Korean Chem. Eng. Res., 58(3), 424-429 (2020)
https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.3.424
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

몬테 카를로 시뮬레이션 기반 변동성을 고려한 에너지 저장 시스템 용량 계산에 대한 고찰

김수환 · 류준형†

동국대학교 창의융합공학과
38066 경상북도 경주시 동대로 123
(2020년 4월 6일 접수, 2020년 5월 13일 수정본 접수, 2020년 5월 13일 채택)

A Study on Computing Stochastic Capacity of Energy Storage Systems using Monte Carlo Simulations

Soowhan Kim and Jun-Hyung Ryu†

Division of Creative Convergence Engineering, Dongguk University, 123, Dongdae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 38066, Korea
(Received 6 April 2020; Received in revised form 13 May 2020; accepted 13 May 2020)

요 약

에너지 시스템의 다양한 수요와 공급 대응 문제를 해결하기 위해 에너지 저장시스템이 새로운 해결책으로 주목 받고 있다. 특히 재생에너지의 공급 비중이 커져가면서 에너지 공급과 수요의 불확실성을 고려하는 것이 에너지 시스템의 운영에 가장 어려운 문제가 되었다. 본 논문에서는 에너지 저장 시스템이 필요한 용량을 산정하는데, 수요와 공급의 불확실성을 몬테 카를로 시뮬레이션 기법으로 반영하고 이에 연관된 이슈들을 다루었다. 본 연구에서 제기된 이슈들은 에너지 시스템이 가지고 있는 불확실성속에서도 향후 에너지 저장 시스템의 안정적 운영에 활용되어 후속 연구들의 기반이 될 수 있을 것이다.

Abstract − An Energy Storage System (ESS) is recently drawing an increasing attention as an efficient tool to cope with variation in the energy system. In order to take the best utilization of ESS, the inherent variation of energy supply and demand should be properly addressed. This paper is concerned with computing the stochastic capacity of ESS in the face of such variations by way of Monte Carlo simulation. The issue of uncertainty in energy systems will be given further focus. More works are expected to be followed to address the issues in academia and industry.

Key words: Energy storage system, Renewable energy, Uncertainty, Monte carlo simulation

1. 서 론

에너지 시스템은 에너지를 저렴한 가격으로 필요한 주체들에게 안정적으로 공급할 수 있게 하는 것을 목적으로 한다. 석유화학 제품을 제조하는 공정 산업 프로세스가 그 기능을 수행하는데 에너지 시스템은 핵심적 역할을 수행한다. 경제 발전과 생활 수준의 향상 등으로 인한 에너지 시스템은 많은 어려움에 처해 있다. 먼저, 국제 유가를 비롯한 에너지 원료 가격의 상승 및 변동성 추세가 확대되고 있다. 또한 기후변화의 심화로 인한 청정 에너지원개발에 대한 법규 강화 및 소비자 인식 변화로 인하여 신규 에너지원 개발 및 보급이 필요하다. 온실가스의 광범위한 배출로 인한 지구 온난화 현상이 전 지구적으로 심화되면서 화석연료를 대체할 수 있는 태양광 발전이나 풍력 발전과 같은 재생에너지원을 사용하도록 압력 받고 있다. 이러한 에너지 시스템의 건설 및 운영에 막대한 비용이 필요하다. 지속적으로 증가하는 에너지 수요에 안정적 대응을 위해서는 에너지 인프라에 대한 지속적, 추가적 투자가 필요한데 이는 큰 재정적 부담이 된다.

이렇게 어려운 에너지 시스템 환경에서 재생에너지원이 기존에 사용되고 있는 에너지원들과 경쟁하기 위해서는, 재생에너지원 자체가 가지는 불가피한 단점들을 극복할 수 있어야 한다. 그 중에 가장 주목해야 할 단점이 재생에너지 출력의 변동성이다. 재생에너지원에 의한 에너지 출력은 일정하지 않다. 일조량이 좋은 상황에서의 태양광발전이나, 바람이 많이 부는 기상 조건에서의 풍력 발전의 경우에는 대규모 출력이 기대된다. 하지만 지연 현상에 따라 변화하는 날씨에 따라 재생에너지 출력은 지속적으로 달라진다. 한편

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jhryu@dongguk.ac.kr
‡이 논문은 포스텍 이인범 교수님의 정년퇴임을 기념하기 위해 투고 되었습니다.
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.

이런 출력의 변화와 상관없이 에너지 수요 또한 지속적으로 여러가지 외적 환경에 따라 변화한다. 따라서 재생에너지의 비중이 커질수록 그 에너지 시스템에 변동성의 영향력이 커지게 된다.

