부하 평준화를 위한 변전소 설치 배터리 에너지 저장장치의 모델 및 경제성 평가에 관한 연구

Modeling of Battery Energy Storage System at Substation for Load Leveling and Its Economic Evaluation

조 성 민* · 신 희 상* · 김 재 철†
(Sung-Min Cho · Hee-Sang Shin · Jae-Chul Kim)

Abstract - As development of battery technologies, the installation of Battery Energy Storage System (BESS) increased. The BESS can be used for various purposes such like frequency response, load leveling, and fluctuation mitigation of renewable energy generators. In this paper, three state BESS model is proposed. the BESS model considering charge, discharge and keeping efficiency, and life cycle according to depth of discharge (DOD). Then, the benefit and cost of BESS installed at substation for load leveling are summarized. The economic evaluation of BESS is analyzed using net present values (NPV) analysis. In case study, the NPV analysis of NaS battery system is carried out using the proposed BESS model. Because the result of economic evaluation of BESS using nowadays cost data is not positive, the sensitivity analysis of BESS is conducted by changing the capital cost and energy cost.

Key Words : BESS, Battery, Load leveling, Economic evaluation

1. 서 론

전기 에너지는 저장에 어려움이 때문에 전력 시스템은 기본적으로 수요와 공급이 항상 일치되어야 한다. 그래서 수요를 예측하여 발전량을 계획하여 제어하고 전력 소비자가 공급 가능한 전력량 범위 내에서 소비하도록 가격 정책 등으로 관리한다. 전력의 소비는 부하의 종류에 따라서 시간에 따른 패턴을 갖고 있으며 대부분 점심시간 전후에 소비되는 전력이 최고에 이르고 겨울철에는 저녁에도 최대 전력 수요가 발생한다. 반대로 심야의 시간에는 전력 소비가 감소하여 최저점에 이르게 된다. 이렇게 최대 전력 수요와 최소 전력 수요의 차이가 커질수록 전력 시스템은 비효율적인 요소가 증가한다. 전력설비는 최대 전력 수요에 대응하기 위해 설계되기 때문에 전력수요의 편차가 증가하면 전력설비의 이용률이 감소하게 된다. 특히 우리나라와 같이 전력의 수요가 수도권에 밀집되어 있고 원자력 발전에 대한 비율이 높은 상황에서는 원자력 발전소에서 수도권 전력 수요까지의 송전 시스템의 모든 설비에 대한 이용률이 감소하게 된다. 게다가 송전 혼잡에 의해 수도권 인근의 원자력 발전에 비해 상대적으로 높은 발전 단가의 발전소가 가동되어야 하기 때문에 전력 시장에서의 발전단가의 상승이 발생된다[1]. 이러한 이유로 전기 에너지의 저장은 오래 전부터 요구되어 왔으며 양수발전 등이 그의 예로 활용 되어 왔다.

화석연료에 대한 고갈과 기후문제 등으로 전기 에너지의 소비는 계속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 이러한 상황에서 원자력 발전과 풍력발전 등이 현실적으로 증가하는 부하에 대한 대응방안으로 계획되고 있지만 원자력 발전은 현재 그 발전량을 가변 제어하는 방식이 아닌 고정 발전량 출력으로 기저부하에 대한 공급을 담당하고 부하의 변동에 대해서는 다른 종류의 발전기들이 대응하거나 양수발전소에서 전력을 보관 제어하는 역할을 하고 있다. 하지만 양수발전소의 경우 지형적인 영향을 받기 때문에 추가적인 설치 비용이 많이 든다. 5차 전력수급기본계획에 따르면 우리나라의 원자력 설비용량은 2010년 18,716MW에서 2020년 31,516MW로 크게 증가되는 반면 양수발전은 2010년 3,900MW에서 2020년 4,700MW로 그 증가량이 매우 작다[2][3].

