발전량과 전력 수요를 예측할 수 있어야 하는데, [6]에서는 이들 예측이 항상 정확하다는 가정 하에서 계획을 수립하였다. 그러나 실제 현실에서는 예측에 오차가 있을 수밖에 없기 때문에 그렇게 수립된 계획이 실제로 비용상 가장 유리한 계획이라는 보장이 없어지게 된다. 본 연구에서는 예측의 불확실성에 대비하기 위해 앞의 서론에서 언급한 바와 같이 계획 기간인 horizon이 만료되기 전에 계획을 갱신하여 실행하는 과정을 반복하되, 블랙아웃 발생 가능성을 최소화하기 위해 ESS의 SOC를 적정 수준으로 유지하도록 유도하는 탐색 기법을 제안하고 있다.

III. Optimization of Initial Facility Configuration

독립형 마이크로그리드에서 안정적인 전력 수급을 유지하면서 운영비용을 절감하기 위해서는 ESS, 신재생 발전기, 디젤 발전기 등의 설비 규모를 적정 수준으로 결정하는 것이 필요하다. 신재생 에너지 발전량은 불균형이 심하기 때문에 안정적 전력 수급 유지를 위해서는 평균적인 전력 수요보다 더 큰 규모의 설비 규모를 필요로 한다. 그러나 풍력/태양광 발전기, ESS등의 설비들은 발전 규모 대비 비용이 높은 편으로 규모 확장에 따라 초기 투자비용이 크게 증가할 수 있다. 따라서 안정적인 전력 수급을 달성하면서도 투자비

용을 절감하기 위해서는 많은 후보 설비 규모들을 대상으로 운영 시 전력 수급에 문제는 없는지, 설비 투자비용 및 디젤 발전기 운영비용 등의 운영비용은 얼마나 소모되는지를 종합적으로 평가하는 과정이 필요하다. 심지연의 연구에서는 탐색 알고리즘을 이용하여 많은 후보 설비 규모를 대상으로 마이크로그리드 에뮬레이터를 이용해 장기 운영에 따른 설비 투자비용, 디젤 발전비용 등의 운영비용을 평가하고 이 중 가장 운영비용을 절감할 수 있는 설비 규모를 최종적으로 채택하였다[7]. 본 논문에서는 [7]의 방법론을 이용하여 초기 설비 규모를 최적화하고자 한다.

초기 설비 규모 최적화 문제는 Eq. (1)과 같이 설비 규모에 따른 총 운영비용 $c_{fc}(F)$ 를 최소화하는 설비 규모 F 를 찾는 것으로 정의할 수 있다. 총 운영비용은 운영 기간 동안의 설비 가동 시간에 따른 설비 감가상각비 $c_{dp}(F)$, 디젤 발전비용 c_{dg} , 블랙아웃 발생 시의 페널티 비용 c_{bo} 으로 구성되어 있다. 설비 감가상각비 $c_{dp}(F)$ 는 Eq. (2)와 같이 설비 규모에 따른 설치비용 $ip(F)$ 과 운영 기간 내 설비의 수명 $lt(F)$ 대비 가동시간 $rt(F)$ 비율과의 곱으로 나타낼 수 있으며, 디젤 발전비용 c_{dg} 는 Eq. (3)과 같이 운영 horizon h 동안의 디젤 발전계획 E_{dg} 에 대하여 각 단위시간 t 별 디젤 발전량 $e_{dg,t}$ 에 따른 디젤 연료 비용 $c_f(e_{dg,t})$ 를 합하여 계산한다. 블랙아웃에 대한 페널티 비용 c_{bo} 는 Eq. (4)와 같이 각 단위시간 t 별 전력 수요 dm_t 과 전력 공급 가능량 sp_t 의 차이로 전력 부족량을 구하고, 전력 부족량을 보충하기 위한 디젤 발전비용에 w_{bo} 배만큼의 페널티 계수를 곱하여 구한다. 본 논문에서는 페널티 계수 w_{bo} 값을 100으로 설정하였다. 전력 공급 가능량 sp_t 는 Eq. (5)와 같이 디젤 발전기 발전량 $e_{dg,t}$, 풍력 발전기 발전량 $e_{wt,t}$, 태양광 발전량 $e_{pv,t}$, ESS의 전력 충전량 $e_{ss,t}$ 를 합쳐서 계산한다.

