

Annual Economic Operation Strategy for BESS on the Condition of Securing Renewable Energy Penetration Rate

재생에너지 수용률 확보 조건에서 연 단위의 BESS 경제적 운영전략

Han-seok Ryu · Ji-Won Lee · Hyun-Joon Kang · Mun-Kyeom Kim

류한석* · 이지원* · 강현준* · 김문검†

Abstract

The increase in Renewable Energy causes a problem of stability of the power system due to its intermittent characteristics. Renewable Energy depends on natural conditions such as wind speed and solar irradiation, which has characteristics of uncertainty and variability. An ESS(Energy Storage System) is being used as one of the flexible resources to cope with these variables. This paper proposed the economical BESS(Battery Energy Storage System) operation strategy under the precondition of accommodating Renewable Energy maximally, considering both BESS and Renewable Energy. The BESS operation strategy was established from the viewpoint of maximizing efficiency of BESS in consideration of battery degradation conditions and initial SoC(State Of Charge). The operation strategy establishment procedure was conducted in the order of analyzing the actual power demand data, grouping the load characteristics, calculating amount of the Renewable Energy, and deriving BESS charge/discharge scheduling. After removing outliers from the resulting values derived through a series of processes, we finally propose a continuous and consistent annual operation strategy for BESS.

Key Words

Battery Energy Storage System, Data Clustering, Degradation, Probability Density Function, Renewable Energy

1. 서론

화석 연료를 통한 발전이 환경 및 정책적인 영향 등으로 인하여 태양광, 풍력 등과 같은 신재생에너지원으로 대체되고 있다. ‘재생에너지 3020 이행계획’은 2030년까지 재생에너지 발전량을 전체 발전량의 20% 이상으로 목표하는 정부의 정책으로, 신재생설비 중 약 70% 이상 용량을 태양광과 풍력발전으로 구성하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 적정 재생에너지 발전량 비중 설정을 위한 경제성·잠재량·수용성 등 다양한 측면의 검토가 진행되고 있으며, 재생에너지 증가에 따른 간헐적인 발전 특성으로 인한 계통 운영의 안정도에 대한 이슈도 부각되고 있다.

태양광·풍력 등 변동성 재생에너지는 일사량·풍속 등 자연조건에 의존적이며, 불확실성과 변동성을 포함하는 간헐적인 특성을 내재하고 있다 [1]. 불확실성(Uncertainty)은 발전출력 예측의 어려움을 나타내며, 이로 인한 예측오차를 수반하게 된다.

변동성(Variability)은 발전출력의 빠르고 큰 변동을 의미한다. 이에 대한 대책으로 재생 발전의 비중 증가에 따른 유연성 자원 확보 및 신재생 예측오차를 줄이기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

이러한 변동성에 대응하기 위한 유연성 자원 중 하나인 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS)는 전기 에너지를 저장하여 원하는 시간에 필요한 양만큼 공급할 수 있다는 장점으로 주파수 조정, 피크감축 및 신재생에너지 출력안정화 등의 용도로 다양하게 활용되고 있다. 그 중 재생에너지 출력 안정화용 ESS는 불규칙한 출력특성을 가진 재생에너지원의 공급전력 시간대를 이동함으로써, 해당 자원의 이용률 제고와 동시에 전력수급 균형유지, 출력이 일시에 집중되는 경우 송배전계통의 부담을 완화할 수 있다.

재생에너지와 ESS를 동시에 고려하는 연구는 재생 연계형 ESS의 REC 등을 고려한 전력시장 관점의 경제적인 운영전략 수립 및 최적용량 산정 [2], 신재생에너지원 기반 분산전원의 수용성을

† Corresponding Author : Dept. of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea.

E-mail: mkim@cau.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-0901-7816>

* Dept. of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea.

<https://orcid.org/0000-0003-2069-8154> <https://orcid.org/0000-0002-8194-4745>

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Received: Dec. 10, 2021 Revised: Jul. 22, 2022 Accepted: Jul. 25, 2022

높이기 위한 배전급 ESS 협조 운영 방안 [3], 재생에너지 보급 확대를 위한 ESS의 에너지·환경 측면의 역할 분석 [4] 외에도 다각도로 진행되고 있다. 그 중 ESS 운영전략에 대한 연구는 세부적으로 ESS를 통한 재생에너지 변동성·불확실성의 완화 문제 [5], 운영 최적화 방법 또는 알고리즘 제안 [6-8], 배터리 자체의 열화 등을 고려한 경제성 문제 [2, 9] 등이 확인된다. [6]은 ESS의 설치비용 절감, ESS PCS의 충, 방전효율을 고려하여 전기요금 최소화를 위한 Two Stage의 하이브리드 최적화 방법을 제안하였고, [7]은 배터리 특성 분석과 Rule-based 운영 최적화 기법을 통해 수익 최대화를 목적으로 하는 태양광발전 연계형 ESS 운영전략을 제안하였다. [8]은 고속철도 변전소의 피크부하 저감을 위한 부하예측기법과 ESS의 최적운영기법을 제안하였다. 이들과 다르게 본 논문에서는 재생에너지 수용성 확보를 우선적인 고려사항으로 하여 BESS 스케줄링 기반의 경제적인 연 단위 운영전략을 제안하고자 한다.

따라서 본 논문의 BESS 운영전략 수립과정에서 강조하고자 하는 바는 다음과 같다.

- 시간이나 계절에 따른 전력수요 데이터의 분류가 아닌, 기상 및 기상 외 요소 데이터를 적용한 의사결정트리 기반의 데이터 클러스터링을 적용하여 각 그룹별 전력수요에 대한 상관관계를 향상시키고 대표성을 강화한다.
- BESS 운영전략 수립의 전제조건으로 재생에너지 발전량을 부하의 15%로 우선시한다. 발전량 계산에는 그룹별 기상데이터를 활용한 확률밀도함수 구축을 통해 각각의 태양광, 풍력 발전 특성을 일반화한다.
- 그룹별 경제적인 BESS 스케줄링을 위하여 배터리 열화 지연을 위한 운영 제약조건을 적용하였다.
- 최종적으로 일련의 과정을 통한 결과 값의 특이치(Outlier)를 제거하여 연속적이고 일관적인 연 단위 BESS 운영전략을 제안한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 재생에너지 수용 확대 및 배터리 열화를 고려한 연 단위의 BESS 운영전략 수립절차를 제안하며, 3장에서는 BESS 경제적인 운영을 위한 고려사항인 배터리 열화 모델, 4장에서는 제안하는 절차에 따라 실제 데이터를 적용하여 사례 조사를 진행하였으며, 5장 결론을 통해 이를 분석하였다.