이러한 상황에서 전력용 배터리 에너지 저장장치(Battery Energy Storage System, BESS)는 출력에 대한 불확실성이 큰 신재생에너지원과 원자력 발전의 비중이 증가하는 스마트 그리드 환경에서 중요한 제어 요소로 자리하게 될 것이다. BESS의 연구는 미국과 일본에서 주도적으로 진행되고 있다. 일본의 경우 NGK사와 동경전력(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)의 공동 프로젝트로 NaS(Sodium-Sulfur) 배터리를 개발하여 전력회사에는 부하평준화 목적으로 설치하고 플린트 시설에는 전력 품질 및 피크저감 용으로 개발하여 상업용으로 판매 되고 있다[4-6]. 미국의 경우 캘리포니아주 전력회사는 2014년부터 최근 5년간의 평균 공급전력의 2.25% 이상을 에너지 저장시스템을 이용하여 공급하는 것을 의무화하는 법안을 2010년 9월에 승인하여 그 보급을 촉진하고 있다[7].

현재 전력회사의 부하평준화에 적용을 고려중인 배터리는 종류는 NaS(Sodium-Sulfur) 배터리와 리튬이온(lithium-Ion)

* 정 회 원 : 숭실대 공대 전기공학과 박사수료

† 교신저자, 펠로우회원 : 숭실대 공대 전기공학과 교수

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 10일

최종완료 : 2012년 6월 15일

배터리, Redox flow(Reduction-oxidation) 배터리, 카본전극 납산(Lead-acid batteries with carbon-enhanced electrodes) 배터리 및 개선된 납축(advanced lead-acid)배터리 등이다 [8]. 이러한 배터리를 활용한 전체 BESS는 배터리의 특성에 따라서 주변설비(Balance Of System, BOS)가 다르기 때문에 보다 신뢰성 있는 경제성 평가를 위해서는 BESS 종류에 따라서 다른 효율 평가 모델이 필요하다.

본 논문에서는 변전소에 설치하는 부하평준화용 배터리 에너지 저장 장치의 경제적 평가를 위한 BESS의 모델과 편익과 비용 평가를 위한 방법을 제시하였다.

2. BESS 시스템 모델

BESS 시스템은 배터리의 종류에 따라서 다양한 구성으로 이루어지는데 크게 나누어 보면 아래의 그림 1과 같이 배터리와 인버터로 이루어지는 배터리 부분과 냉각을 위한 쿨러 또는 온도 유지를 위한 히터 및 flow 배터리에서는 순환을 위한 펌프 등의 보조 설비 부분으로 나누어 볼 수 있다[9].

그림 1 BESS 모델의 구성

Fig. 1 BESS Single diagram model

참고문헌 [10]에서는 BESS의 모델을 충전, 방전의 2가지 상태 모델로 정의 하였고 보조설비에 대하여 반영하지 않았다. 전형적인 밀폐형 납축전지(Value Regulated Lead-Acid, VRLA)는 히터 및 펌프 등의 보조설비가 필요하지 않아 충방전의 2단계로 정의하고 보조설비를 고려하지 않아도 효율의 반영에 큰 문제가 없다. 하지만 최근에 개발되어 보급되고 있는 NaS전지와 같은 경우 300도의 고온에서 동작하기 때문에 온도 유지를 위한 보조설비로 히터가 동작되어야 한다. 그러므로 BESS가 충방전의 동작 없이 저장된 에너지를 유지하는 동안에도 온도유지를 위한 전력을 소비하게 된다. 이러한 이유 때문에 본 논문에서는 충전, 유지, 방전의 3가지 상태 모델로 정의 하였고 보조설비를 고려하였다. 이 3가지 상태에서 그림 1에 정의된 전력 흐름의 방향은 표 1에 정리하였다. 비록 배터리의 모듈 단위에서는 자체 방전이 없거나 매우 작은 배터리도 있으나 BOS를 고려하면 유지

상태에서도 소비되는 에너지를 무시할 수 없다. 보조설비에서 소비되는 전력(P_{bos})은 배터리 기술의 종류에 따라서 충전 및 방전시 소비되는 전력이 변동되지만 모델을 단순화하기 위해 일정한 것으로 가정하고 충·방전 효율에서 차이가 발생하는 것으로 정의 하였다.