$$\operatorname{argmin}_F c_{fc}(F) = c_{dp}(F) + c_{dg} + c_{bo} \quad (1)$$

$$c_{dp}(F) = ip(F) \times \frac{rt(F)}{lt(F)} \quad (2)$$

$$c_{dg} = c_{dg}(E_{dg}) = \sum_{t=1}^h c_f(e_{dg,t}) \quad (3)$$

$$c_{bo} = \sum_{t=1}^h w_{bo} \cdot c_f(\max(dm_t - sp_t, 0)) \quad (4)$$

$$sp_t = e_{dg,t} + e_{wt,t} + e_{pv,t} + e_{ss,t} \quad (5)$$

Fig. 1은 심지연의 연구에서 제시한 초기 설비 규모 최적화 과정을 보여주고 있다. 평가 대상인 후보 설비 규모는 유전 알고리즘의 한 종류인 RTS(Restricted tournament selection)

[8]을 이용하여 생성하는데, Table 1과 같이 설비 별로 여러 후보 규모를 가지고 있다. 후보 규모의 해 표현은 Fig. 2와 같이 디젤 발전기, ESS, 풍력 발전기, 태양광 발전기의 규모를 나타내는 0~1 사이의 임의의 4개 실수 값으로 나타낸다. 각 실수 값은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각 설비의 규모를 규모 순으로 등분한 구간 중 어느 구역에 속하는지를 나타낸다. 후보 규모가 주어지면 가상의 마이크로그리드 환경에서 후보 설비 규모 F 에 대해 통해 5개월간의 운영을 수행하여 운영비용 $c_{fc}(F)$ 을 산출하고 가장 운영비용이 적은 후보 규모를 최종적으로 선택한다.

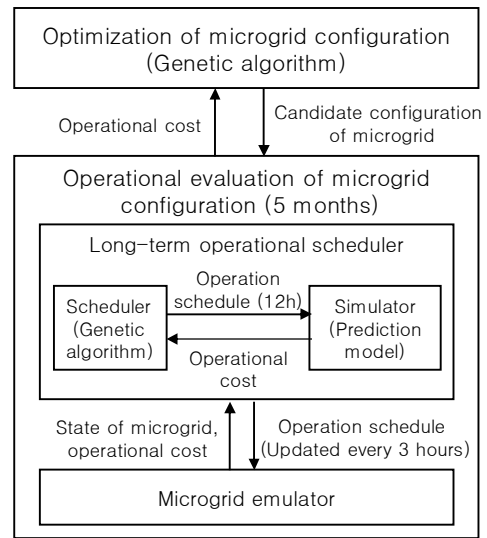


Fig. 1. Optimization of microgrid configuration

Table 1. Candidate microgrid facility configuration

Facility	Size
ESS	500kWh ~ 3,000kWh (500kWh interval)
Diesel generator	300kW ~ 600kW (75kW interval)
Wind generator	300kW ~ 600kW (75kW interval)
Solar generator	300kW ~ 900kW (150kW interval)