2. 재생에너지 수용 확대 및 배터리 열화를 고려한 연 단위의 BESS 운영전략 수립

일반적인 경제급전 문제는 다음과 같이 수식화 된다.

$$\min \sum_{i=1}^{n_g} F_i(P_i)$$

(1)

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^{n_g} P_i = P_D + P_{Loss} \quad (2)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

여기서, F_i 발전기 i 의 연료비 함수
 P_i 발전기 i 의 발전출력
 P_D 시스템의 총 부하량
 P_{Loss} 시스템의 총 손실
 $P_i^{\min}$ 발전기 i 의 최소 출력
 $P_i^{\max}$ 발전기 i 의 최대 출력
 n_g 총 발전기 수

식 (2)는 시스템을 운용하는 데 있어서 가장 중요한 제약조건이며 부하의 합이 발전기 출력의 합과 같다는 의미이다. 이 제약조건을 고려하여 본 논문에서는 부하와 손실의 합을 재생에너지 최대 수용과 BESS의 경제적인 운영을 통해 효과적으로 완화하기 위한 운영전략을 문제화하였다.

가장 우선적인 고려사항으로 재생에너지 발전량을 기상조건을 반영하여 최대 수용하는 것으로 고정하였다. 동시에 BESS의 경제적인 운영전략 수립을 위해 배터리 열화를 완화하는 제약조건과 초기 SoC 값을 적용하였다. 재생에너지 발전원은 태양광과 풍력발전을 동시에 고려하며, BESS는 변동성과 간헐적인 특성을 가지는 재생에너지의 출력안정화 용도로 정하였다.

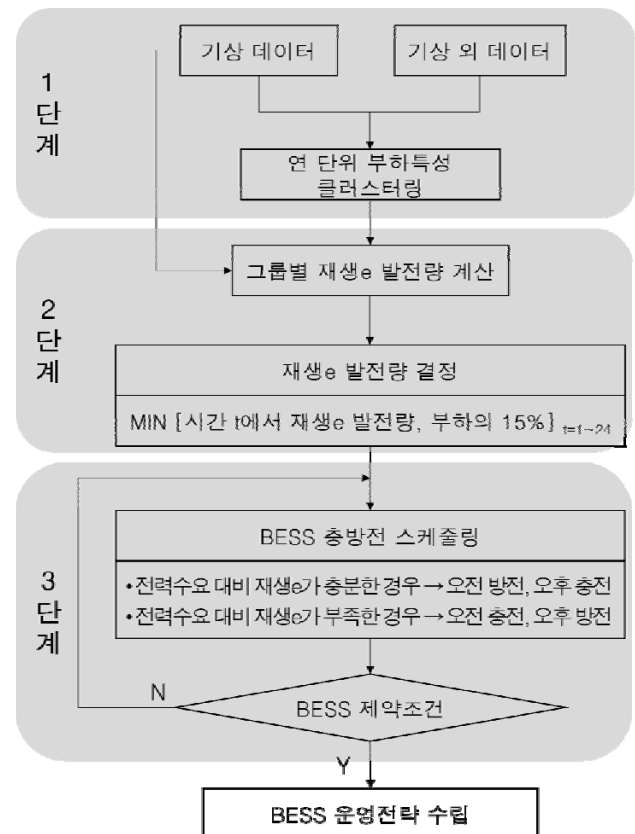


그림 1 BESS 운영전략 수립 절차도

Fig. 1 Procedures for estimating a BESS Operation Strategy

BESS 운영전략 수립 과정은 그림 1과 같다. 1단계는 연 단위 부하특성 클러스터링 과정으로, 시간별 전력수요 데이터에 대한 상관관계를 향상시키기 위하여 기상요소 및 기상 외 요소를 입력데이터로 데이터 마이닝 과정을 통해 연 단위 전력수요를 새롭게 그룹화하였다. 2단계는 그룹별 재생 발전량 일반화 단계로, 재생에너지 발전량은 각 그룹의 시간별 기상데이터에 따른 확률밀도함수 구축을 통해 산출하며 매 시간 계통에 수용되는 재생 발전량은 동일 시간 부하의 15%를 최대치로 하였다. 이때 15%는 국제에너지기구(IEA) 변동성 재생에너지(VRE) 단계별 구분 중 VRE 영향이 크지 않은 Phase 2의 최대치를 기준하였다. 3단계는 그룹별 BESS 충방전 스케줄링 과정으로, 배터리 운영 제약조건 적용을 통하여 불확실성 대비 및 열화 지연을 반영하였다. 최종적으로 이를 종합하여 각 그룹의 부하 및 재생 발전 특성을 반영한 연 단위의 BESS 운영전략을 제안코자 한다.

3. 배터리 열화 모델

배터리 운영에 대한 일반적인 경제성 문제는 최적 용량산정 또는 배터리 Aging 특성을 고려한 운영전략 수립 등으로 접근한다. 배터리는 사용할수록 열화에 따른 수명감소를 겪게 된다. 일반적으로 충방전을 거듭하여 배터리 용량이 초기 대비 80% 이하로 떨어지게 되면 수명이 다한 것으로 판단한다.

배터리 셀의 열화속도는 충전, 방전, 시간 및 온도와 같은 외부응력 요인뿐만 아니라 배터리의 현재 상태 등에 의하여 영향을 받는다. 배터리 열화는 시간 및 주기적인 스트레스와 관련된 비선형적인 현상이며 이러한 특성이 배터리 수명 예측을 복잡한 문제로 만든다. [10]에서는 배터리 열화를 선형과 비선형적 요인들을 조합하여 Cycling aging과 Calendar aging의 합으로 다음과 같이 수학적으로 모델링하였다.

$$L_{cal} = f_t(t, \bar{\sigma}, \bar{T}_c) \quad (4)$$

$$L_{cyc} = \sum_i^N n_i f_c(\sigma_i, \delta_i, T_{c,i}) \quad (5)$$

식 (4) Calendar aging은 시간이 경과됨에 따른 고유한 열화를 반영하며 시간 t , 평균 SoC(State of Charge) $\bar{\sigma}$, 온도 $\bar{T}_c$ 에 영향을 받는다. 식 (5) Cycling aging은 배터리 충전과 방전이 반복되는 주기마다 발생하는 열화이며 i 번째 주기의 DoD(Depth of Discharge) δ_i , 평균 SoC σ_i , 평균 셀 온도 $T_{c,i}$ 의 함수로 나타내며 각 주기의 열화가 누적되어 나타난다. 이 때 N 은 전체 사용주기 횟수, n_i 는 i 번째 주기의 특성을 나타내는 변수이다. 전체 열화모델은 두 가지를 합하여 식 (6)으로 나타낸다.