기본적으로 에너지 수요가 증가할 때, 에너지 공급 설비를 확대해야 한다. 하지만 설비 확대를 위한 투자 비용이 큰 부담이 된다. 수요는 갑자기 크게 오르는 경우도 있지만, 그렇지 못할 경우도 생길 수 있다. 이러한 변동성에 대응하기 위해, 비용이 저렴하고 대응속도가 빠른 대안을 찾아야 한다. 이러한 대안 중의 한가지 방법으로 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)이 최근 각광을 받고 있다. ESS는 수요 급증을 완화시키거나 재생에너지 통합에 따른 안정성을 증가시키는 효과에 이용될 수 있다[1,2]. 리튬 전지 등의 혁신적 배터리 기술 개발로 인하여 휴대용 전자제품의 기술 개발 및 보급에 따라서 급격한 경제 발전이 따르고 있다[3]. 최근 논문들은 에너지 시스템에서 태양광, 풍력 등의 재생에너지원이 사용되면서 그에 따른 변동성과 문제점들을 에너지 저장 시스템이 대응할 수 있는 복합 에너지 시스템의 설계와 운영에 대한 논문들이 발표되고 있다[4]. 국내에도 많은 연구가 진행중이지만, 대부분의 연구들이 ESS의 재료 개발에 집중되고 있다[5].

대부분의 연구들이 ESS에 사용할 수 있는 재료에 대한 원천 기술 개발에 집중해오고 있지만, 효율적인 ESS 운영 방법론에 대한 연구들도 일부 발표되고 있다. Ryu (2018)는 수요와 공급이 결정론적으로 알려져 있다는 가정하에서 다중시기(multiperiod)에서 ESS의 운영을 최적화할 수 있는 수학적 모델을 제시하였다[6]. Yu et al. (2019)는 하이브리드 에너지 시스템에서 다중 시나리오로 불확실성을 표현하고, 여기서 생긴 문제를 two stage stochastic programming problem으로 대응하였다. 이를 통해 반영한 불확실성을 고려한 모델의 결과가 그렇지 않는 결정론적 모델의 결과보다 우수하다는 것을 보였다[7].

재생에너지 사용과 ESS의 필요성은 일반적으로 인정되지만, 효율적인 ESS개발에 대부분의 관심이 집중되고 있다. 하지만 실행측면에서, 재생에너지의 근본적 문제점인 자연 기상으로 인한 변동성에 대응하기 위해 얼마만큼의 ESS를 사용해야하는가에 대한 연구들은 아직 미흡하다. 본 연구에서는 이러한 미흡한 부분을 대응하기 위해 재생에너지 용량의 변동성과 그에 대응하기 위한 ESS의 필요량에 대해 공정 모사 방법을 이용하고자 한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 에너지 시스템에서의 주요 이슈들과 ESS의 기본 특징들을 분석하여, 그 용량에 대한 수식을 도출하였다. 또한 수요와 공급의 변동성이 ESS의 용량에 어떻게 영향을 주는지 사용된 몬테 카를로 공정 모사에 대해 설명한다. 사용된 예제의 결과들을 상세 분석하고 논의하였다.

2. ESS의 기본 특징

ESS는 에너지 시스템에서 매우 효율적 역할을 수행할 수 있다. 먼저, ESS는 에너지 수요 또는 공급자의 역할을 필요할 때마다 양쪽 다 수행할 수 있다. 에너지 시스템에서 현재 시기에서 필요 이상의 잉여 에너지(redundant energy)는 저장되지 않고, 버려진다(curtailed). 하지만 ESS이 에너지 시스템에 설치되어 있다면, 그 버려질 에너지를 저장하여, 나중에 필요할 때, 다시 사용할 수 있게 된다. 말하자면 현재의 생산된 에너지가, 미래 수요로 사용될 수 있게 된다. 따라서 수요가 없기 때문에, 불필요한 것으로 여겨져, 버려졌을 에너지를 다시 사용 할 수 있게 된다. 나중에 에너지 공급량이 부족하여, 추가 에너지 생산이 필요할 때, 에너지 생산에 의한 비용보다 더 싸게, 에너지를 이용할 수 있게 되는 것이다. 따라서 수요의 변동에 보다 더 융통성 있고, 탄력성 있게(flexible) 에너지 시스템을 운영할 수 있게 된다.

둘째, ESS는 공급자와 소비자 양 쪽에 도움이 된다. 먼저, 공급자에게 ESS는 도움이 된다. ESS를 에너지 시스템에 도입할 경우, 일반적으로 전력 시스템에서 에너지 공급량 변동에 따른 주파수 변동(frequency control)측면에서 대응하는데 많이 사용된다. 또한 에너지 공급 측면에서 일시적인 수요 증가에 대응하기 위해 막대한 투자보다는 생산량을 보다 일정하게 유지시킬 수 있게 한다. 수요 급증(peak)에 대응하여 필요 공급량을 수요 변동에 완만하고 평평하게 대응하게 해주는(flattening, demand peak shelving) 효과를 볼 수 있다. 즉 평평하게 해 준다는 것은 수요 급증에 대응하기 위한 공급 용량 증가를 하지 않아도 된다. 이를 통해 투자비를 절감할 수 있어 비용 경쟁력을 확보할 수 있다. 또한 생산 공정의 급격한 변화가 적어지는 일정한 공정 운행을 할 수 있기 때문에 에너지 생산 공정 운영의 안정성을 가져온다.