표 1 BESS 상태별 전력흐름 방향

Table 1 Direction of power flow of BESS components

	P_{bess}	P_{cell}	P_{bos}
충전	-	-	+
유지	-	0	+
방전	+	+	+

그림 1에 나타난 BESS의 입력(P_{bess})과 보조설비의 소비 전력(P_{bos}) 및 배터리 모듈의 입력(P_{cell})의 관계를 수식(1)에 나타내었다.

$$P_{bess} = P_{cell} - P_{bos} \quad (1)$$

충방전시 배터리 내부에 축적되는 에너지량은 수식 (2)~(3)과 같이 정의 할 수 있다.

충전상태:

$$E^{t+1} = E^t - \eta_c P_{cell}^t \times \Delta t \quad (2)$$

방전상태:

$$E^{t+1} = E^t - \frac{P_{cell}^t}{\eta_d} \times \Delta t \quad (3)$$

여기서, E^t : t시간에 배터리 내부 축적된 에너지[kWh]

P_{cell}^t : t시간에 배터리 모듈의 입력 전력[kW]

Δt : 단위 시간(0.5 또는 1 시간)

η_c : 충전 효율

η_d : 방전 효율

BESS가 에너지를 저장한 상태에서 유지 동작으로 운전하게 되면 저장된 에너지는 식 (4)와 같이 변동이 없는 것으로 정의하고 전체 BESS의 입력 전력은 식(5)와 같이 보조설비에서 전력을 소비하는 부하와 같이 나타나는 것으로 BESS의 모델을 정의할 수 있다.

$$E^{t+1} = E^t \quad (4)$$

$$P_{bess} = -P_{bos} \quad (5)$$

제시된 모델에서는, 충전 상태에서는 BESS의 배터리 부분(P_{cell})은 정격 전력을 흡수하지만 효율(η_c)에 의해서 배터리 내부에 충전되는 것으로 모의하고, 유지 상태에서는 배터리 내부의 자체 방전은 없고 주변설비가 전력을 소비하는 것으로 모의한다. 방전 상태에서는 배터리 부분(P_{cell})은 정격 전력을 출력하지만 배터리 내부에서 소비되는 에너지량은 효율(η_d)을 고려하여 BESS의 출력보다 많이 소비되는

것으로 모의한다. 또한, 식(6)과 (7)은 BESS 모델의 제약조건으로 배터리의 입·출력 전력은 한계범위 내에서 운전되어야 하며 이 한계범위는 정격에 150%까지 가능한 배터리 등도 존재하므로 정격용량과 별도로 설정된다. 배터리의 축적된 에너지의 양은 최댓값을 넘지 못하는 것으로 모의한다.

제약조건:

$$-P_{cellmax} \leq P_{cell} \leq P_{cellmax} \quad (6)$$

$$0 \leq E_t \leq E_{max} \quad (7)$$

여기서, $P_{cellmax}$: 배터리 모듈의 출력 한계값[kW]

E_{max} : 배터리 저장 에너지의 한계값[kWh]

배터리의 수명은 온도 및 충·방전 패턴 등 다양한 요소에 의해서 결정되어 진다. 본 논문에서는 방전심도(Depth Of Discharge, DOD)에 의해서 그 수명이 크게 결정되는 것으로 가정하였다. 방전심도는 배터리의 사용에서 어느 정도까지 방전하여 사용하는 정도를 나타내는 것으로 100%의 방전 심도는 배터리의 축적된 에너지를 모두 방전하여 사용하는 것이고 80%방전심도는 항상 배터리에 축적된 에너지의 20%는 사용하지 않고 80%만 출력하여 사용한다는 의미가 된다. 그림 2는 NaS 배터리의 방전심도(DOD)에 따른 수명 충·방전 사이클을 나타내고 있다[11].