$$f_d(t, \delta, \sigma, T_c) = f_t(t, \bar{\sigma}, \bar{T}_c) + \sum_i^N n_i f_c(\delta_i, \sigma_i, T_{c,i}) \quad (6)$$

본 논문에서는 이 중 사용패턴에 따라 축적되는 Cycling aging을 줄이기 위하여 충방전 스케줄링의 DoD와 SoC, 초기 SOC를 통제하여 배터리 aging을 최소화하는 관점에서의 경제적인 BESS 운영전략을 수립코자 한다.

$$SoC(t) = 100\% \times \frac{Q(t)}{Q_{max}} \quad (7)$$

$$DoD = \frac{C_{dis}}{C_{MAX}} \quad (8)$$

식 (7) SoC는 시간 t 에서의 순간 전하량 $Q(t)$ 을 배터리 최대 용량 Q_{max} 의 백분율로 의미한다. 식 (8) DoD는 방전용량 C_{dis} 과 배터리 최대 방전 허용용량 C_{MAX} 의 비율로 나타낸다.

그림 2는 DoD와 SoC에 의존하는 주기적인 배터리 열화 특성을 표현한다. DoD가 클수록 열화가 증가하며 DoD가 같더라도 SoC가 클 때 열화는 증가하는 양상을 보인다. [11]

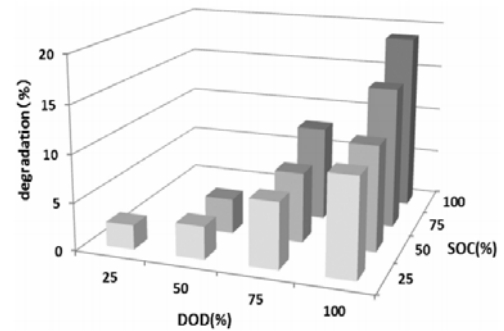


그림 2 3000 주기에서의 수명감소 특성
Fig. 2 Cycle degradation characteristics at 3000 cycles

SoC, DoD는 중간 정도의 값을 유지하는 것이 배터리 열화 완화에 유리하므로 본 논문의 경제적인 BESS 충방전 스케줄링을 위한 운영 제약조건으로 수명감소가 적은 초기 SoC 50%, SoC 20~80%를 사례 연구에 채택하였다.

4. 사례 연구

이 장에서는 선행 연구 [12]에서 활용된 2018년 서울시 전력수요예측 관련 빅데이터를 활용하여 2장의 BESS 운영전략 수립 절차에 따라 사례 연구를 진행한다.

4.1 클러스터링에 따른 24시간 부하 프로파일 도출

연 단위의 BESS 충방전 운영전략 수립을 위해 먼저 시간별 전력수요패턴과 재생에너지 발전량 특성을 도출하여 충방전 스케줄링을 구한다. 첫 번째 단계로 본 논문에서는 계절 또는 월에 대한 분류가 아닌, 새로운 분류규칙에 따라 각 그룹의 부하 프로파일에 대한 상관도는 향상시키면서 적절한 분류 개수를 가지는 클러스터링 값을 적용한다. 이는 전력수요패턴에 직

간접적인 영향을 끼칠 것으로 예상되는 기상요소 및 기상 외 요소를 기준으로 데이터 마이닝 기법 중 하나인 의사결정트리 기법을 통하여 2018년 연간 평일 249일 전력수요패턴을 7개의 그룹으로 클러스터링한 결과이다 [12]. 그림 3의 제일 아래 7개의 노드는 의사결정트리의 결과이며 정규화된 피크전력 값에 따라 -3부터 3의 레벨로 각 그룹의 부하 프로파일 값이 다양한 비율로 구성됨을 나타낸다. 이 때 입력데이터는 온도(최대, 최저, 평균), 습도, 강수량, 풍속, 일사량, 전운량 등의 기상요소와 유가, 환율, 천연가스 가격 등 의 기상 외 요소가 고려되었다.

표 1 정규화된 전력수요

Table. 1 Regularized Power Demand

Power(MW)	Levelized
~ 65,000	-3
65, ~ 70,	-2
70, ~ 75,	-1
75, ~ 80,	0
80, ~ 85,	1
85, ~ 90,	2
90,000 ~	3

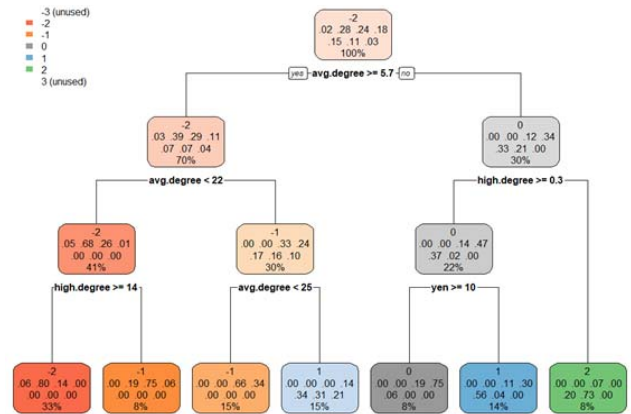


그림 3 기상요소, 기상 외 요소를 고려한 연간 피크전력의 의사결정트리

Fig. 3 Decision Tree for Annual Peak Power Data Considering Weather and Non-weather Factors

이어서 의사결정트리 클러스터링 결과 채택을 위하여 전력 수요와 입력데이터 간의 상관관계를 확인한다. 상관 분석은 두 변수 간에 어떤 선형적 관계를 갖고 있는지를 분석하는 방법이다. 이 때 두 변수 간 관계의 강도를 상관관계라고 하며, 각