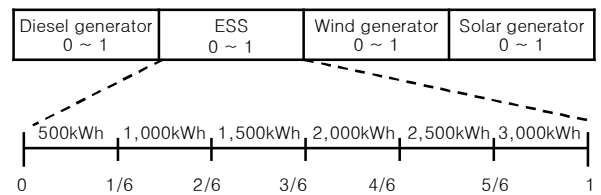


Fig. 2. Solution representation of candidate microgrid facility configuration

설비 규모 F 에 따른 운영비용 $c_{fc}(F)$ 의 산출은 Fig. 1과 3에서 볼 수 있듯이 RTS로 구현된 장기 운영계획 스케줄러가

rolling-horizon 방식으로 매 3시간마다 1시간 단위 향후 12시간의 후보 운영계획을 생성하고, 각 후보 계획에 대해 전력 수급 예측을 기반으로 한 시뮬레이터를 이용하여 12시간 동안의 c_{fc} 추정 값이 가장 싼 계획을 선택한 후 에뮬레이터를 이용하여 선택된 계획대로 운영하는 과정을 반복하면서 이루어진다. 각 후보 운영계획은 Fig. 3과 같이 1시간 단위로 12시간 동안의 디젤 발전량을 표현할 수 있도록 12개의 0~1사이의 실수 값으로 나타내며, 각 실수 값은 디젤 발전 용량 대비 발전 비율을 나타낸다. 따라서 값이 0인 경우 디젤 발전량이 0이 되고, 1인 경우 후보 설비 규모에서 주어진 디젤 발전기의 최대 발전 용량만큼 디젤 발전기를 가동시키게 된다. 전력 수급 예측 기반의 시뮬레이션은 k-nearest neighbor 알고리즘을 이용하여 학습한 예측 모형을 가지고 이루어진다. 예측 모형이 매 시간마다의 풍속과 일사량을 예측하고 나면 풍력 발전량 $e_{wt,t}$ 와 태양광 발전량 $e_{pv,t}$, 추정치를 구할 수 있으며, 운영계획을 통해 계산 가능한 $e_{dg,t}$ 와 $e_{ss,t}$ 과 합쳐 전력 공급량 sp_t 의 추정이 가능해진다. 이와 더불어 전력 수요 예측을 통해 dm_t 를 추정하고 나면 운영비용의 추정 또한 가능해진다. Fig. 4는 각 시간대별 기상 및 전력 수요 예측을 위한 예측 모형의 속성들을 나타내고 있다. 각 시간대별 기상 및 전력 수요 예측은 예측하고자 하는 시점별로 별도의 모델을 사용하고 있으며, 풍속, 일사량 예측의 경우 과거 6시간의 관측 값과 예측하려는 시간대의 기상 예보 값을 속성으로 가지고, 전력 수요 예측의 경우 과거 6시간의 관측 값을 속성으로 가지고 예측을 수행한다.

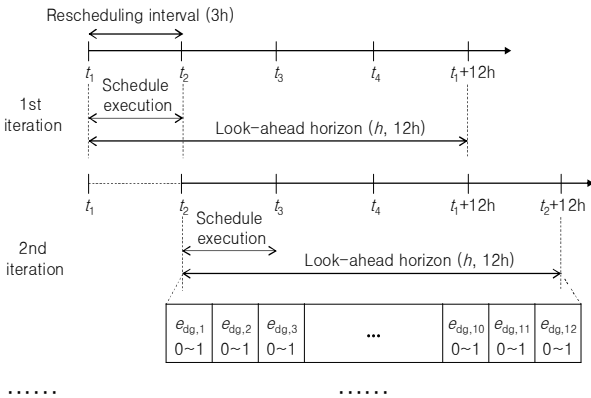


Fig. 3. Rolling-horizon based operational schedule

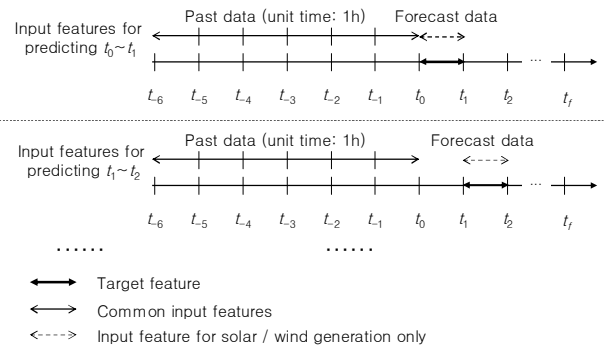


Fig. 4. Input features for wind / solar generation and power consumption prediction model