그림 2 BESS 수명 함수

Fig. 2 BESS life cycle function

3. BESS 시스템의 경제성 평가

전력회사의 입장에서 변전소에 설치되는 BESS의 경제성 평가를 위하여 BESS 설치로 얻게 되는 편익과 비용을 크게 4개의 편익으로 정의 하였고 비용은 초기 자본 비용(구매 및 설치비용)과 운영비용으로 정의하였다. 경제성 분석 기법은 현재가치(Net present value) 분석법을 사용하였다. 따라서 모든 편익은 연간 편익(Annual benefit)으로 계산하고 그림 2와 같은 방전심도 특성에서 얻어지는 수명을 고려하여 전체 수명기간의 편익을 도출하였다. 비용은 초기 자본 비용은 설치 시점에 발생하는 비용이기 때문에 현재가치이며 운영비용만을 수명을 고려하여 현재가치로 환산하였다. 이

렇게 얻어지는 수명기간동안의 전체 편익과 비용의 차이가 BESS 설치의 순 현재 가치가 된다.

3.1 설비 투자 지연 편익

일정한 부하성장률(τ)로 부하가 증가하는 특정 지역의 변전소에 BESS를 설치하게 되면 변전소 설비의 추가 설치 및 송전선로의 추가 건설 등의 투자를 지연 시킬 수 있어 경제적 이득이 발생하게 된다. 식 (7)은 부하성장률과 삭감된 최대 전력을 통해 얻게 되는 투자 지연 기간을 나타내고 식 (8)은 이 투자 지연을 통해 얻게 되는 연간 편익을 나타낸다[10][12].

$$N_d = \frac{\log(1/\lambda)}{\log(1+\tau)} \quad (7)$$

$$B_{deferral} = C_{inv}(1 - (1+i)^{-N_d}) \quad (8)$$

여기서, τ : 변전소 부하 성장률

λ : 삭감된 최대 부하[p.u.]

N_d : 투자 지연 기간[년]

C_{inv} : 회피 투자비용[원]

i : 프로젝트 이자율

$B_{deferral}$: 투자 지연 편익의 현재가치[원]

3.2 손실 감소 편익

변전소에 BESS를 설치하게 되면 최대전력 소비 시간대에 변전소가 공급받는 전력을 감소시켜 손실을 저감 할 수 있다. 변전소에 설치된 BESS는 최대 전력 소비 시점에서 방전 운전을 하기 때문에 손실 저감의 효과는 경제성 분석에 고려할 만한 편익이 된다. 식 (9)는 1년의 BESS설치로 얻는 손실 저감에 대한 이득을 나타낸다.

$$B_{loss} = \sum_{t=1}^{24/\Delta t} [C_e^t(P_{loss0}^t - P_{lossb}^t) \times \Delta t] \times 365 \quad (9)$$

여기서, P_{loss0}^t : BESS 설치전 t시점의 손실[kW]

P_{lossb}^t : BESS 설치후 t시점의 손실[kW]

C_e^t : t시점의 에너지 비용[원/kWh]

B_{loss} : 연간 손실 저감 편익[원]

3.3 최대 전력수요 감소 편익

변전소의 BESS를 설치하면 전체의 전력 시스템의 관점에서 설비용량의 감소를 가져오기 때문에 특정변전소의 투자 지연과는 다른 거시적인 관점에서의 편익이 발생한다. 설비 투자 지연 편익과 분리하여 고려하는 이유는 BESS를 설치하는 변전소의 부하증가와 변압기 및 모선, 송전선로 등의 설비의 증설에 대한 것은 설비 투자 지연 편익으로 분류하여 고려하고 발전기의 조합에서 발전설비의 증가를 회피하는 것은 최대 전력 수요 감소 편익으로 구분하였다. 이는

BESS의 설치 위치에 따라서 설비투자 지연이득은 다양하게 나타날 수 있으나 최대 전력 수요 감소편익은 큰 차이를 보이지 않게 된다. 일반적으로 피크전력 수요 시에는 LNG발전기가 부하를 대응하는 것으로 하여 LNG발전소의 건설비용이 최대전력의 수요를 줄이는 효과를 갖는 것으로 볼 수 있다. 식 (10)은 BESS설치로 인한 최대 전력 수요의 감소에 대한 편익을 정리하였다[13].

$$B_{power} = C_{kw}(P_{peak0} - P_{peakb}) \quad (10)$$

여기서, P_{peak0} : BESS 설치 전 최대전력수요[kW]

P_{peakb} : BESS 설치 후 최대전력수요[kW]

C_{kw} : 최대전력수요 저감 편익[원/kW]