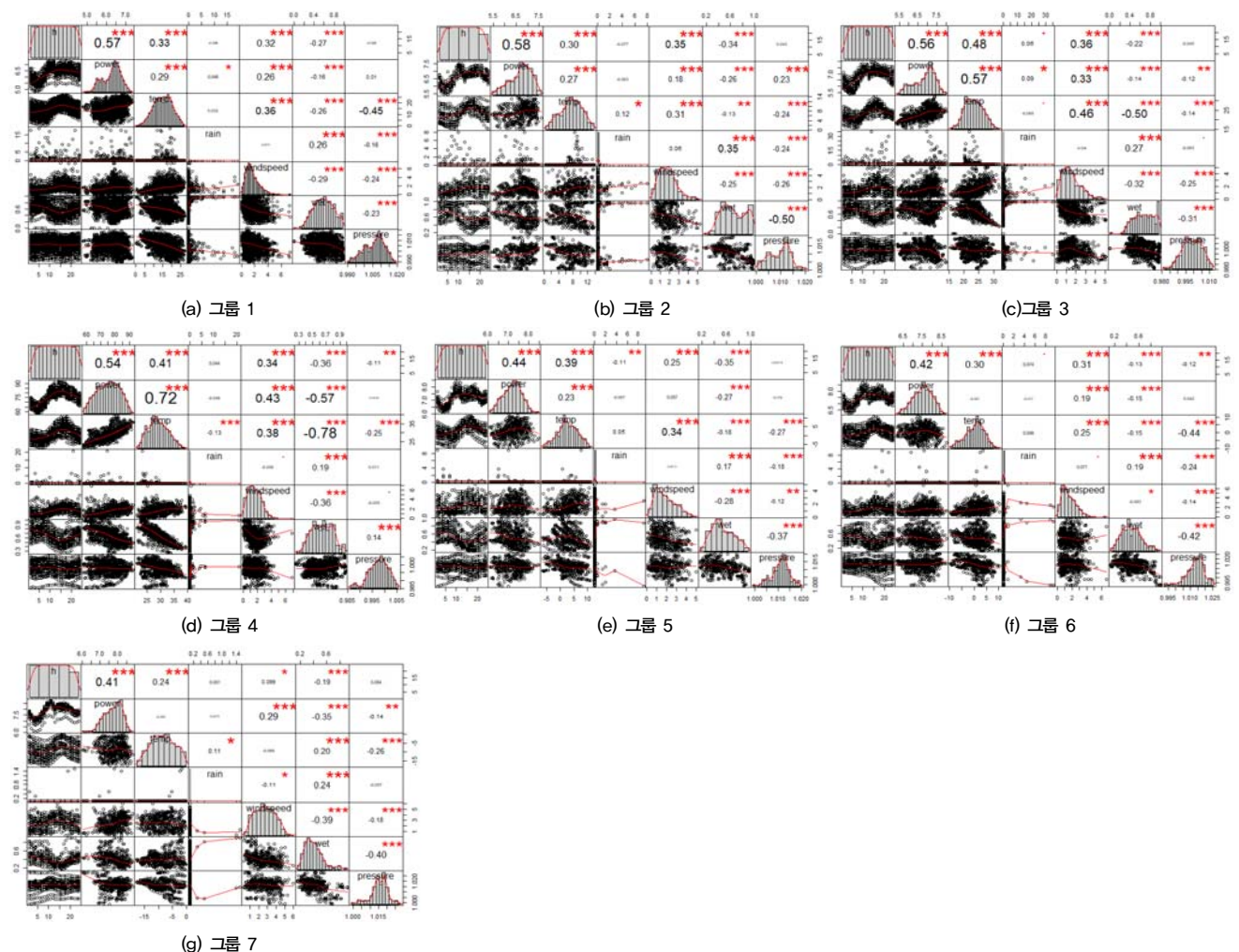


그림 4 의사결정트리에 따른 데이터 그룹의 입력데이터 간 상관관계

Fig. 4 Correlation between input data of data groups using Decision Tree

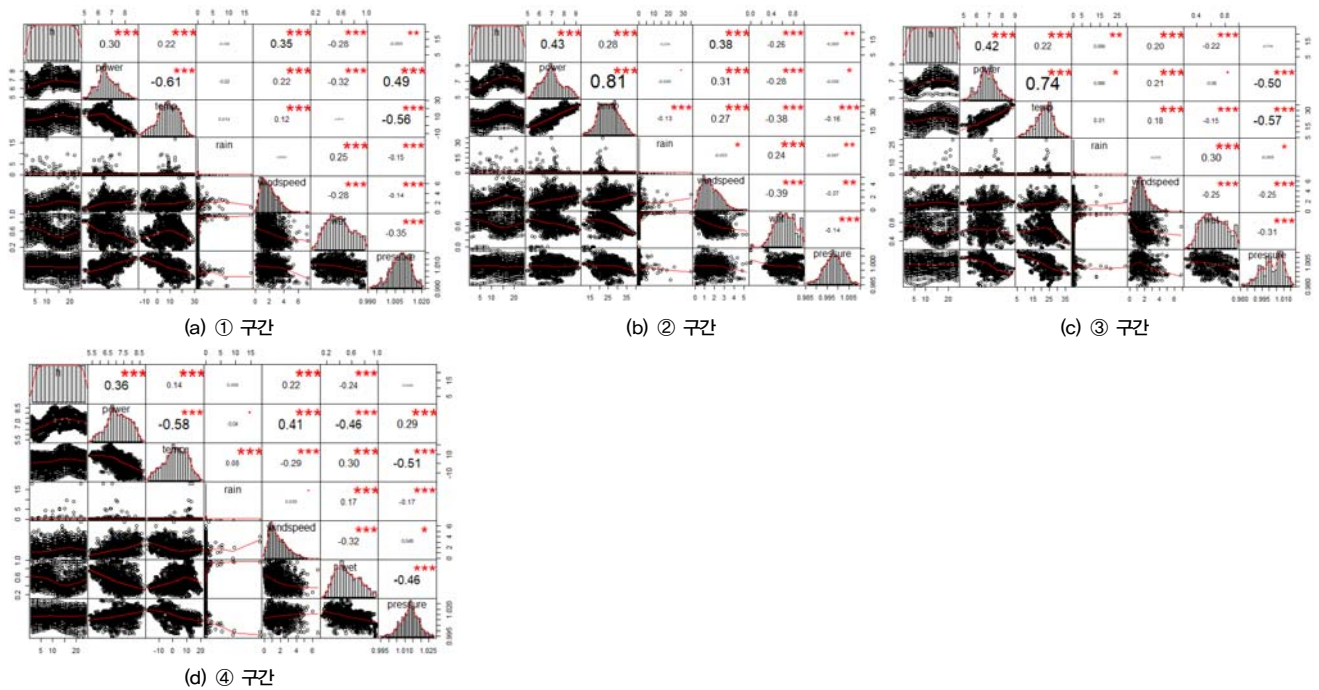


그림 5 계절별 데이터 그룹의 입력데이터 간 상관관계

Fig. 5 Correlation between input data of seasonal data groups

구간별 기상요인들과 전력수요와의 상관관계는 pearson 상관 분석 식 (9)를 통하여 나타낼 수 있다.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X-\mu_X)(Y-\mu_Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9)$$

여기서, μ_X, μ_Y : 모집단 X, Y 의 평균
 σ_X, σ_Y : 모집단 X, Y 의 표준편차

그림 4는 의사결정트리로 분류한 그룹의 입력데이터 상관관계이며, 그림 5는 일반적인 사계절 그룹에 대한 상관관계를 나타낸다. 여기서 입력값은 왼쪽 대각선부터 시간(h), 시간별 전력수요(Power), 시간별 기온(Temp), 강수량(Rain), 풍속(Windspeed), 습도(Wet), 기압(Pressure)을 의미한다.