ESS 자체는 독립적인 에너지 공급원이 되지는 못한다. 이러한 비독립성을 가지고 있지만, 하지만 운영 방법에 따라, 에너지 공급원에서 생산된 에너지를 저장한 후, 필요할 때, 소비자에게 공급자의 역할을 수행할 수 있다. 따라서 공급자는 이를 어떻게 활용할 것인가가 중요하다. 즉 생산자 입장에서 생산된 에너지를 바로 수요자에게 넘기느냐, 아니면 ESS에 저장하여 나중에 더 비싼 가격에 판매할 수 있을 때를 기다릴 수 있다. Fig. 1은 생산자 입장에서 에너지 시스템의 의사 결정 과정을 도식으로 표현하고 있다.

또한 소비자의 입장에서도 ESS는 도움이 된다. 수요가 급등하는 기간에, 에너지의 가격이 비싸게 되며, 소비자는 비싼 가격에도 불구하고 어쩔 수 없이 에너지를 구매해야 한다. 하지만 이전에 가격이 저렴할 때 생산되어, 저장된 ESS의 에너지를 이용한다면, 직접 생산된 에너지만 의존하는 것보다, 더 많은 양을, 더 저렴한 가격에 에너지를 구할 수 있다. 또한 미리 약속한 에너지를 구매할 수 없게 될 경우 에너지를 그대로 버리지 않고 이를 충전함으로, 나중에 에너지를 재사용 할 수 있다.

에너지 수요는 근본적으로 변동성을 가지고 있다. 예를 들어 에너지를 사용하는 고객에 해당하는 화학공정이나 프로세스 산업의 경우 제품 주문량, 제품 사양(specification)의 변경과 같은 생산 계획 변동이나, 공정 설비의 고장, 유지 보수 작업 등 다양한 사유로 에너지 수요는 변화하다. 생산 일정에 따라 에너지를 많이 소비하는

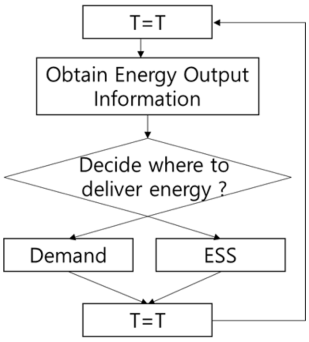

Fig. 1. Decision flow in ESS from supplier perspective.

세부 공정의 작업 일정이 달라지게 된다. 그에 따라 에너지 수요 또한 변동한다. 따라서 수요 측면에서 안정적 공급원의 확보는 언제나 매력적인 옵션이다.

일반적으로 에너지의 수요와 공급을 계속해서 일치시키는 것이 매우 어렵다. ESS는 재생에너지뿐만 아니라 화석연료를 주로 사용하는 에너지 시스템에도 사용할 수 있다. 화석연료나 원자력 발전의 경우, 연속적으로 일정한 출력을 내지만, 수요는 계속 변동할 수 있기 때문이다. 수요와 공급량의 불일치의 현상에 대하여 ESS는 추가적인 공급량 증산에 따른 시설투자보다, 훨씬 저렴한 비용으로 공급량을 확대할 수 있는 대안이 된다.

이러한 장점을 가지고 있는 ESS의 보급 확대는 전기자동차, 휴대용 통신기기 등 최근 많은 휴대용 전기 장치들이 사용되면서, 에너지를 저장하여 사용할 수 있는 배터리의 기술개발에 영향을 크게 받았다. 관련 기술의 발달로 인해 ESS의 시스템도 많이 개발되고 있다. ESS에 대한 관심이 커지면서 다양한 세부 ESS 기술들이 개발되고 있다.

전반적인 ESS에 대한 연구들에 살펴본다면, 대하여, 관심이 큰 것과 한편 ESS에 대한 실제적 연구가 여전히 많이 필요하다. 예를 들어ESS가 가지는 잠재력을 충분히 활용할 수 있는 운영 방법론을 개발하는 것이 중요하다. 즉 ESS를 잘 개발하고 제조하는 것도 중요하지만, ESS를 어떻게 잘 사용할 수 있는가에 대한 운영 방법론의 중요성도 무시해서는 안 될 것이다.

ESS에 대한 큰 관심에도 불구하고, ESS의 도입 및 설치는 여전히 비싼 투자를 필요로 한다. 적극적으로 에너지 수요 대응을 할 만큼의 대용량 도입에 많은 에너지 시스템 운영자들은 주저하고 있다. 하지만 그렇다고 너무 적은 용량의 ESS만 도입된다면 실질적 경제적 기여도를 입증하기 어렵다. 따라서 ESS에 대한 투자를 정당성을 인정받기 위해서, 다양한 실제 상황에서 ESS가 얼마만큼의 수요 대응 효과나 생산 대체가 가능한지에 대한 가능성을 입증해야 한다. 이를 위해서는 다양한 상황을 반영한 ESS 운영에 대한 기반 연구가 필요하다.