B_{power} : 최대전력수요 감소 연간편익[원]

3.4 에너지 관리 편익

에너지 관리 편익은 BESS가 방전 운영을 하여 발전 단가가 높은 시간대의 부하 사용량을 저감하여 발전단가가 높은 발전기 보다는 원자력 같은 기저 발전력의 활용을 증가시켜 전체 에너지 공급 비용을 저감할 수 있는 편익이다. 식 (11)은 BESS의 연간 에너지 관리 이득을 정리한 수식이다.

$$B_{energy} = \sum_{t=1}^{24/\Delta t} (C_e^t P_{bess}^t k^t \Delta t) \times 365 \quad (11)$$

여기서, P_{bess}^t : t시점의 BESS의 출력 전력[kW]

C_e^t : t시점의 에너지 비용[원/kWh]

k^t : t시점의 BESS 동작(방전시 1, 그 외 0)

B_{energy} : BESS의 연간 에너지 관리 편익

3.5 BESS의 설치비용

BESS의 비용은 크게 자본비용(설치비용)과 운영비용으로 나누어 볼 수 있다. 그중 자본비용은 아래 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{install} = C_P P_{spec} + C_E E_{spec} \quad (12)$$

여기서, P_{spec} : BESS의 정격 출력[kW]

E_{spec} : BESS의 저장 에너지 용량[kWh]

C_P : BESS의 출력 단위 비용[원/kW]

C_E : BESS의 에너지 단위 비용[원/kWh]

$C_{install}$: BESS의 초기 자본 비용[원]

BESS의 초기 자본 비용은 크게 BESS의 정격 출력(kW)에 비례하는 비용과 저장 용량(kWh)에 비례하는 비용으로 나누어 계산한다. 출력에 비례하는 비용은 연계 변압기 및 내부 선로, 냉각 설비 등에 대한 비용이고 저장 에너지 비용

은 배터리 셀의 병렬연결에 의한 에너지 비용으로 볼 수 있다[14].

3.6 BESS의 운영비용

BESS의 운영비용은 심야의 BESS의 충전 비용이 가장 대표적인 비용이 되겠다. 이러한 충전 비용은 식 (13)과 같이 정의 할 수 있다. 식(11)과 유사하지만 충전비용은 충전 및 유지동작 시 소비되는 전력에 대한 비용으로 방전 동작 이외의 시간대에 소비되는 에너지에 대한 비용으로 정의한다. 이때 소비되는 비용은 충전 동작에 의한 비용도 있지만 에너지 충전 후 유지 동작 시에도 보조설비에서 소비되는 비용을 함께 고려해야 한다.

$$C_{op} = \sum_{t=1}^{24/\Delta t} C_e^t P_{bess}^t (k^t - 1) \Delta t \times 365 \quad (13)$$

여기서, P_{bess}^t : t시점의 BESS의 출력 전력[kW]

C_e^t : t시점의 에너지 비용[원/kWh]

k^t : t시점의 BESS 동작(방전시 1, 그 외 0)

C_{op} : BESS의 연간 운영비용

현재 BESS는 프로젝트 단계로 설치되어 운영되는 것이 대부분이기 때문에 BESS의 연속적인 운전 기록이 드물어 보수비용의 산출이 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 보수비용(Maintenance Cost)은 생략하였다. 차후 BESS의 설치 보급이 확산되어 보수비용의 산정이 가능하다면 보수비용도 함께 경제성 평가에 반영되어야 한다.

3.6 BESS의 경제성 평가

BESS 시스템의 경제성 평가는 앞서 언급된 편익과 비용에 대하여 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 다음의 순서를 통해 구할 수 있다.

- 1) 설치 계획의 BESS 용량 및 운영 DOD 결정
- 2) DOD에 따른 BESS의 수명 결정(N)
- 3) 전체 편익의 순현재가치 계산

$$B = B_{deferral} + (B_{loss} + B_{power} + B_{energy}) \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \quad (14)$$

- 4) 전체 비용의 순현재가치 계산

$$C = C_{install} + C_{op} \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \quad (15)$$

- 5) 프로젝트의 순현재가치(NPV) 계산

$$NPV(i) = B - C \quad (16)$$

여기서, i 는 최소요구 수익률(MARR)로 BESS 설치에서

기대하는 최소의 수익률이 된다. 경제성분석의 대표적인 순현재가치 분석법에서는 NPV가 양(+)의 값을 가지면 타당한 프로젝트로 판정한다[12].