설비 규모 평가 및 예측 모형 학습에 필요한 데이터는 제주도의 부속 도시인 가파도에 환경에 맞춰 가상의 운영 데이터를 생성하여 활용하였다. 운영 데이터는 풍속, 일사량 및 전력 소비량 데이터로 구성되어 있으며, 풍속 데이터의 경우 기상청의 과거 풍속 데이터를 이용하였고, 일사량 데이터의 경우 SoDA [9]의 위성 관측 일사량 데이터를 가지고 제주도 일사량의 평년값에 가깝도록 가공하였으며, 전력 소비량의 경우 미국의 Open EI Datasets[10]에서 제공되는 미국 도시 데이터 중 기상 환경이 비슷한 도시의 전력 데이터를 가지고 가파도의 전력 수요 통계량에 맞추어 유사한 경향을 보이도록 가공하였다. 가공된 데이터는 5월에서 12월까지 총 8개월의 데이터로 구성되어 있으며 예측 모형의 학습에 5월에서 7월까지 3개월간의 데이터를 사용하였고, 8월에서 12월까지 5개월간의 데이터를 설비 규모 검증에 사용하였다.

설비 규모 탐색 및 운영계획 탐색에 사용된 알고리즘인 RTS의 파라미터 설정의 경우 다음과 같다. 개체군 크기는 100으로 설정하였고, 자식 개체 생성을 위한 부모 개체 선택은 binary tournament selection 알고리즘을 이용하여 2개의 부모 개체를 선택한다. 자식 개체 생성 시 교배 및 돌연변이 연산자로는 simulated binary crossover와 polynomial mutation 연산자를 사용하였다. 생성된 자식 개체의 후보 경쟁자 수는 50개로 설정하였다. 총 평가 횟수의 경우 설비 규모 탐색에는 400회의 평가를, 운영계획 탐색에는 매 계획 수립마다 500회의 평가를 수행하였다. 위와 같은 설정으로 탐색을 진행한 결과 Table 2와 같이 설비 규모가 최적 설비 규모로 제안되었다.

Table 2. Suggested microgrid facility configuration

Facility	Size
ESS	2,000kWh
Diesel generator	125kW × 3 (375kW)
Wind generator	250kW × 2 (500kW)
Solar generator	150kW × 3 (450kW)

IV. Low-Cost Balckout-Free Power Generation Planning

주어진 마이크로그리드 설비 규모에서 효율적으로 마이크로 그리드를 운영하기 위해서는 디젤 발전비용 c_{dg} 와 블랙아웃으로 인한 손실비용 c_{bo} 를 줄임으로써 최소한의 운영비용으로 안정적인 전력 수급을 달성할 수 있는 디젤 발전계획을 수립하여야 한다. 디젤 발전계획의 경우 실제 발전기에 적용이 가능하도록 충분히 짧은 단위 운영시간을 가져야 하면서도 효율적인 운영을 위해 충분히 긴 horizon을 두고 계획을 수립해야 하므로 해의 길이가 길어지는 경향이 있다. 또한 운영 상황 변화에 대응하기 위한 잦은 운영계획의 갱신으로 인해 운영계획 수립에 사용할 수 있는 시간이 제한적이다. 본 논문에서는 제한된 시간 내에 효율적인 발전계획 수립이 가능하도록 [7]에서 제안한 후반부 계획을 개략적 수준으로 수립하는 방안과 더불어 ESS의 SOC를 일정 수준으로 유지하도록 하는 발전계획 평가 방안을 사용하였다.