그런데 실제로 ESS를 사용한 효과를 실증하기 위해서는, 확정적이고 결정론적인 데이터만 이용한다면, 실제 ESS의 개별 시기별 조업에 문제가 생길 수 있다. 즉 변동성을 무시하거나, 아니면, 단순히 변수에 대한 평균값으로만 반영한다면, 변동성의 실질적 영향을 제대로 반영할 수 없다. 특히 객관적으로 판단할 때, 재생에너지 생산과 에너지 수요는 서로 직접적 인과 관계가 없이, 불규칙적으로 발생하기 때문에, 불확실성의 영향력을 무시할 수 없고, 그 불확실성에 따른 변동폭이 얼마나 되는가를 산출해야 한다. 이러한 필요성에 부합하기 위해, 본 연구에서는 에너지 생산과 수요의 불확실성을 직접 반영하려고 한다. 구체적인 방법론으로, 몬테 카를로 모사(Monte Carlo Simulation) 방법을 이용하려고 한다. 이 방법은 다양한 연구들에 사용되고 있는데[8], 결정론적으로(deterministic) 정해지지 않은 함수나 변수의 값을 임의의 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 계산하는 방법이다. 수식으로 표현이 어렵고, 임의의 상황이 실제로 발생한 후에야 그 값을 알 수 있는 경우에 많이 사용된다.

3. 에너지 시스템에서 ESS

우선 에너지 시스템에서 가장 중요한 원칙은 각 time period에 에너지 수요와 공급을 일치시키는 것이다. t는 time period를 나타낼 때, 에너지 공급량, S_t와 에너지 수요 D_t 라고 하자. 여기서 가장 기본적인 에너지 수지 식은 각 시간 별로 공급량은 수요량 이상 준비되어야 한다는 것이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$S_t \geq D_t \tag{1}$$

우리에게 주어진 에너지 시스템에 에너지저장시스템 (energy storage system, ESS)이 설치되어 있다면, 위의 식에서 ESS에서 에너지 공급량으로 사용 가능한 배출(discharge) 양과 나중에 사용할 에너지로 저장할 충전(charging) 양을 같이 고려해야 한다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 변화될 수 있다:

$$S_t + dsc_t \geq D_t + chg_t \tag{2}$$

여기서 dsc_t는 ESS에서 방전시켜 사용 가능한 에너지의 양을 나타내고, chg_t는 ESS로 충전시킬 수 있는 에너지량을 나타낸다.

에너지 시스템을 최소 비용으로, 낭비되는 에너지의 양을 적게 하는 등 목적에 부합하게 운영하게 하기 위해서는 배출량과 충전량을 어떻게 정하느냐에 따라 달라진다. 그런데 식 (2)는 실제로는 순수 공급량과 순수 수요량에 따라 서로 다르게 적용된다. 여기서 순수 공급량/수요량이란 ESS에 충전되거나 방전되는 에너지를 제외한 완전히 에너지공급원에서 공급되거나, 소비자에게 의해 소비되는 에너지를 말한다.

어느 time period에 만약 공급량이 수요보다 적다면, black out이 되어 큰 피해를 발생하지는 않는다는 가정하에서, 다른 곳에서 에너지를 준비해야 한다. 기존의 천연가스 화력발전 대신에 ESS를 이용 할 수 있다면, ESS에서 충전된 에너지를 배출시켜서 이를 만족시켜야 한다. 따라서 ESS를 포함할 때 각 time period별 에너지 수지식(balance equation)은 다음과 같다.

$$S_t + dsc_t \geq D_t \text{ if } \mathrm{S}_t < \mathrm{D}_t \tag{3}$$

만약 공급량이 수요량보다 크다면, 그 차이만큼의 에너지는 버리지 않고, ESS에 충전시킨다.

$$S_t = D_{t+} chg_t \text{ if } S_t > D_t \tag{4}$$

그러면 여기서 ESS의 capacity를 어떻게 계산할 것인가를 살펴보자. ESS의 용량을 계산하기 위해서 각 시간(time period)별로 배출량과 충전량을 고려해야 한다. 그리고 결국 식 (5), (6)에서처럼 배출량과 충전양보다는 적어도 큰 값을 가져야 한다.

$$dsc_t \geq D_t - S_t \tag{5}$$

$$chg_t \geq S_t - D_t \tag{6}$$

따라서 ESS 용량의 최소 크기는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다

$$ESS_t \geq |S_t - D_t| \tag{7}$$

여기서 ESS_t는 시간 t에서의 ESS의 용량을 나타낸다.

각 time period별로 ESS의 용량은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$ESS_{t+1} = ESS_t + chg_t - dsc_t \tag{8}$$

ESS의 용량은 충전량과 방전량의 최대치에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 ESS의 최대값, ESS_{max}은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ESS_{max} \geq ESS_t \quad \forall t = \{1, 2, \cdots, NT\} \tag{9}$$

$$ESS_{max} = \max(E_1, E_2, E_3, \cdots, E_t, \cdots, E_{NT}) \tag{10}$$

여기서 각 시간별로 충전량과 방전량이 에너지 시스템의 필요한 공급량과 수요량이 계속해서 변화한다. 결국 이 관계식들을 통해 알 수 있는 것은, 어느 정도의 역할을 수행하기 위해서는 ESS의 적절한 용량은 해당 에너지 시스템에서 그 에너지 시스템의 크기, 즉 수요량과 공급량을 정확하게 알아야 제대로 산정할 수 있다. 하지만, 에너지 공급량과 수요량을 그 값들이 실제로 발생하기 전까지 정확하게 알 수 없기 때문에 예측값을 이용해야 했다. 그 예측값은 자체적인 값이 아니라 그 변동하는 값들의 대표값 혹은 평균값들이 사용한다.

수요와 생산의 어떠한 변동에 따라 ESS의 용량 및 그로 인한 에너지 시스템의 운영이 변동되는지를 살펴볼 필요가 있다. 이는 대표값만 산정해서 용량을 계산하는 방법의 비현실성을 극복하고, 현실적인 용량 산정 방법론 개발에 좋은 통찰력을 제공해 줄 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 이를 위해서 공정 모사(simulation)의 방법을 이용하여 계산해 보려고 한다.

4. 공정 모사 방법론

본 연구에서는 ESS의 용량을 산정하기 위해 다음의 가정을 사용하였다.

(1) 에너지 수요와 공급량은 미리 알려지지 않고 불확실하다.

(2) 에너지 수요량과 공급량은 정확하게 알 수는 없지만, 어떤 범위 내에 있고(수요량과 공급량의 최대값과 최소값은 미리 알려져 있다). 공급량과 수요량은 정규분포를 가지고 임의로(randomly) 선정된다. 구체적으로 100 kw와 200 kw 사이에서 선택된다. 공급량과 수요량들이 10,000회의 time period동안 처리될 경우 그 값들의 분포도는 Fig. 2(a)에서 나타내고 있다.

이 가정들은 개별 실제 에너지 시스템의 수요와 공급량을 정확하게 나타내지 않을 수도 있다. 하지만 본 연구에서는 특별한 경우가 아니라 일반화시켜 공급량과 수요량이 서로 개별적으로 결정되었다고 가정하였다. 만약 개별 수요와 공급량의 상관 관계를 알고 있다면, ESS의 적합한 용량도 여기서 계산할 수 있을 것이다.

(3) 각 time period 마다 에너지 수지 식을 만족시켜야 한다. 예를 들어 공급량이 수요량보다 적을 경우, ESS에 저장된 에너지를 방출해야 한다. 이렇게 ESS에서 필요로 하는 방출 에너지 양의 분포도는 Fig. 2(b)에 도식화되어 표기되어 있다. Fig. 2(b)는 임의의 한 time period에 수요와 공급의 차이 값의 분포를 보여준다. 즉 이 분포도에서 알 수 있는 것은 수요와 공급량의 차이가 매우 극적으로 큰 경우들은 매우 적으며, 상대적으로 적은 값의 차이가 생기는 것이 훨씬 많이 발생 할 수 있다는 것이다.

(4) 몬테 카를로 시뮬레이션을 10,000회 동안 실시되었다. 시뮬레이션의 적절한 실험 횟수를 정하기 위해 다양한 횟수를 실시하였다. 더 적은 횟수는 계산 시간은 빠르지만, 일반화 시키는데 적합하지 않을 수도 있다. 또한 매우 많은 반복 횟수는 실제 발생 가능한 상황들을 가능한 모두 반영할 수 있겠지만, 필요 이상의 경우 단순 계산만 낭비하는 경우가 될 수 있다. 본 연구에서 여러 가지 수행 횟수를 테스트 하여 보았는데, 10,000회의 경우가 그 추세는 가능한 적절하게 나타내는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 반복 횟수를 10,000회로 정하였다.

(5) 수요와 공급의 차이에 대한 대응 방법이 한 가지 이상이 될 수 있다. 즉 현 시점만 고려하는 경우가 있다. 이 경우는 이전 시기에 발생한 차이를 누적시키지 않는 것이다. 이는 기존에 ESS가 없다고 가정하고 사용하는 것과 같은 것이다. 그렇지 않고, 바로 이전 시기에 발생한 값을 고려한 경우도 있을 수 있다. 이전 시기에서 발생한 차이를 누적 시키는 경우이다. 한 기간만 고려한 경우를 'singular discharge/charge' (단일 방전/충전 조업)로 표기하였고, Fig. 3(a)에 그림으로 정리하였다. 이전 시기의 누적을 고려한 연속적 ESS조업의 결과는 'consecutive discharge/charge' (연속 방전/충전 조업)로 표기하였고, Fig. 3(b)에 정리하여 보여주고 있다.

Fig. 3의 결과가 시사하는 바를 분석할 필요가 있다. 첫째, 충전량이나 방출량의 어느 한 쪽이 일방적으로 큰 경우는 발생하지 않았다. 둘 중 어느 한쪽이 지속해서 많이 발생한다고는 말 할 수 없다. 즉 시행하는 횟수에 따라 달라지기 때문에 어느 한쪽이 반드시 크다고 말할 수는 없다. 시행하는 경우에 따라 서로 다르게 발생한다. 이은 우연성에 따른 임의의 발생이 의도대로 반영되었다고 해석할 수 있다.

둘째, 공급량과 수요량의 차이의 값이 커질수록 빈도수는 적어진다. 즉 공급량과 수요량이 크게 차이 나는 경우는 그 발생빈도가 작

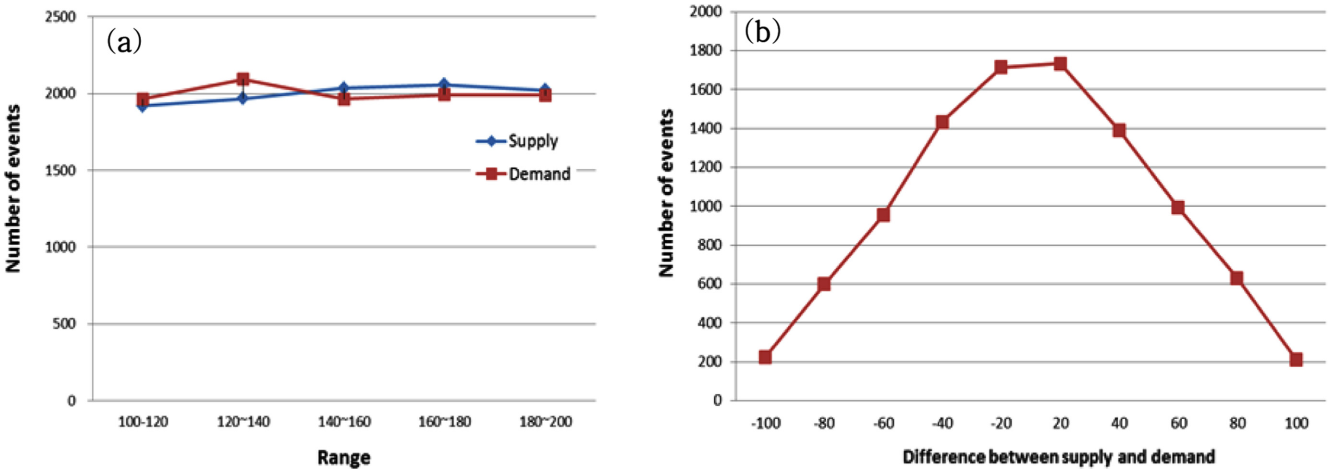

Fig. 2. (a) An illustration of varying supply and demand; (b) The distribution of difference between supply and demand.

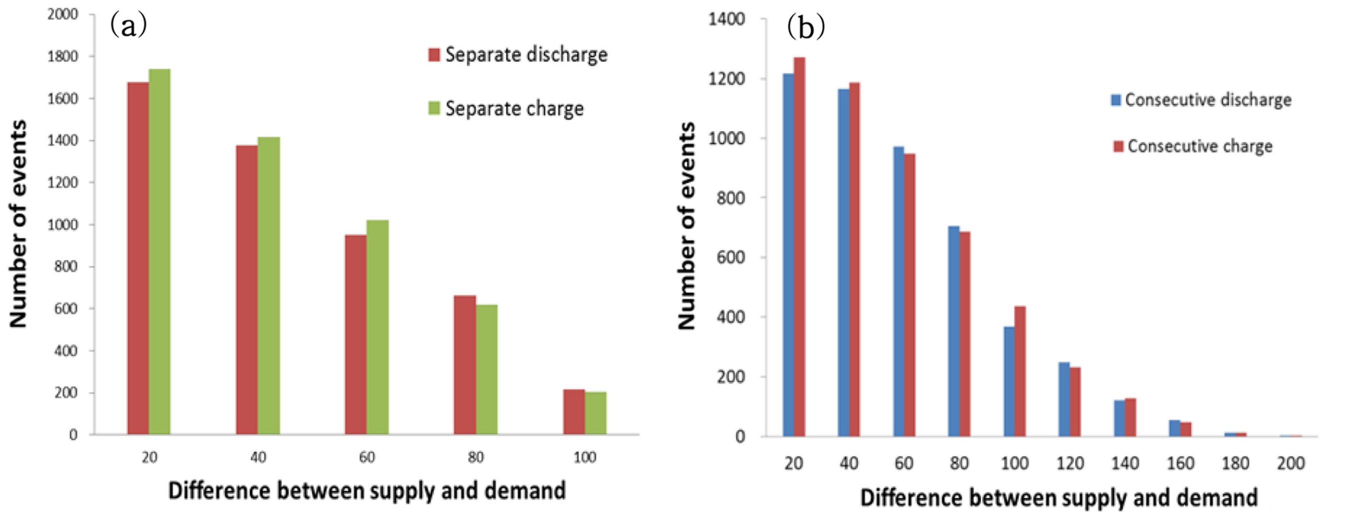

Fig. 3. Monte Illustrations of distribution result according to the proposed Monte Carlo simulation: (a) difference between supply and demand according to separate ESS operation; (b) difference between supply and demand according to consecutive ESS operation.

다. 반대로 공급량과 수요량의 차이가 적은 경우가 훨씬 더 자주 발생한다고 말 할 수 있다. 이는 Fig. 2(b)의 추세와 Fig. 3(a), (b) 모두 일치한다.

Fig. 4는 단일 시점만 고려하는 경우와 누적 기간을 고려한 경우의 수요 공급 차이를 직접 비교하여 보여준다. 이 그림을 통해, 누적 기간을 고려한 분포도가, 단일 시점의 경우보다 더 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다.

이 그래프에 나온 결과들이 의미하는 바를 분석할 필요가 있다. 즉 단일 시점일 경우 수요 공급 편차가 적은 이벤트가 많이 발생하고, 편차가 양이나, 음의 경우로 매우 큰 이벤트는 상대적으로 덜 발생함을 보여준다. 따라서 단일 시점을 위주로 ESS를 설계한다면, ESS의 편차를 상대적으로 적은 용량으로 선택해도 된다는 것을 의미한다. 하지만 누적되는 경우를 고려한다면, 편차의 절대값이 큰 경우도 많이 발생할 수 있음을 고려해야 한다. 즉, 그러한 큰 편차를 반영할 수 있도록 ESS의 용량도 크게 선정되어야 한다는 것을 의미한다. 실제 ESS를 운영하는 목적이 누적 조업을 고려한 경우가 더 현실적이기 때문에 따라서 ESS 용량 선정에 있어서 더 보수적(conservative)으로 접근을 해야 한다고 해석할 수도 있다. 즉 편차만큼 용량 산정에 이용되는데 그 편차 값이 누적이 반영되는 상황에서 더 큰 이벤트들이 발생할 확률이 크다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 모두 정규 분포를 가지고 있다고 가정했는데 실제 에너지 생산량과 수요량이 정규 분포를 따르지 않을 수도 있기 때문에 이 편차 값은 더 크게 분포한다고 판단하는 것이 옳다고 생각된다. 즉 ESS의 용량 산정은 단순 수요와 공급량의 편차 값보다 더 크게 고려되어야 한다.

즉 필요한 ESS의 용량을 계산하기 위해서는 단순히 수요와 공급량을 산정하는 것뿐만 아니라 ESS를 운영할 에너지시스템의 운영 정책(operation policy)도 고려해야 한다는 점을 도출해 낼 수 있다. 에너지 시스템을 어떻게 운영하는 정책이 변동성을 소극적으로 판단하는지, 그렇지 않고 변동성의 영향력을 적극적으로 반영하는지에 따라 필요로 하는 ESS의 용량 또한 달라지기 때문이다.

수요와 공급의 불확실성을 반영한 현실적 ESS 용량 산정을 위해서는, ESS가 설치되어 운영될 에너지 시스템의 운영 정책을 고려해야 한다. 에너지 시스템 운영에 가장 기본은 수요와 공급의 대응이지만, 수요와 공급을 미리 정확하게 아는 것이 불가능하기 때문에, 수요와 공급에 대한 예측 시스템(forecasting system)을 이용한다. 그 예측 시스템이 정확하다면, 수요와 공급의 편차에 대해 보수적으로 접근해도 큰 문제는 발생하지 않을 것이다. 이를 위한 ESS 용량을 과도하게 산정하지 않아도 될 것이다. 즉 ESS 구매 설치 투자비를 절감할 수 있을 것이다. 반면에 예측 시스템의 정확도가 떨어진다면, 그 편차를 추가적으로 확대 해석해서 반영하는 것이 바람직할 것이다. ESS용량 또한 충분하게 반영해야 할 것이며, 이로 인하여 상당한 투자비를 집행해야 할 것이다.

시뮬레이션 결과가 보여주는 바는, 필요로 하는 일반적으로 예측하는 것보다 ESS의 용량은 Fig. 4에서 보여주듯이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

ESS의 용량을 산정하는 보다 더 수치적인 방법에 대한 개발이 필요하다고 할 수 있다.

Fig. 4는 재생에너지의 변동성에 따라 대응해야 할 ESS의 용량과

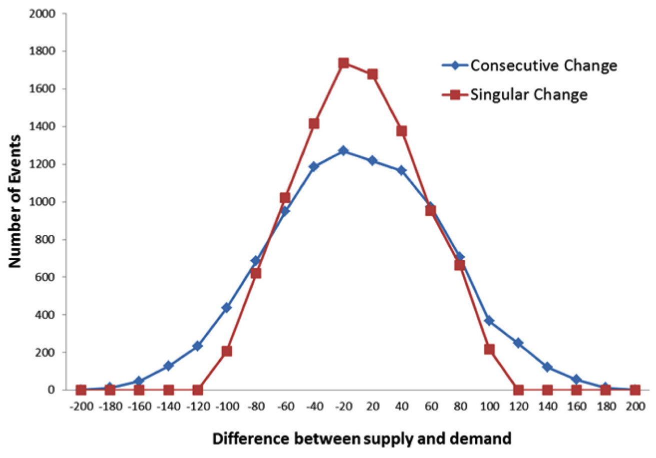

Fig. 4. An illustration of Monte Carlo simulation. red-coloured rectangle: difference between supply and demand according to separate ESS operation; blue-coloured spot: difference between supply and demand according to consecutive ESS operation.

그 용량이 필요한 경우가 얼마나 자주 발생하는지에 대한 공정 모사 결과를 보여준다. 청색으로 표기된 연속 조업의 경우에 상대적으로 커다란 ESS의 대응 용량이 필요한 경우가 많고, 단일 조업일 경우에는 그 빈도수가 적다는 것을 알 수 있다. 따라서 대규모 용량이 필요한 경우는 상대적으로 많지 않아서 적당한 규모의 ESS로도 많은 경우에 대응이 가능하다고 판단할 수 있을 것이다.

최근 battery에 대한 많은 연구와 산업화가 전세계적으로 진행 중인데 battery management system (BMS)에 대해서는 많은 연구들이 발표되고 있지는 않음을 주목할 필요가 있다. 이 연구들이 발표되지 못하는 것은 battery에 대한 효율성 및 생산 극대화에 많은 관심이 주어지고 상대적으로 소홀함을 의미할 수도 있고, BMS 자체가 매우 중요한 연구 분야이기 때문에 이를 외부에 적극적으로 발표하지 않고 자체적으로(in-house) 개발 및 상용화를 이루어내고 있다고 해석할 수도 있다. 따라서 개별 기업 및 시스템 별로 독자적인 배터리와 에너지 시스템에 대한 분석에 바탕을 두고 개발하고 있는 것으로 판단된다.

5. 토 의

경제적 발전을 위해서는 저렴하고 충분한 에너지를 공급하는 것이 매우 중요하다. 산업혁명과 2차 세계대전 이후 화석연료 기술 개발로 인한 경제 개발은 인류 역사상 전대미문으로 급속도로 일어났다. 하지만 장점이 클수록, 그로 인한 단점의 영향력도 커졌음을 체감하였다. 화석연료 배출물로 환경 오염물질과 온실가스가 무분별하게 배출되어, 그로 인한 환경 오염과 지구 온난화로 인한 기후변화 문제가 매우 심각해졌다.

화석연료에서 재생에너지로의 에너지원의 변화는 불가피해졌다. 비재생에너지에서 재생에너지로의 변동이 불가피하지만, 재생에너지의 장점을 강조하기 위해서는 반대로 재생에너지의 단점을 최소화할 수 있는 방안을 강구하는 것이 필요하다.

재생에너지의 불확실성에 의한 효율저하라는 단점을 보완하기 위해 ESS의 중요성이 커져가고 있고, ESS는 최근 많은 관심을 받고 있다. 수요의 갑작스런 증가를 대비하기 위해 생산량을 무조건 증가시키는 것은 과잉투자가 될 수 있다. 과잉투자를 최소화하면서 과잉 생산된 에너지를 재사용할 수 있는 ESS의 장점은 매우 중요하다. 하지만 에너지 시스템의 변동성은 수요와 공급의 비교를 훨씬 더 복잡하게 한다. ESS가 단순히 잉여 에너지를 재사용한다는 단편적 기여에서, 보다 더 발전된 기여를 하기 위해서는 에너지 시스템이 가지고 있는 변동성을 제대로 반영해야 한다. 이러한 필요성 때문에 본 연구는 재생에너지 출력의 불확실성이 재생에너지 사용 비중이 불가피하게 증가되고 있는 에너지 시스템의 안정적 운영을 위해서는 매우 중요한 요소이다. 향후 본 연구에서 살펴본 불확실성을 고려한 ESS의 운영방식에 대해서는 보다 더 다양한 많은 후속 연구가 계속되리라 예상한다.

감 사

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 수소에너지혁신기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었음(NRF2019M3E6A1064287). 류준형은 동국대학교 경주캠퍼스의 재정적 지원을 일부 받았습니다.

References

1. Dunn, B., Kamath, H. and Tarascon, J.-M., "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices," *Science*, **334**(6058), 928-935(2011).
2. Olabi A. G., "Renewable Energy and Energy Storage Systems," *Energy*, **136**, 1-6(2017).
3. Scrosati, B., Garche, J., "Lithium Batteries: Status, Prospects and Future," *J. Power Sources*, **195**(9), 2419-2430(2010).
4. Mazzoni, S., Ooi, S., Nastasi, B. and Romagnoli, A., "Energy Storage Technologies as Techno-economic Parameters for Master-planning and Optimal Dispatch in Smart Multi Energy Systems," *Appl. Energ.*, **254**, 113-682(2019).
5. Padmajan, S., Sasikala, G., Jeong, T. Y. and Kim, S. O., "A Perspective on R&D Status of Energy Storage Systems in South Korea," *Energy Storage Mater.*, **23**, 154-158(2019).
6. Ryu, J. H., "Operation Planning of Energy Storage System Considering Multiperiod Energy Supplies and Demands," *Korean J. of Chem. Eng.*, **35**(2), 328-336(2018).
7. Yu, J. J. Ryu, H. and Lee, I. B., "A Stochastic Optimization Approach to the Design and Operation Planning of a Hybrid Renewable Energy System," *Appl. Energ.*, **247**, 212-220(2019).
8. Rhee, G., Hwangbo, S. and Yoo, C. K., "Fate Analysis and Impact Assessment for Vehicle Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Hydro carbons (PAHs)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(4), 479-495 (2018).