4. 사례 연구

4.1 사례연구 데이터

본 논문에서 제시된 BESS 시스템 모델과 경제성 평가의 효용성을 나타내기 위하여 사례연구에서 NaS 배터리를 모델 변전소 시스템에 적용하여 그 편익 및 비용을 분석하고 다양한 변수의 민감도를 확인하였다. 표 2는 사례연구에서 사용된 BESS의 사양을 나타낸다[9].

표 2 사례연구의 BESS 사양

Table 2 Spec. of BESS used in case studies

항 목	값	비고
BESS 종류	NaS	
배터리용량	P_{spec}	2 [MW]
	E_{spec}	14 [MWh]
운행 방전심도(DOD)	90 [%]	P_{cell} 의 용량
보조설비용량(P_{bos})	136 [kW]	
충전효율(η_c)	90 [%]	
방전효율(η_d)	95 [%]	

그림 3은 사례연구에서 BESS의 설치 대상 변전소의 부하 커브를 나타낸다.

그림 3 변전소 부하 곡선

Fig. 3 Substation Load curve

BESS 설치 결과 변화된 변전소 부하량을 그림 3에 함께 나타내었다. BESS의 동작은 식(1)~(7)의 모델을 이용하여 충방전 효율 및 보조설비를 모두 고려하였다. BESS의 운영 방식은 시간에 따라서 동작이 정해지는 방식(Time Scheduled Operation)으로 가정하였고 0시에 충전을 시작하여 정격용량으로 충전을 완료하면 유지모드로 전환되고 11

시부터 방전을 하고 방전심도(Depth of Discharge)까지 방전하면 다시 유지모드로 동작하는 것으로 가정하였다.

경제성 평가에서 BESS의 편익을 계산하기 위한 데이터는 표 3에 정리하였다. 최대 전력 수요 회피 비용(C_{kw})은 LNG 발전설비의 건설비용과 분석대상 변전소의 최대 부하가 전체 계통의 최대 부하에 대한 기여율을 기반으로 도출할 수 있으나 본 연구사례에서는 전력 기본요금을 고려하여 가정하였다. 시간대에 따른 에너지 비용(C_e^t)은 표 4의 시간대에 따라서 다르게 적용하였다. 또한 식 (12)에서 사용되는 BESS의 초기 자본비용(설치비용) 산출을 위한 데이터는 표 5에 정리하였다[4][13-15].

표 3 BESS 설치 사례연구를 위한 데이터

Table 3 Data for BESS installation case study

항 목	데이터	비고
이자율(i)	6 [%]	
부하성장률(τ)	3 [%]	
회피 투자비용(C_{inv})	10 [억원]	
변전소 등가 임피던스	0.07 [ohm]	
최대 전력수요 회피 비용(C_{kw})	80916 [원/kW]	
시간대별 에너지 비용	경부하	54 [원/kWh]
	중간부하	89 [원/kWh]
	최대부하	136 [원/kWh]

표 4 BESS의 시간대별 에너지 비용

Table 4 BESS energy cost according to time

비고	시간대	구분	에너지 비용
1	23:00~09:00	경부하	54 [원/kWh]
2	09:00~11:00	중간	89 [원/kWh]
3	12:00~13:00	중간	
4	17:00~23:00	중간	
5	11:00~12:00	최대	136 [원/kWh]
6	13:00~17:00	최대	

표 5 BESS 설치비용 정보

Table 5 BESS installation cost

비 용 항 목	NaS
출력 단위 비용(C_p)	300,000 [원/kW]
에너지 단위 비용(C_E)	300,000 [원/kWh]

4.2 BESS 설치 동작에 따른 편익 및 비용

표 2~5의 데이터를 이용한 BESS 설치의 편익 및 비용을 분석하여 표 6에 정리하였다. 모든 편익 및 비용은 수명기간 동안 발생한 편익 및 비용을 수명기간을 고려하여 식 (14) 및 식 (15)를 적용하여 현재가치로 환산한 것이다.