각각의 결과 중 전력사용(Power)과 기온(Temp)의 상관관계는 전자 $-0.027 \sim -0.72$, 후자 $-0.61 \sim -0.81$ 의 결과를 나타내어 사계절 그룹에서 더 높은 값을 보였다. 전자의 그룹 6, 7은 0에 가까운 값으로 약한 선형성을 의미하였으며 전반적으로 사계절 분류가 기온에 따른 특성을 잘 반영하였다. 그러나 부하 프로파일을 결정하는 변수인 시간(h)과 전력사용량(Power) 간 상관관계는 전자가 $0.41 \sim 0.58$, 후자는 $0.3 \sim 0.43$ 의 값을 나타내어 의사결정트리 분류 모델에서 약 0.15 정도 증가된 것으로 확인된다. 그러므로 본 논문에서는 상관도가 향상된 의사결정트리 클러스터링 결과를 적용하여 그룹별 24시간 부하 프로파일, 재생에너지 발전량을 구하고 재생에너지 수용성 확보와 BESS 열화 지연의 제약조건을 적용하여 경제적인 연 단위의 BESS 운영전략을 수립코자 한다.

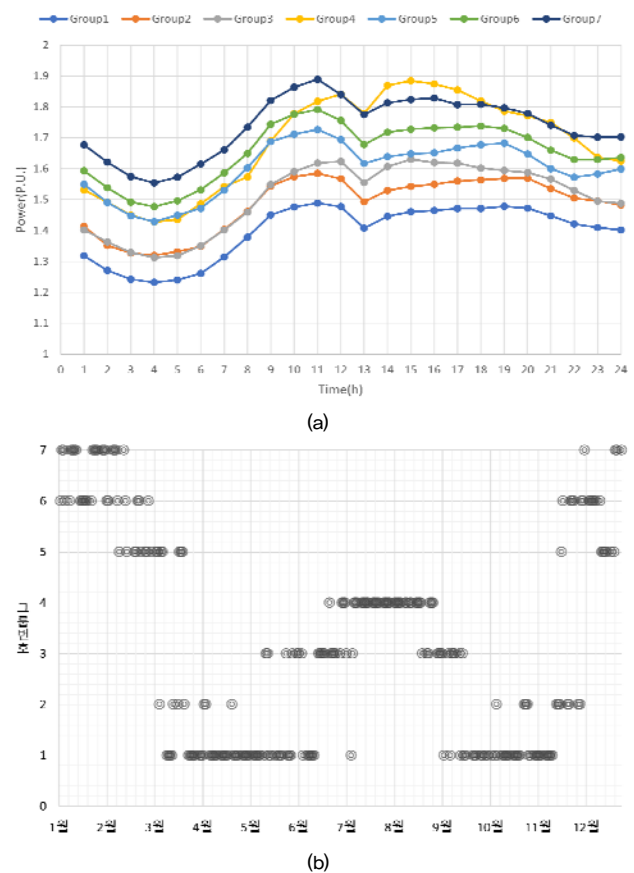


그림 6 (a)그룹별 24시간 부하프로파일, (b) 연간 분포도

Fig. 6 (a)24-hour load profile by group, (b) annual distribution plot

그림6 (a)는 그룹별 전력수요패턴을 산술평균한 값이며, (b)는 기간에 따른 그룹별 분포를 나타낸다. 12~2월은 그룹 5~7이

분포하며 높은 전력수요, 3~5월과 9~11월은 그룹 1이 주로 분포하며 낮은 전력수요 특성을 가진다. 6~8월은 그룹 3,4가 분포하며 한 여름에 집중적으로 분포하는 그룹4는 피크전력이 그룹 7만큼 높으나 다른 그룹과 구별되는 전력수요 패턴을 보여준다.

4.2 재생에너지 발전량의 계산

재생에너지 발전량은 전 단계에서 활용된 기상데이터(풍속, 일사량)로부터 그룹별 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function) 구축을 통하여 불확실성을 고려한 각 그룹 특성을 일반화하는 각각의 발전량을 산출한다.

풍속에 대한 확률밀도함수는 일반적으로 Weibull PDF에 따라 다음과 같이 정의된다. [13]

$$f_{wt}(V_t) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_t}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V_t}{c} \right)^k \right) \quad (10)$$

$$s.t. \quad c = \frac{\mu_{wt}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$$

$$k = \left(\frac{\sigma_{wt}}{\mu_{wt}} \right)^{-1.086}$$

여기서 c 는 척도계수, k 는 형상계수, V_t 는 시간 t 에서의 풍속, μ_{wt} 는 데이터의 평균, σ_{wt} 는 표준편차를 나타낸다. 척도계수 c 는 평균풍속의 크기와 관계되며, 형상계수 k 는 대상기간에 대한 풍속의 구간별 분포형상과 관계된다. 각 그룹의 시간 t 에서의 풍속 확률밀도함수는 클러스터링한 데이터로부터 각각의 c , k 를 도출하여 구축한다.

일사량에 대한 확률밀도함수는 Beta PDF 구축에 따라 다음과 같이 정의된다. [14]

$$f_{pv}(H_t) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \left(\frac{H_t}{H_{t_{\max}}} \right)^{(\alpha-1)} \times \left(1 - \frac{H_t}{H_{t_{\max}}} \right)^{(\beta-1)} \quad (11)$$

$$s.t. \quad \alpha = \frac{\mu_{pv}\beta}{(1-\mu_{pv})}$$

$$\beta = (1-\mu_{pv}) \times \left(\frac{\mu_{pv}(1+\mu_{pv})}{\sigma_{pv}^2} - 1 \right)$$

여기서 H_t , $H_{t_{\max}}$ 는 시간 t 에서의 순시 및 최대일사량, μ_{pv} 는 데이터의 평균값, σ_{pv} 는 표준편차이고, α , β 는 Shape parameter이다. 일사량에 대한 시간 t 에서의 확률밀도함수는 클러스터링한 데이터로부터 각각의 α 와 β 를 도출하여 구축한다.

풍력발전기의 발전량 산출은 식 (12)와 같다.

$$P_{wt}(V_t) = \frac{1}{2} \rho A V_t^3, \quad \forall t \quad (12)$$

$$s.t. \quad \begin{aligned} & \text{if } V_t < v_{ci}, V_t = 0 \\ & \text{if } v_{ci} < V_t < v_{rat}, V_t = V_t \\ & \text{if } v_{rat} < V_t < v_{co}, V_t = v_{rat} \\ & \text{if } v_{co} < V_t, V_t = 0 \end{aligned}$$

여기서 A , ρ 는 터빈 회전단면적, 공기밀도이며 v_{ci} , v_{rat} , v_{co} 는 시동풍속, 정격풍속, 정지풍속이다.

태양광 발전기의 발전량 산출은 식 (13)과 같다.

$$P_{pv}(H_t) = ArPH_t, \quad \forall t \quad (13)$$

여기서 A 는 패널 면적, r 은 패널의 에너지 산출량, P 는 성능비율을 나타낸다.

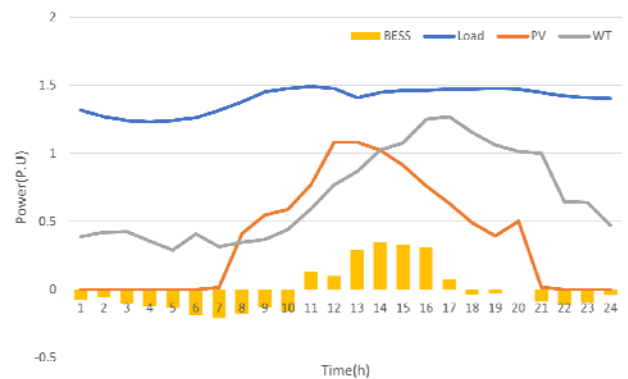
그러므로 각 그룹의 풍력, 태양광에 대한 발전특성을 나타내는 시간대별 발전량은 풍속, 일사량 등을 통해 구축한 확률밀도함수와 발전량 식을 곱하여 적분한 평균출력 값에 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$P_{wt} = \int P_{wt}(V_t) f_{wt}(V_t) dV \quad (14)$$

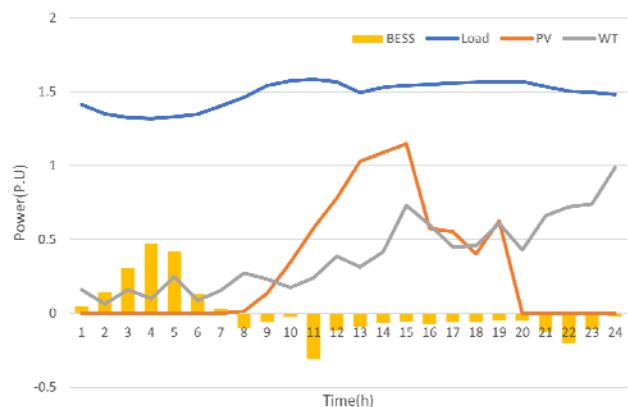
$$P_{pv} = \int P_{pv}(H_t) f_{wt}(H_t) dH \quad (15)$$

4.3 BESS 충방전 스케줄링

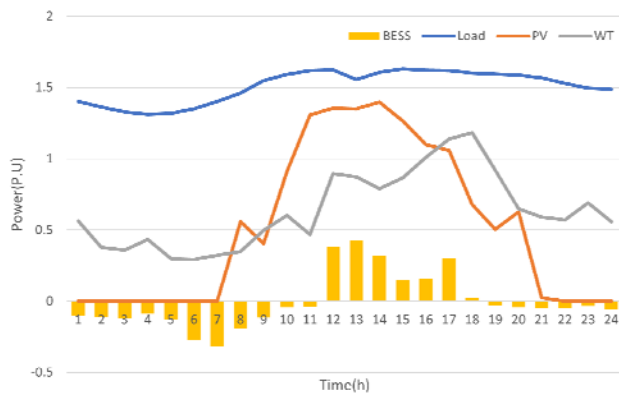
앞 절에서 도출한 7개 그룹별 24시간 부하 프로파일과 풍력, 태양광의 발전량에 따른 BESS 충방전 스케줄링은 그림 7과 같다. 노란색의 BESS 충방전 스케줄링에서 충전은 (+), 방전은 (-)값이다.



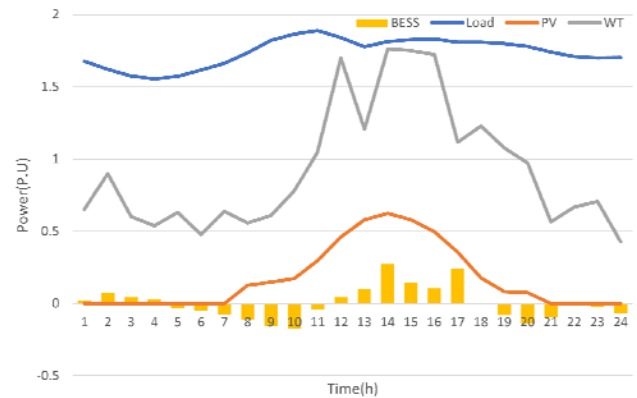
(a) Group 1 (n=90일)



(b) Group 2 (n=18일)



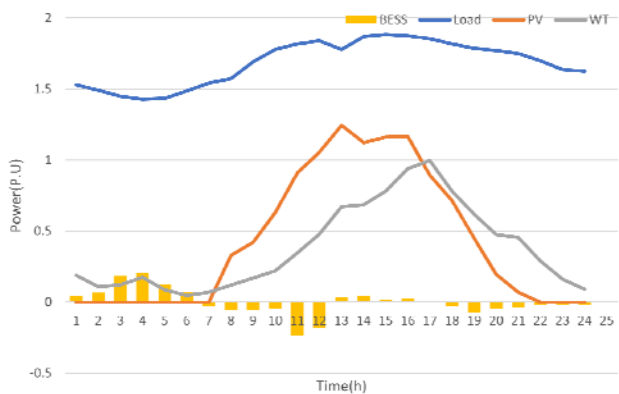
(c) Group 3 (n=32일)



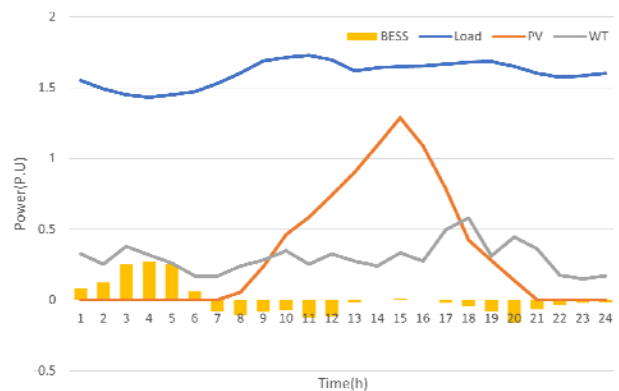
(g) Group 7 (n=21일)

그림 7 7개 그룹의 BESS 충방전 스케줄링

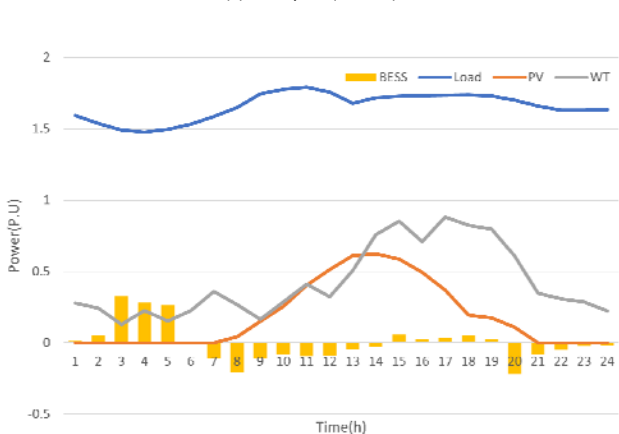
Fig. 7 BESS charge/discharge scheduling for each of the seven groups



(d) Group 4 (n=38일)



(e) Group 5 (n=22일)



(f) Group 6 (n=28일)

제약조건으로는 적정 운전범위 유지를 통한 열화 지연을 위하여 초기 SoC 50%, SoC 20~80%를 적용하였으며, 재생e 발전량을 최대로 수용하기 위하여 매 시간 재생e 발전량은 동일 시간 전력수요의 15%까지 우선 적용하였다. 또한 재생e 발전량이 충분하지 않은 경우의 불확실성에 대비하기 위해 전력수요 패턴과 재생e 발전량을 비교하여 상대적으로 두 값의 차이가 작은 경우는 오전 방전/오후 충전, 두 값의 차이가 큰 경우는 오전 충전/오후 방전하는 조건을 적용하였다.

4.4 연 단위의 BESS 운영전략

그림 8은 그룹별 충방전 스케줄링에 따른 하루 동안의 BESS SoC 변화패턴을 보여준다. 전체적인 결과는 크게 세 가지의 유형으로 나타난다. 그룹 1, 3의 경우, 오전 시간대에 방전하다가 13시부터 급격히 충전하는 패턴을 보인다. 이는, 재생에너지 발전량이 높고 전력수요가 많지 않기 때문에 오전에는 방전을 통해서 계통 안정도를 높이고 오후에는 재생e 발전량을 충전함으로써 계통의 안정도와 경제성을 향상시키기 위한 유형이다.

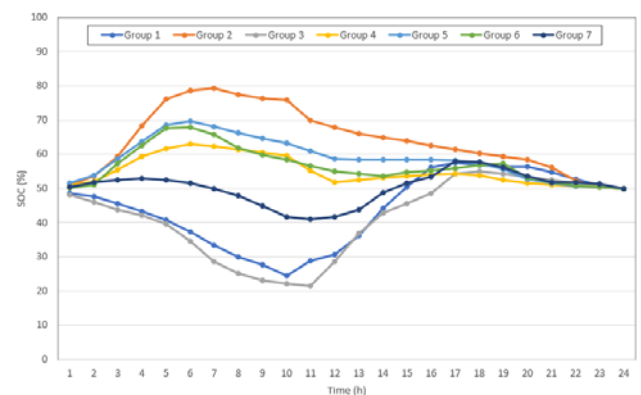


그림 8 그룹별 BESS의 SoC 변화

Fig. 8 Changes in SOC of BESS for each group

반면 그룹 2, 4, 5, 6의 경우, 오전 시간대부터 충전하고 오후에는 천천히 방전하는 패턴이다. 이는, 재생e 발전량이 전력수

요에 비해 상대적으로 경미하기 때문에, 비교적 전력수요가 적은 오전 시간에 충전을 진행하여 계통의 안정도를 높이고 운영 비용도 감축시키는 충방전 스케줄링을 가진다.

그룹 7의 경우, 앞선 두 가지 측면을 모두 가지고 있어 적절한 충방전을 통해 SoC의 변동폭이 크지 않은 특징을 가진다. 이는, 재생e 발전량이 적은 편은 아니지만 풍력이 많고 태양광은 충분하지 않아 불확실성을 가지면서 전력수요 또한 높은 특성을 반영하는 충방전 스케줄링이다.

표 2는 그룹별 SoC의 최대, 최소값을 보여준다. 결과값은 제약조건 SoC 20~80% 범위를 벗어나지 않았으며 각 그룹의 DoD는 13~29.29%로 나타나 그림 2의 수명감소 영향이 낮은 구간에서 BESS 운영이 가능한 것으로 확인된다. 가장 높은 DoD 값을 가지는 그룹 2는 전체 249일 중 18일에 해당하는 그룹으로 4~5월, 10~11월에 낮은 빈도로 발생하므로 이를 제외한 DoD 값은 20% 내외를 유지하는 것으로 분석된다.

표 2 그룹별 SoC의 최대·최소값

Table. 2 Maximum and minimum SoC values for each group

(%)	SoC _{max}	SoC _{min}
Group 1	57.61	24.58
Group 2	79.29	50
Group 3	54.91	21.54
Group 4	63.01	50.01
Group 5	69.62	50.00
Group 6	67.83	50.00
Group 7	57.94	41.00

최종적인 연 단위 BESS 운영전략은 그림9와 같다. 운영상의 편의 고려 및 특이치에 해당하는 데이터를 제거하여 연속적이면서 일관적인 운영전략을 가지도록 선택한 값이다. 높은 DoD 값을 가지는 그룹 2 중 4~5월, 10월에 간헐적으로 나타나는 값은 그룹1로 대체하여 열화를 완화코자 하였다. 이는 주기적인 특성을 가지는 연 단위의 전력수요를 클러스터링 기법으로 상관도를 향상시켜 새롭게 분류하고 각 그룹의 특성에 따른 부하

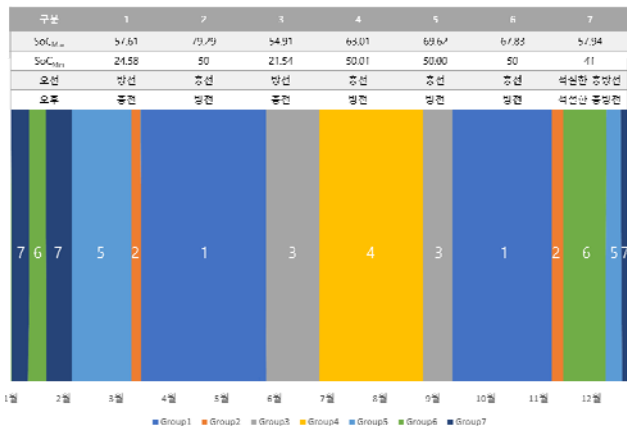


그림 9 연 단위 BESS 운영 전략

Fig. 9 Annual BESS operation strategy

프로파일과 재생e 발전량을 일반화하여 도출한 값으로, 연 단위의 BESS 운영전략에 대한 대표성과 편의성을 반영한 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 재생에너지 최대 수용을 우선하는 조건과 동시에 경제적인 BESS 운영을 가능케 하는 연 단위의 운영전략을 연구하였다. 이를 고려하기 위하여 재생e 발전량은 부하의 15%까지 최대 수용하는 것으로 설정하였고 BESS Aging을 고려한 제약조건을 BESS 충방전 스케줄링 수립에 적용하였다.