Fig. 5는 디젤 발전계획의 수립 과정 및 해 표현을 나타내고 있다. 발전 계획은 1분 단위로 디젤 발전기 3대의 12시간 동안의 발전량을 나타내는데, 탐색 알고리즘으로 직접 탐색을 수행하는 searched horizon h_s 와 직접 탐색을 수행하지 않고 개략적으로 발전량을 결정하는 averaged horizon h_a 로 나뉜다. Searched horizon 내 디젤 발전기 $dg1 \sim dg3$ 의 발전량은 0에서 1사이의 실수 값으로 표현되며, 각 디젤 발전기 용량 대비 발전 비율을 뜻한다. 따라서 1이 되면 최대 발전량인 125kW의 출력으로 발전기를 가동한다. Averaged horizon 내 각 디젤 발전기의 발전량은 searched horizon 기간 동안의 발전기 1대 당 평균 발전량을 구한 후 이 값을 계속 유지한다. 발전계획의 탐색에는 3절에서 설명한 설비규모 탐색 및 운영계획 수립 시와 마찬가지로 RTS 알고리즘을 이용하여 탐색을 진행하였다. 파라미터 설정은 동일한 설정을 사용하되, 평가 횟수의 경우 1,000회로 설정하였다. 계획이 수립되고 나면 전력 수급 상황의 변화를 반영하기 위해 매 10분마다 재 계획을 수행한다.

블랙아웃을 방지하기 위해서는 잘못된 전력 수급 예측으로 전력 수요에 비해 생산량이 모자란 경우에도 ESS에서 전력을 공급할 수 있도록 ESS의 SOC를 일정 수준으로 유지하는 것이 필요하다. Eq. (6)은 ESS SOC 유지를 위해 본 논문에서 제안하는 발전계획 평가 함수를 나타내고 있다. 새 평가 함수에서는 디젤 발전비용 및 블랙아웃 발생 시 손실 비용과 더불어 ESS가 일정 수준의 SOC를 유지하지 못하는 경우의 잠재 위험비용인 c_{soc} 를 평가 함수에 추가하였다. c_{soc} 는 Eq. (7)에서 볼 수 있듯이 사용자가 지정한 ESS의 권장 SOC 수준 e_{th} 보다 SOC가 떨어지는 경우 e_{th} 로 충전 수준을 회복하는데 필요한 디젤 발전 비용으로 잠재 위험비용을 계산한다. 본 논문에서는 권장

SOC 수준 e_{th} 를 ESS 설계 용량의 50%로 설정하였다.

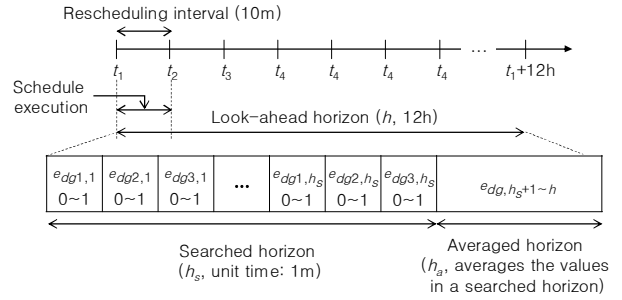


Fig. 5. Solution representation of diesel generation schedule

$$\operatorname{argmin}_{E_{dg}} c_{total}(E_{dg}) = c_{dg}(E_{dg}) + c_{bo} + c_{soc} \quad (6)$$

$$c_{soc} = \sum_{t=1}^h c_f(\max(e_{th} - e_{ss,t}, 0)) \quad (7)$$

V. Experiment Result

제안 방안의 성능을 검증하기 위해 3절에서 언급한 제주 가파도의 환경 및 Table 2의 초기 설비 규모를 가지고 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 실험은 8월 가파도의 첫째 주 기상데이터와 가사도의 평균 전력수요를 기준으로 1주간 진행하였으며, ESS가 운영 초기에 50%가 충전된 상황이라고 가정하고 실험을 진행하였다. 실험에서는 SOC 유지를 유도하는 평가 함수(SOC cost function, SOCCF)가 블랙아웃 방지에 도움이 되는 지를 주로 확인하였다. 비교 방안으로는 [7]에서 제안한 horizon을 둘로 분리하여 탐색하는 방안(Splitted horizon, SH)을 선정하였다. 두 방안 모두 searched horizon h_s 는 4h로, averaged horizon h_a 는 8h로 설정하였다.

첫 번째 실험으로는 초기 설비 규모 최적화를 통해 얻은 설비 규모에서 제안 방안과 비교 방안의 운영 효율을 비교하였다. 실험 결과 Table 3에서 볼 수 있듯이 두 방안 모두 블랙아웃은 발생하지 않았으며, 기존 방안인 SH가 SOC 유지를 유도하는 제안 방안에 비해 ESS의 전력을 더 쓰면서 디젤 발전 비용이 더 적은 것으로 나타났다. 한 가지 주목할 점은 두 방안 모두 ESS에 충전하지 못하고 버리는 전력인 덤프 로드가 0이라는 것인데 이는 ESS가 완전히 충전된 적이 한 번도 없다는 것이다. 즉, ESS의 규모가 필요 이상으로 크게 설정되어 있을 수 있다는 점이다. 이에 따라 ESS의 규모를 줄이는 경우에도 정상적인 운영이 가능한지를 추가로 실험하였다.

Table 3. Experimental results on optimal microgrid facility configuration (ESS: 2,000kWh, Diesel: 375kW, Wind: 500kW, Solar: 450kW)

	SH	SH + SOCCF
Diesel generation (kW/h)	287.1	287.3
Diesel cost (won/h)	98,702	98,784
Blackout	X	X
Dump load (kWh)	0	0
Average SOC (%)	32.7	33.2
Grid load (kW/h)	403.7	
Renewable energy generation (kW/h)	116.3	

두 번째 실험에서는 첫 번째 실험을 기준으로 ESS 용량을 2,000kWh에서 1,000kWh로 반으로 줄인 후 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. 실험 결과 Table 4에서 볼 수 있듯이 두 방안 모두 ESS 규모가 줄면서 덤프 로드가 발생하였고, 비교 방안인 SH의 경우 디젤 발전 비용은 낮았지만 블랙아웃이 발생하면서 안정적인 전력 수급에 문제가 있음이 드러났다. 제안 방안의 경우 SH에 비해 디젤 발전 비용은 더 들었지만 나아진 ESS 규모에서도 블랙아웃 없이 안정적인 모습을 보였다. ESS의 경우 설비 규모를 증가시키려면 많은 비용이 소모되기 때문에 운영 가능한 설비 규모를 줄일 수 있다는 점에서는 제안 방안의 운영 효율이 더 낫다고 볼 수 있다.

Table 4. Experimental results on reduced microgrid facility configuration (ESS: 1,000kWh, Diesel: 375kW, Wind: 500kW, Solar: 450kW)

	SH	SH + SOCCF
Diesel generation (kW/h)	289.5	289.6
Diesel cost (won/h)	99,451	99,572
Blackout	O (8kWh)	X
Dump load (kWh)	119.3	85.7
Average SOC (%)	52.7	53.1
Grid load (kW/h)	403.7	
Renewable energy generation (kW/h)	116.3	

VI. Conclusions

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드 환경을 대상으로 초기 설비 규모를 결정하고, 주어진 설비 하에서 블랙아웃 없이 최소 비용으로 전력을 공급하기 위한 디젤 발전계획 수립 방안을 제안하였다. 전력 수급의 상당 부분을 신재생 에너지에 의존

하는 독립형 마이크로그리드의 특성상 안정적인 전력 수급을 위해서는 ESS의 SOC를 일정 수준으로 유지하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 전력수급 예측을 기반으로 rolling-horizon 방식으로 디젤 발전 계획을 수립하고, 발전 계획 평가 시 ESS의 수준 유지 정도를 평가에 반영함으로써 ESS의 SOC 수준을 일정하게 유지하도록 유도하였다. 실험 결과 본 논문에서 제안하는 방안을 적용하는 경우 더 낮은 규모의 ESS로도 전력 수급에 문제가 없도록 효율적인 운영을 하는 것을 확인할 수 있었다. 다만 예측 모형이 전력 수급을 실제보다 지나치게 비관적으로 예측하는 경우 SOC 수준 유지 제약으로 인해 오히려 덤프로드가 더 커질 수도 있다.

전력 수급 패턴이 과거의 상황과 현저히 달라 예측 오차가 커지는 경우 앞서 서술한 바와 같이 덤프로드가 커지거나 블랙아웃이 발생할 수 있다. 이를 줄이기 위해서는 향후 연구로서 예측 모형의 오차를 감안하여 예측 값을 보정하는 방안이 대한 연구가 필요하다. 예를 들어 신재생 에너지 발전량에 대한 최근 예측이 지속적으로 실제 발전량보다 높게 예측되는 경우 최근 발전량의 평균 오차를 예측 값에서 빼는 식으로 예측 값의 보정이 가능할 것이다.

REFERENCES

- [1] Y. A.-R. I. Mohamed, and A. A. Radwan, "Hierarchical Control System for Robust Microgrid Operation and Seamless Mode Transfer in Active Distribution Systems," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, pp. 352-362, June 2011.
- [2] S. W. Lee, and J. Park, "Power allocation method for multiple ESS control considering SOC balancing in microgrids," *Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 66, No. 2, pp. 292-299, 2017.
- [2] G. Marinova, and V. Guliashki, "Energy Scheduling for Island Microgrid Applications," *Journal of Communication and Computer*. Vol 13, No. 6, pp. 281-290, 2016.
- [4] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation," *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [5] J. Xiao, L. Bai, F. Li, H. Liang, and C. Wang, "Sizing of Energy Storage and Diesel Generators in an Isolated Microgrid Using Discrete Fourier Transform (DFT)," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 3, pp. 907-916, 2014.
- [6] M. Ross, R. Hidalgo, C. Abbey, and G. Joos, "Energy storage system scheduling for an isolated microgrid," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, No. 2, pp. 117-123, 2011.
- [7] J. Y. Sim, "Optimization of Constraint Satisfaction of Diesel

Power Plan for Uninterrupted Operation of Stand-alone Microgrid”, 2017.

- [8] G. R. Harik, “Finding multimodal solutions using restricted tournament selection,” Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms, pp. 24–31, San Francisco, CA, USA, 1995.
- [9] SoDA, <http://www.soda-pro.com>
- [10] OpenEI Datasets, <https://openei.org/datasets/dataset>

Authors



Yoon Cheol Lee Received a B.S. degree in Electronics Engineering and Computer Engineering from the Pusan National University in 2017. He is currently a Master student at the Pusan National University, in Korea, in the school of computer science

and engineering, which he joined in 2018. B.S. Lee research interests include Machine Learning, Optimization, data processing.



Jiyeon Shim Received a B.S. degree from the Dongseo University in 2015. Received a M.S degree in Electronics Engineering and Computer Engineering from the Pusan National University in 2017. M.S. Sim research interests Evolutionary algorithm.

Optimization



Jeongmin Kim Received a B.S. degree in Electronics Engineering and Computer Engineering from the Pusan National University in 2010. He is a Ph.D. Candidate majoring in Electrical and Computer Engineering at the Pusan National

University, Korea. M.S Kim research interests include Machine Learning, Evolutionary Computation, Data Mining and Probabilistic Reasoning.



Kwang Ryel Ryu Received the B.S. degree and the M.S. degrees in electronics engineering from the Seoul National University, Seoul, Korea, in 1981, and the Ph.D. degree in computer engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, in

1992. Since 1993, Dr. Ryu has been with Pusan National University, Busan, Korea, where he is currently a Professor at the Department of Electrical and Computer Engineering. His research interests include Machine Learning, Evolutionary Computation, Data Mining and Probabilistic Reasoning.