현재의 BESS의 설치비용은 상당히 높은 수준이기 때문에 순 현재가치가 음(-)의 값으로 나타나고 있어 경제성이 없는 것으로 나타나고 있다. 편익에서는 에너지 관리비용이 매우 큰 비율을 차지하는 것으로 나타나고 있으며 다음으로 최대전력수요 저감 편익, 손실 저감 편익, 설비 투자 지연편익의 순을 따르고 있다. 비용에서는 설비의 초기 설치비용이 전체의 67%에 이르고 심야의 BESS 충전 비용에 해당하는 운영비용이 약 33%의 비율을 차지하는 것으로 나타나 있다. 이는 BESS의 운영 전략에 따라서 변동될 수도 있다.

표 6 BESS 설치 편익 및 비용 분석 결과

Table 6 BESS installation benefit and cost

항목	값	비율
수명	9.59 [년]	
설비투자지연 편익	67 [백만원]	1%
손실 저감 편익	238 [백만원]	5%
최대 전력수요 감소 편익	895 [백만원]	19%
에너지 관리 편익	3,466 [백만원]	74%
편익 합계	4,666 [백만원]	100%
초기 자본 비용 (설치비용)	4,800 [백만원]	67%
운영비용	2,397 [백만원]	33%
비용 합계	7,197 [백만원]	100%
순 현재가치(NPV)	-2,531 [백만원]	

4.3 비용 변동에 따른 민감도

BESS의 설치비용은 BESS의 대량생산과 기술개발로 계속적으로 하락할 것으로 기대하고 있다. 또한 부하평준화 운영은 수요관리와 동일하게 전력회사에서 현재의 전력요금에 인센티브를 적용한 상황도 고려할 수 있고 미래의 전력요금의 변동에 따른 BESS 설치의 타당성을 고려할 수도 있다. 이러한 다양한 비용의 변동의 고려하기 위해서 표 4와 표 5에서 적용한 비용 데이터를 변동하면서 이에 따른 민감도를 분석하였다. 총 4가지의 비용의 변동에 대한 민감도를 분석하였다. 최대전력수요 회피 비용과 방전 시 에너지 비용은 10% 단위로 증가시켜 민감도를 분석하였으며 충전 시 에너지 비용 및 BESS의 설치비용은 10%단위로 감소시키며 현재가치의 민감도를 분석하였다. 이 민감도에 대한 결과는 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 민감도 분석 결과에서 BESS 설치의 경제성 분석은 설치비용이 큰 비중을 차지하기 때문에 가장 민감한 분석 요소로 나타났고 방전시의 비용이 그다음으로 민감한 입력 데이터로 나타났다.

BESS 설치비용이 30% 감소된 상황에서 나머지 3개의 변수의 변동에 따른 민감도를 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다. 설치비용이 30% 감소한 상황에서는 방전시의 에너지 비용이 30%이상 증가하면 사례연구의 BESS 설치가 경제성이 있는 것으로 나타났으며 충전 비용이 50% 이상으로 감소하면 BESS 설치가 경제성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 BESS 설치비용의 하락과 전력요금의 증가 및 수요관리 자원으로 BESS의 인센티브를 고려하면 BESS의 부하평

준화 운영도 경제성이 있는 결론을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 4 BESS의 순현재가치 민감도 분석

Fig. 4 NPV sensitivity analysis of BESS

그림 5 BESS의 순현재가치 민감도 (설치비30% 감면시)

Fig. 5 NPV sensitivity analysis of BESS

3. 결 론

본 논문에서는 변전소에 설치되어 부하평준화의 목적을 갖는 BESS 시스템의 경제성 평가를 위해 BESS의 모델을 제시하였다. NaS 및 VRF같이 근래에 소개되고 있는 BESS의 특성을 반영하기 위해 보조설비에서 소비하는 전력과 충·방전 효율을 나누어 고려한 3가지 상태(충전, 유지, 방전)로 나누어 고려한 BESS 모델을 제시하였다. 또한 일반적으로 BESS의 수명을 고정된 값으로 고려하지 않고 방전심도(DOD)에 의해 변동되는 형태로 정의하여 설치된 BESS의 용량과 실제 충·방전에서 사용되는 용량을 고려할 수 있도록 제시하였다. 이러한 BESS의 수명 및 보조설비의 소비전력을 고려한 모델은 보다 정확한 BESS의 경제성 분석에 효과적으로 사용될 것으로 예상된다.