제안하는 운영전략의 대표성을 반영하기 위해 연 단위의 운영 기간은 일반적인 월 또는 계절에 의한 분류가 아닌, 의사결정트리 기법을 통한 새로운 클러스터링 결과를 적용하여 상관도를 증가시켰다. 각 그룹을 대표하는 부하 프로파일과 재생e 발전량 계산은 그룹별 데이터의 평균과 확률밀도함수 적용 등을 통해 일반화하였다. 최종적으로 그룹별 충방전 스케줄링 결과와 결과의 특이치를 제거하여 연속적이면서 일관된 BESS 운영전략을 도출하였다.

사례조사를 통한 BESS 운영전략은 크게 세 가지의 충방전 스케줄링 유형으로 분석된다. 재생e 발전량과 전력수요 간의 차이가 상대적으로 작은 경우에는 오전 시간대에 방전하다가 13시부터 급격히 충전하는 패턴을 보였으며, 반대의 경우는 오전 시간대부터 충전하고 오후에는 천천히 방전하는 패턴을 보였다. 그 외 앞선 두 가지 측면을 모두 가지는 경우에는 그룹 7과 같이 완만한 충방전 패턴을 보였다.

본 논문에서 클러스터링에 적용한 입력데이터는 13개이나 데이터 추가나 다른 클러스터링 기법 적용을 통하여 결과의 상관관계를 보다 향상시키고 더 세분화할 수 있다면, 그룹별 24시간 부하 프로파일과 재생e 발전량에 따른 BESS 스케줄링의 대표성을 증가시키고 연 단위의 BESS의 운영전략을 더 정교하게 구성할 수 있을 것으로 예상된다.

향후에는 본 논문에서 조건으로 설정한 몇 가지 변수들을 완화하고 재생e 발전량, 전력수요 예측모델, 각각의 상호작용을 모델링하여 다양한 BESS 충방전 스케줄링 및 운영전략에 대하여 확인할 계획이다.

Acknowledgements

본 연구는 2020년도 한국연구재단(2020R1A2C1004743)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] KEMRI Report 19-6 (2019.3.11)
- [2] Hunyoung Shin "Algorithm for Optimal Sizing of Energy Storage System Paired with Photovoltaic Generation Considering Lithium-Ion Battery Degradation," The transactions

of The Korean Institute of Electrical Engineers 68(6), 2019.6, 701-709(9 pages)

- [3] Hee-Jin Lee, DongHee CHOI "A Study on Coordinated Strategy for Distributed ESS for HighVariable Renewable Energy Penetratio," Journal of KIIT. vol. 19, no. 7, pp. 43-54, Jul. 31, 2021. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571
- [4] Jiseok Ahn, Kyungtaek Kim, Jaewon Choi, Dong Gu Choi, Sangyong Park "Analysis of the Role of ESS for Expanding the Renewable Energy Supply : From Energy and Environmental Perspectives," Journal of Energy Engineering 30(1), 2021.3, 1-13
- [5] In-Young Jun, Seung-ryle Oh, Ki-Sun Han "The plan for control the output of small-scale BESS to suppress uncertainty in renewable energy source," KIEE Summer Conference, 1520-1521, 2021.
- [6] Eun-Kyoung Gong, Jin-Man Sohn "A Study on ESS Optimal Operation Strategy Using Two Stage Hybrid Optimization," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 67(7), 833-839, 2018.
- [7] Jun-Hyun Shin, Wook-Won Kim, Jin-O Kim, Dong-Min Kim, In-Sue Bae "Optimal Operating Strategy/Algorithm of the Energy Storage System Connected with the Photovoltaic system," KSES Annual Autumn Conference, 53-53, 2015.
- [8] Seul-Ki Kim, Jong-Yul Kim, Kyeong-Hee Cho, Gil-Sung Byun "Sizing and Economic Analysis of Battery Energy Storage System for Peak Shaving of High-Speed Railway Substations," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 63(1), 27-34, 2014.
- [9] Y.-R. Lee, H.-J. Kang, and M.-K. Kim, "Optimal Operation Approach With Combined BESS Sizing and PV Generation in Microgrid," IEEE Access, vol. 10, pp. 27453-27466, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3157294
- [10] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson and D. S.Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1131-1140, Mar. 2018.
- [11] M. Fukui, "Cost-effective Power Management for Smart House Considering Degradation of Batteries," 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp. 1-6, Oct. 30 2012-Nov. 2, 2012.
- [12] Ji-Won Lee, Hyung-Jun Kim, Mun-Kyeom Kim, "Design of Short-Term Load Forecasting based on ANN Using Bigdata," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers 69(6), 792-799, 2020.6.
- [13] Kwon, Il-han, Kim, jin-han, Paek, In-su, Yoo, Neung-so., "Variation of Capacity Factors by Weibull Shape Parameters," Journal of the Korean Solar Energy Society, 33(1), 32-39, 2013.
- [14] S. Karaki, R. Chedid, and R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 14, no. 3, pp. 766-772, 1999.

저자소개



류한석 (Han-seok Ryu)

2007년 영남대학교 물리학과 졸업.
2021년~현재 중앙대학교 대학원 에너지시스템공학과 석사과정.



이지원 (Ji-Won Lee)

2020년 중앙대학교 에너지시스템공학부 졸업.
2022년 동 대학원 에너지시스템공학과 석사 졸업.



강현준 (Hyun-Joon Kang)

2021년 중앙대학교 에너지시스템공학부 졸업.
2021년~현재 동 대학원 에너지시스템공학과 석사 과정.



김문겸 (Mun-Kyeom Kim)

2004년 고려대학교 전기공학부 졸업.
2006년 서울대학교 대학원 전기·정보공학부 졸업 (석사).
2010년 동대학원 전기·정보공학부 졸업(공학).
2011년~2014년 동아대학교 전기공학과 조교수.
2014년~현재 중앙대학교 에너지시스템공학부 교수.