경제성 분석을 위해 부하평준화의 목적을 갖는 BESS의 4가지 편익을 정의 하고 2가지의 BESS의 비용의 정의하여 경제성 분석에서 가장 보편적인 현재가치(NPV) 분석법을 통해 BESS설치의 경제성을 분석하였다.

사례연구를 통해 부하 평준화를 위한 BESS의 모델 변전소의 적용시의 경제성분석 결과를 나타내었고 BESS의 설치

비용의 감소와 충방전 비용의 인센티브 적용 등을 반영하기 위하여 비용정보들의 변화에 따른 현재가치 변화에 대한 민감도를 분석하였다. 현재의 비용을 고려한 경제성분석에서는 경제성이 없지만 BESS의 가격 하락과 다양한 요금제도에서 인센티브를 제공하면 BESS의 경제적 평가가 긍정적인 결론으로 나오는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시하는 BESS의 모델과 경제성 평가 방법이 BESS의 용량 선정과 운영 방법의 결정에 많은 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 숭실대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임

참 고 문 헌

- [1] Hadi Saadat, Power System Analysis, 2nd Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [2] 지식경제부, “제 5차 전력수급기본계획”, 2010. 12
- [3] 전력거래소, “전력통계편람”, 2011. 06
- [4] K.Tanaka, J. Yoshinaga, N. Kobayashi, "The Sodium-Sulfur Battery For Utility-Scale Applications", CIGRE 2008, Aug., 2008
- [5] Kenji Iba, Kouji Tanaka, Kuniaki Yabe, "Operation and Control of Nas Batteries on a University Campus", 16th Power Systems Computation Conference. July 14-18, 2008.
- [6] Yusuke Hida, Ryuichi Yokoyama, Kenji Iba, and Kouji Tanaka, "Practical Load following Operation of Nas Battery", 8th WSEAS international conference on Power systems, Sep. 23-25, 2008.
- [7] Energy Storage Activities in the United States Electricity Grid, Electricity Advisory Committee, May, 2011.
- [8] K. C. Divya, Jacob Ostergaard, "Battery energy storage technology for power systems-An overview", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 4, April 2009.
- [9] M. Broussely, G. Pistoia, "Industrial Applications of Batteries", 1st Edition, Elsevier, 2007
- [10] Fouad Abou Chacra, Patrick Bastard, Gilles Fleury, and Regine Clavreul, "Impact of Energy Storage Costs on Economical Performance in a Distribution Substation", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 20, No. 2, May 2005
- [11] N. Lu, M. R. Weimar, Y. V. Makarov, C. Loutan, "An Evaluation of the NaS Battery Storage Potential for providing Regulation Service in California", Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011.
- [12] 박찬석, 최성호, “공학경제”, 영지문화사, 2009.

- [13] 김성철, “새로운 전력산업 환경하에서 조명수요관리 방법론 연구”, 건국대학교 대학원 박사학위논문, 2008.
- [14] Susan Schoenung, "Energy Storage Systems Cost Update", Sandia National Laboratories, April 2011.
- [15] “2012년 1월 1일시행 전기요금(종합)”, 한국전력공사, 2011. 12

저 자 소 개

조 성 민 (趙 成 旻)

1980년 10월 03일생. 2003년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2008년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사수료. 2012년 8월 졸업 예정

Tel : 02-824-2416

Fax : 02-817-0870

E-mail : dannyyone@ssu.ac.kr

신 희 상 (申 熙 尙)

1980년 09월 18일생. 2007년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사수료.

Tel : 02-817-7966

Fax : 02-817-0870

E-mail : shs8828@ssu.ac.kr

김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일생, 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업, 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.

Tel : 02-817-0647

Fax : 02-817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr