

BESS의 경제성과 충방전 전압 특성을 고려한 적정 SOC 운영 영역 설정 기법에 관한 연구

A Study on the Methodology of Determining Proper SOC Operation Range Considering the Economic Characteristics and the Charge and Discharge Voltage Characteristics of BESS

윤대식* · 추대혁* · 기병국* · 김준석* · 이병하* · 채우규**

(Dae-Sik Yoon · Dae-Hyeok Choo · Byung-Kook Ki · Joohn-sheok Kim · Byung Ha Lee · Woo-Ku Chae)

Abstract - With the growing interest of microgrid all over the world, many studies on microgrid operation are being carried out. The battery energy storage system(BESS) is a key equipment for effective operation of the microgrid. In this paper, we analyze the characteristics of the charge and discharge output voltage of the battery and the characteristics of the life-span variation and the investment cost when the state-of-charge (SOC) changes. The formulas to represent the quality of the charge and discharge output voltage of the battery and the economics due to the life-span variation and the investment cost according to DOD(Depth of Discharge) are derived. The methodology of determining the proper operation ranges of the battery SOC with varying the weighting of the quality of its charge and discharge output voltage of the battery and the economics due to its life-span variation and the investment cost is presented using these formulas.

Key Words : BESS, SOC, DOD, Voltage Characteristic, Life-span, Microgrid

1. 서 론

마이크로그리드는 친환경 시스템으로서 환경뿐만 아니라 경제적, 사회적 가치에도 기여한다[1]. 신재생에너지와 같은 간헐적으로 발전하는 전원이 많이 사용되는 마이크로그리드에서는 배터리와 같은 전력저장장치가 시스템을 효율적으로 운전하기 위한 주요 설비가 된다. 따라서 마이크로그리드를 에너지 공급과 수요의 균형을 맞추며 최소발전비용으로 운전하기 위해서는 신재생 에너지를 운용 할 때 필수적으로 포함되는 배터리 에너지저장장치(Battery Energy Storage System: BESS)의 최적 운용 기법에 대하여 연구할 필요가 있다.

마이크로그리드(Microgrid)는 분산전원을 중심으로 하는 국소적인 전력시스템을 말하는 것으로, 신재생에너지와 소형열병합발전의 고효율발전기 등을 포함하는 소규모의 전력공급설비로 구성되는 소규모의 전력망이다. 향후, 5년간 마이크로그리드의 용량은 연평균 성장률(CAGR) 22%로 확대되고 2017년에는 4.7GW에 달

할 전망으로 마이크로그리드에 대한 수요는 전 세계적으로 증가하고 있으며, 다양한 분야에서 도입이 예상된다[2]. 실제로 EU, 일본, 미국, 등은, 다양한 목적의 마이크로그리드 실증 단지를 구축, 운영하고 있으며 이를 통하여 이 기술의 실용화를 계획하고 있다. 특히, 운용측면에서 마이크로그리드를 경제적으로 운용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있는데, 마이크로그리드의 운용 계획에 관한 연구는 대부분이 최적화에 기반하며 다양한 최적 기법에 의하여 최적운용 계획을 수립할 수 있다[3-5,8].

마이크로그리드의 배터리는 충방전을 거듭하면서 용량(Energy capacity)이 점차 저하되고 보통 초기 대비 80% 이하로 용량이 떨어지게 되면 수명이 다한 것으로 판단하게 된다. 배터리의 상태에 관한 인자는 크게 SOC(State of Charge), SOH(State of Health), SOL(State of Life)로 나뉠 수 있는데, 이 중 SOC, 즉 충전 상태는 비교적 오래 전부터 연구되어 왔으나 배터리의 건전성을 평가하는 SOH, 배터리의 고장을 예측하는 SOL에 관한 연구는 최근에 와서 활발히 진행되고 있다[12,13]. SOH와 SOL에 관한 연구들은 Lee[12]와 Pecht[13]의 리뷰 논문에 잘 정리되어 있다[11]. 또한, 리튬이온 배터리의 내부저항, 커패시터와 전력손실증가에 따른 수명뿐만 아니라 전기적화학적, 기계적인 프로세스로 인한 임피던스 스펙트럼을 나타내고, 온도, SOC 또는 사이클과 충방전에 관한 연구를 수행하였으며, 이의 연구 내용들을 참조하였다. 일반적으로 리튬계열 배터리의 수명은 3000 사이클 정도로 개발되어 있으며, 향후에는 관련분야의 연구와 기술수준

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea.

E-mail : bhlee@inu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University

** Microgrid Research & Business, KEPCO Research Institute

Received : November 27, 2014; Accepted : February 27, 2015

이 향상되어 수명이 더 늘어날 것으로 예상된다[14].

본 논문에서는 배터리의 SOC의 변화에 따른 배터리의 총방전 출력전압과 배터리의 SOC의 변화가 수명 및 투자비에 미치는 영향을 분석한다. 배터리의 SOC의 변화에 따른 배터리의 총방전 출력전압의 특성으로부터 배터리의 총방전 출력전압 관점에서의 품질을 DOD(Depth of Discharge)에 관한 수식으로 유도한다. 또한 SOC의 변화가 수명에 미치는 특성과 배터리 설비의 투자비 관점에서의 경제성을 DOD(Depth of Discharge)에 관한 수식으로 유도한다. 이러한 상이한 특성을 동시에 고려할 시의 적정운전점을 배터리의 총방전 출력전압 관점에서의 품질과 배터리의 수명 및 투자비 관점에서의 경제성에 대하여 각각 가중치를 변화시켜 가면서 그 영향을 분석하고, 각 경우의 적정 운전점을 도출하여, 각 경우에서의 배터리의 SOC(State of Charge)의 적정 운전 영역을 설정하는 기법을 제시한다.

2. 적정 SOC를 위한 총방전 출력전압 품질과 경제성 분석

2.1 BESS의 수명(Cycle)과 경제성

마이크로그리드의 ESS 시스템은 병렬 구조의 시스템으로 연결이 되어 있고, 마이크로그리드 ESS의 수명은 배터리의 수명과 가장 큰 관련이 있다. 따라서 배터리의 수명특성을 경제성관점에서 분석하였다. ESS의 종류는 배터리 에너지저장장치(Battery Energy Storage System: BESS), 플라이휠, 압축공기 에너지 저장 등이 있으며, 마이크로그리드에서는 배터리 에너지저장장치가 널리 사용되고 있다. 아래 표는 배터리의 종류에 따른 특성 비교를 나타내는 표이다.

표 1 배터리의 종류에 따른 특성 비교[15].

Table 1 Comparison of the characteristics according to the kinds of batteries

Type	Lead-acid battery	NiCad battery	NiMH battery	LiCoO ₂ battery	LiMn ₂ -O battery	LiFePO ₄ battery
Nominal Operation Voltage	2[V]	1.2V	1.2V	3.7V	3.7V	3.3V
patent protection	No	No	No	No	Yes	Yes
price	1	2	2.4	4	6	>10
Security	Good	Good	Good	bad	Middle	Good
Green product	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Memory effect	No	Yes	Yes	No	No	No
Energy efficiency	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Cycle life	400	500	500	>500	>500	>2000
Charge time	8 Hours	1.5 Hours	4 Hours	2-4 Hours	2-4 Hours	<2 Hours
Self discharge	20% /Month	30% /Month	35% /Month	10% /Month	10% /Month	8% /Month

표 1에서 보는 것과 같이 배터리의 종류에 따른 특성을 비교하였을 때 배터리의 가격을 제외한 나머지 요소를 비교하면 LiFePO 배터리의 효율이 좋다는 것을 확인할 수 있다. 가격적인 부분을 제외한 에너지 효율이 95%, 충전시간 2시간 이내, 2000 사이클 이상의 수명 등 다른 배터리에 비해 특성이 LiFePO 배터리의 특성이 더 좋은 것을 표 1을 통해 확인할 수 있다. 가격적인 부분은 미래적으로 볼 때 배터리의 시장이 활성화 된다면, 리튬계열의 배터리의 가격은 점차 하락할 것으로 예상되므로, 본 논문에서 선정한 LiFePO 배터리의 가격 역시 하락 할 것으로 예상된다. 위의 표를 보면 납축전지의 가격을 1로 보았을 때 LiFePO 배터리의 가격은 10배 이상 정도 이지만 나머지 비교 요소인 자가 방전 효율, 배터리의 수명, 효율 그리고 환경적인 요인들은 다른 배터리들보다 LiFePO 배터리가 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 미래의 기술발달과 배터리 가격의 하락추세와 배터리시장의 활성화를 고려하여 본 연구에서의 BESS의 배터리는 LiFePO 배터리로 선정하여 연구를 진행하였다.

배터리의 경제성을 구성하는 요소 중 중요한 것 중의 하나가 배터리의 수명 특성이다. 배터리의 수명특성 분석에서 DOD와 SOC는 중요한 부분을 차지한다. 아래 식은 방전심도 DOD를 나타내는 수식이다.

$$DOD = \frac{CAP_{dis}}{CAP_{max}} \quad (1)$$

DOD : 방전심도
 CAP_{dis} : 방전용량
 CAP_{max} : 배터리 최대 방전 허용용량

그림 1은 3000Cycles에서 DOD와 SOC의 상태에 따른 수명감소 특성을 나타내는 그림이다[16]. 여기서 온도는 고정이고, DOD가 25, 50, 75, 100[%]에서 SOC값을 각각 변환시켜 수명감소 특성을 얻은 그림이다.

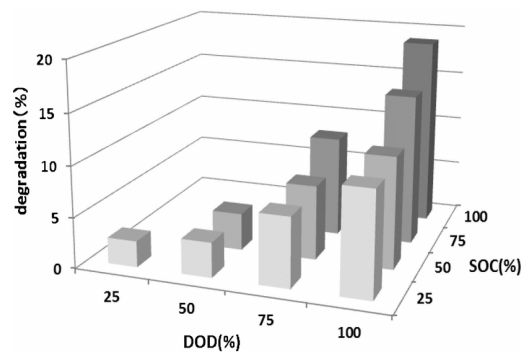


그림 1 3000cycles에서의 수명감소 특성[16]

Fig. 1 Cycle degradation characteristics at 3000 cycles

그림 1인 수명감소 특성에 대한 그래프에서 확인할 수 있듯이 DOD와 SOC가 증가함에 따라 배터리의 수명이 DOD 25%에서는 2.5%감소율을 보이고, DOD 50%에서는 3.5%, DOD 75%에

서는 10%, DOD 100%에서는 20%의 수명 감소율을 보인다. 따라서 DOD와 SOC가 증가함에 따라 수명감소율에 영향을 미친다.

그림 2는 각각의 온도 25, 45, 60 °C에서 Cycle의 변화에 따른 수명을 나타낸 그래프이다[16]. 여기서 결과를 도출하기위한 실험환경온도는 배터리의 온도와 외부의 온도를 합한 값이며 3000cycle을 기준으로 하였다. 그러나 실제 배터리를 제어할 시 공조시스템을 통해 제어가 됨으로 외부온도와는 무관하다. 0Cycle에서는 사용하지 않았으므로 배터리의 수명 감소가 없고, 사용회수의 Cycle이 증가할수록 수명이 더욱 많이 감소됨을 나타내 준다. 배터리의 온도가 25 °C에서 배터리 수명이 25%까지 감소하는 것을 알 수 있고, 45 °C에서는 60%까지 감소했다. 결과적으로 같은 Cycle에서는 온도가 증가할수록 선형적으로 수명이 감소하지는 않지만 수명감소가 더 심해진다는 것을 알 수 있다.

그림 1로부터 DOD가 낮을수록 수명이 좋아지는 것을 알 수 있으며, DOD 20%의 수명이 DOD 100%일 때 비하여 약 20% 정도 낮은 것으로 제시되어 있으므로, 이와 유사한 값으로 수명에 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 이러한 수명의 감소에 의한 경제적 비용에 관하여 그린 수명 곡선은 그림 3에서 제일 아래에 있는 그래프이다.

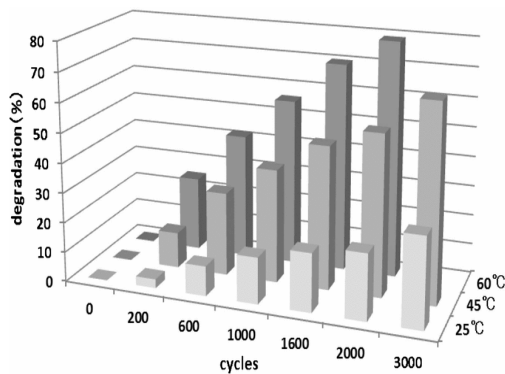


그림 2 DOD 80%에서 수명감소 특성[16].
Fig. 2 Cycle degradation characteristics at 80 % DOD

SOC 40~60[%]를 배터리 사용 구간으로 정하면 SOC 0~100[%]일 경우보다 동일한 용량의 전력을 충전하고 방전하기 위하여 5배의 투자비가 소요된다. 대신에 약 20%의 수명이 길어지는 경제적 이득효과가 있다. 경제성평가를 정확히 하기위하여 투자비는 수명기간을 고려하여 매년 발생하는 균등화비용으로 아래의 식 (2)을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$C_F = C_P \cdot \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \quad (2)$$

- C_P : 설치비용의 현가
- C_F : 매년 발생하는 균등화비용
- L : 수명
- i : 할인율

식 (2)에서 C_P 는 유지비와 인건비를 포함한 배터리 설비 설치비용의 현가를 나타내며 L 은 수명, i 는 할인율로 5%가 적용되었으며, C_F 는 매년 발생하는 균등화 비용을 나타낸다. 이 값이 투자비용을 매년 발생하는 균등화 비용으로 표시한 것이다.

위에서 설명한 리튬 배터리 설치비용 곡선과 수명감소에 따른 비용 곡선을 그린 것이 그림 3에 보여져있다. 그림 3에서 100[%]의 비용은 SOC 100[%]에 해당하는 용량의 배터리 설치비용의 매년 발생하는 균등화 비용에 해당한다. 배터리 설치비용 곡선과 수명감소에 따른 비용 곡선을 동시에 고려하여 합한 곡선이 그림 3에서 제일 위에 있는 곡선이다. 이 곡선에서 SOC 40~60[%]는 DOD 20%에 해당하고, 이 때는 약 500%에 해당하는 경제적비용이 발생한다. SOC 0~100[%]는 DOD 100%에 해당하고, 이 때는 약 120%에 해당하는 경제적비용이 발생한다. 따라서 경제적 효율은 경제적비용에 반비례하므로 경제성을 경제적비용의 역수로 나타낼 수 있다. 이와 같이 하여 경제성을 DOD의 변화에 따라 그래프로 나타낸 것이 그림4에 그려져 있다.

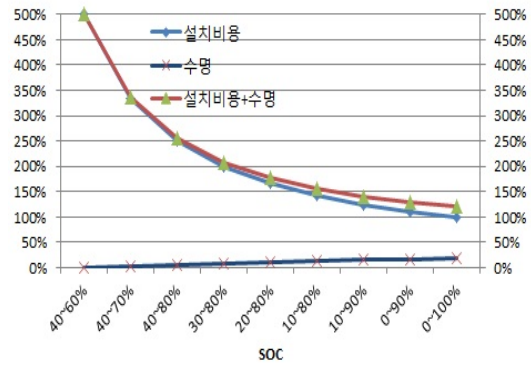


그림 3 리튬 배터리 설치비용 및 수명감소 비용 곡선
Fig. 3 Installation cost and life degradation cost of a lithium-ion battery

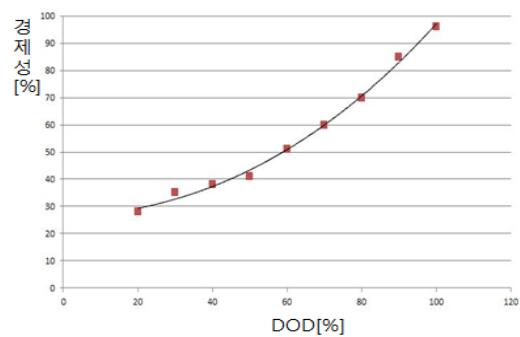


그림 4 DOD 설정 값에 따른 경제성 그래프
Fig. 4 Economics according to the values of DOD

DOD가 100[%]일 때 경제성이 가장 높게 나오고 반대로 20[%]인 경우에는 경제성이 가장 낮게 나온다. 위 그림 4를 최소자승법을 이용하여 3차식으로 수식화 하면 아래와 같은 수식

(3)으로 도출된다.

$$y_1 = 10^{-5}x_1^3 + 0.0054x_1^2 + 0.0398x_1 + 26.238 \quad (3)$$

x_1 : DOD

y_1 : 배터리의 수명감소에 의한 경제적 비용

2.2 BESS의 충방전 전압 특성

본 절에서는 BESS의 충방전 전압 특성을 고려하여 SOC를 설정하는 것에 대하여 검토한다.

그림 5는 적정 SOC를 위해 고려해야하는 SOC별 배터리의 상태를 나타내는 그래프이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 40~80[%]의 SOC 범위에서 동작을 시키는 것이 안정적이라는 것을 표현하고 있다[17]. 80[%] 이상은 배터리 과충전(Overcharge)위험구간이고, 40[%] 이하는 배터리의 수명이 짧은 구간이다. 그렇기 때문에 SOC 범위가 중간 영역인 40~80[%]의 구간에서의 운전이 바람직하다.

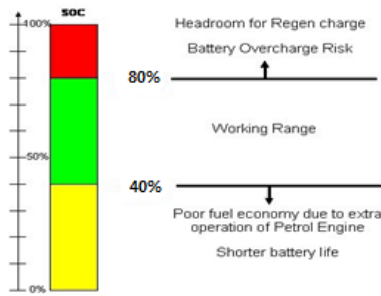


그림 5 SOC별 배터리 상태영역[17].

Fig. 5 State ranges of a battery according to SOC

그림 6은 SOC와 충방전시 전압의 관계 곡선을 나타낸다[18]. 그림 6에서 위의 그래프는 충전 그래프를 나타내고, 아래 그래프는 방전 그래프를 나타낸다. 그림 6을 보면 40~60[%]의 구간은 전압이 다른 구간에 비해 변화가 작은 것을 볼 수 있다. 이러한 구간에서처럼 충전과 방전이 큰 전압변동 없이 안정적으로 변화가 작은 구간은 충방전 출력 전압의 관점에서 양호한 구간으로 생각할 수 있다. 또, 충방전 시의 전압크기가 어느 수준이하로 떨어지면 충방전 출력 전압의 관점에서 배터리의 성능이 저하되는 것으로 판단할 수 있다. 0~100[%]의 SOC 구간은 배터리 출력 전압이 크게 변동하므로 충방전 출력 전압의 관점에서 충방전 전압의 품질이 가장 낮다고 볼 수 있고, DOD가 작은 SOC 50% 근처의 작은 변화폭의 구간은 충방전 전압의 품질이 가장 높다고 생각할 수 있다. 이를 수량화하기 위한 배터리의 충방전 출력전압 품질지수(QV: Quality of Voltage)를 아래의 수식 (4)와 같이 제안한다.

$$QV = \frac{V_{\min}}{V_R} e^{-\alpha d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

V_{\min} : 충방전의 최저전압

V_R : 배터리의 정격전압

α : 적용 계수

d : 충방전시 최대전압과 최저전압의 차이

e : 자연대수

V_{\min} 은 SOC범위 내의 충·방전시의 최저전압을 나타내며 V_R 은 배터리의 정격전압으로서 SOC 50%시의 전압이다. d 는 충·방전 SOC 범위 내에서 최대전압과 최저전압의 차이를 나타내고 α 는 적용상수로서 출력전압의 변화에 따라 인정해 주고자하는 전압품질 수준을 고려하여 조정해 줄 수 있다. 여기서는 10을 적용하였다.

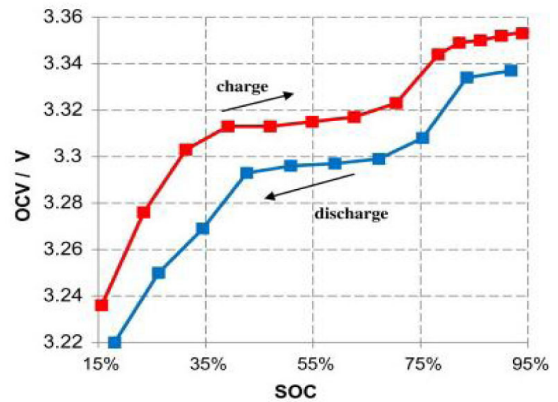


그림 6 리튬배터리의 충·방전시 SOC와 전압 관계 곡선[18]

Fig. 6 Relationship between SOC and output voltage during charge/discharge operation of a lithium battery

이 식 (4)에서 DOD가 0%인 SOC 50%에서의 값은 $QV=100$ [%]가 되어 가장 높은 값이 되고, DOD가 증가하면서 SOC 동작범위가 30%~70%, 20%~80% 등으로 점차 증가하면서 QV 는 점차 낮은 값으로 떨어진다. 최악의 경우는 QV 가 0의 값 근처로 떨어질 수 있다. 위의 식을 이용하여 아래 그림 7에서와 같은 그래프를 얻을 수 있다.

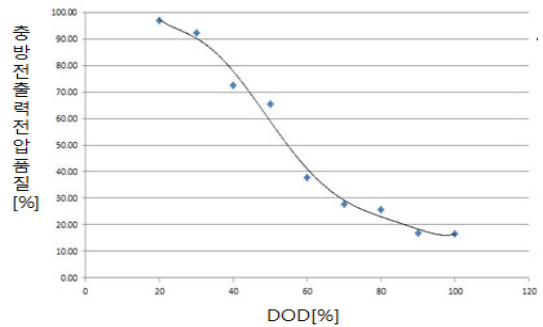


그림 7 DOD 설정 값에 따른 배터리 충방전 출력 전압 품질 변화

Fig. 7 Variation of charge/discharge output voltage quality of the battery according to DOD

그림 7은 DOD 설정 값에 따른 총방전 출력 전압 품질지수(QV)의 변화이다. 그림 6에서 식 (4)를 적용하여 그래프에 표시한 것이다. DOD가 20[%]일 때, 품질이 가장 좋은 100[%]를 나타내며 50[%]일 때는 총방전 출력 전압 품질이 45[%]이다. 마지막으로 100[%]일 때, 15[%]의 총방전 출력 전압 품질을 나타낸다. 위 그림 7에 표시한 점들에 대하여 최소자승법을 사용하여 5차식으로 수식화 하면 아래와 같은 수식 (5)로 표현된다.

$$y = -6.0 \times 10^{-8}x^5 + 1.0 \times 10^{-5}x^4 - 5.0 \times 10^{-5}x^3 - 0.0842x^2 + 2.9742x + 69.295 \quad (5)$$

x : DOD

y : 배터리의 총방전출력전압품질

2.3 수명과 투자비를 고려한 경제성과 총방전 출력전압 품질특성을 동시에 고려한 경우

2.3.1 수명에 따른 경제성과 총방전 출력 전압 품질 고려

다음 그림은 설치비용 및 수명 그래프를 설치비용과 수명을 고려하여 분석한 그래프이다.

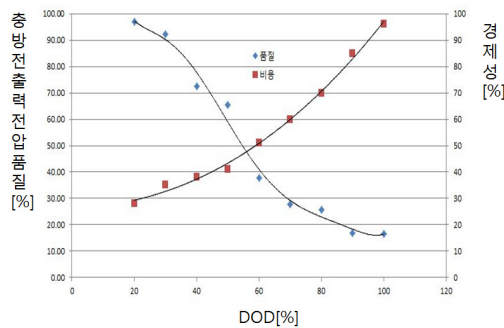


그림 8 적정 SOC를 위한 총방전 출력 전압 품질과 경제성 그래프
Fig. 8 Graphs of charge/discharge output voltage quality and economics for a proper SOC

BESS수명을 15년, 배터리 수명을 풀 충·방전시 3000사이클이라고 가정하였고, 그림 8에서 볼 수 있듯이 품질 그래프와 경제성을 나타내는 그래프에 교점인 DOD 56.12[%]부분에서 가장 효율이 좋은 것으로 설정되었다. 마찬가지로 배터리의 온도는 낮을수록 효율이 좋으며, 논문 등으로 조사한 결과 온도는 가장 낮은 온도인 25[°C]에서 수명 감소 영향을 가장 작게 받았다. 위 결과들을 바탕으로 다음 표 2와 같은 BESS의 조건을 얻었다.

표 2 BESS 적정 조건

Table 2 Proper conditions of BESS operation

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	21.94 ~ 78.06[%]	56.12[%]

2.3.2 경제성에 무게 값(weighting)을 준 경우

다음은 그림 8 적정 SOC를 위한 총방전 출력 전압 품질과 경제성 관련 분석 그래프에서 수명을 고려한 경제성에 2배의 무게 값을 준 그래프이다.

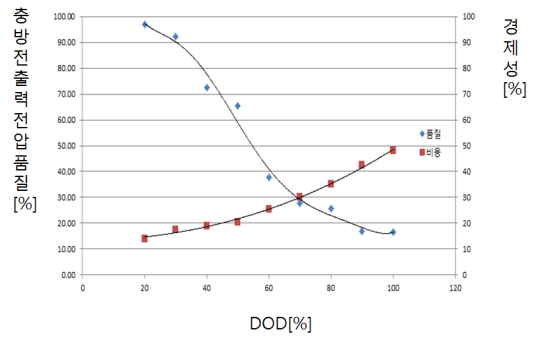


그림 9 경제성에 2배의 무게 값을 준 그래프

Fig. 9 Graphs in the case of applying 2 times weighting to economics

수명에 따른 경제성에 2배의 무게 값을 주게 되면 그림 9의 교점은 그림 8에 비하여 경제성과 품질 그래프의 교점이 69.1[%]로 오른쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다.

표 3 BESS 적정 조건

Table 3 Proper conditions of BESS operation in this case

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	15.4 ~ 84.5[%]	69.1[%]

다음은 그림 8은 적정 SOC를 위한 총방전 출력 전압 품질과 경제성 관련 분석 그래프에서 수명을 고려한 경제성에 4배의 무게 값을 준 그래프이다.

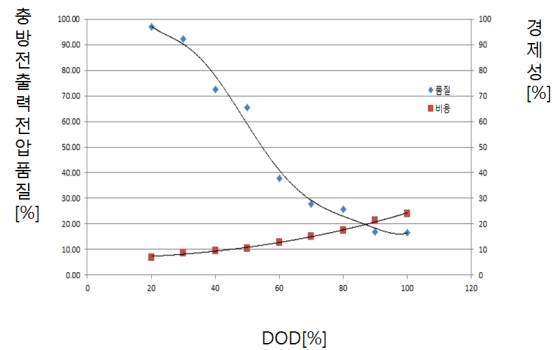


그림 10 경제성에 4배의 무게 값을 준 그래프

Fig. 10 Graphs in the case of applying 4 times weighting to economics

수명에 따른 경제성에 4배의 무게 값을 주게 되면 그림 10의 교점은 그림 9에 비하여 경제성과 품질 그래프의 교점이 87[%]로 더 오른쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다.

표 4 BESS 적정 조건

Table 4 Proper conditions of BESS operation in this case

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	6.5 ~ 93.5[%]	87[%]

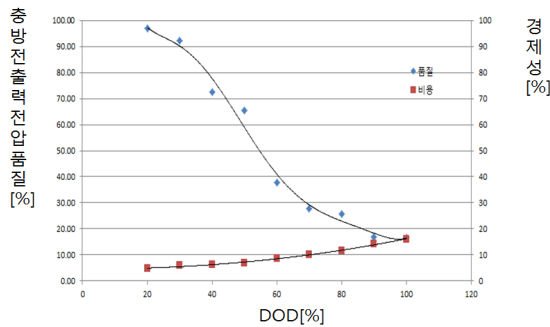


그림 11 경제성에 6배의 무게 값을 준 그래프

Fig. 11 Graphs in the case of applying 6 times weighting to economics

수명에 따른 경제성에 6배의 무게 값을 주게 되면 그림 11의 교점은 DOD 100[%]에서 발생하게 된다. 따라서 경제성에 주는 6배의 무게 값이 교점이 발생하는 범위 내에서 경제성에 가할 수 있는 최대의 무게 값이라고 할 수 있다.

표 5 BESS 적정 조건

Table 5 Proper conditions of BESS operation in this case

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	0 ~ 100[%]	100[%]

2.3.3 배터리 충방전 출력 전압 품질에 무게 값을 준 경우

다음은 그림 8 적정 SOC를 위한 충방전 출력 전압 품질과 경제성 관련 분석 그래프에서 충방전 출력 전압 품질에 2배의 무게 값을 준 그래프이다.

배터리 충방전 전압 품질에 2배의 무게 값을 주게 되면 그림 12의 교점은 그림 8에 비하여 경제성과 품질 그래프의 교점이 41[%]로 왼쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다.

다음은 그림 8 적정 SOC를 위한 충방전 출력 전압 품질과 경제성 관련 분석 그래프에서 충방전 출력 전압 품질에 3배의 무게 값을 준 그래프이다.

배터리 충방전 전압 품질에 3배의 무게 값을 주게 되면 그림 13의 교점은 그림 12에 비하여 경제성과 품질 그래프의 교점이

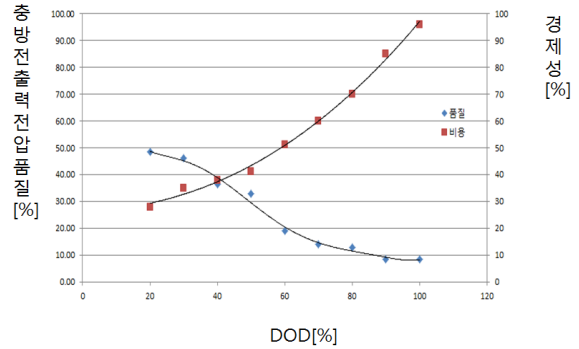


그림 12 출력전압 품질에 2배의 무게 값을 준 그래프

Fig. 12 Graphs in the case of applying 2 times weighting to output voltage quality

표 6 BESS 적정 조건

Table 6 Proper conditions of BESS operation in this case

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	29.5 ~ 70.5[%]	41[%]

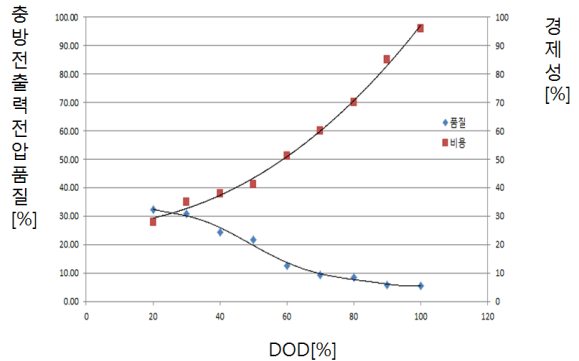


그림 13 출력 전압 품질에 3배의 무게 값을 준 그래프

Fig. 13 Graphs in the case of applying 3 times weighting to output voltage quality

26[%]로 더 왼쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다. 결국 무게 값을 경제성에 더 가하면 DOD가 더 커지고, 무게 값을 배터리 충방전 전압 품질에 더 가하면 DOD가 더 작아지게 됨을 알 수 있다.

표 7 BESS 적정 조건

Table 7 Proper conditions of BESS operation in this case

배터리 온도	적정 SOC 운영영역	적정 DOD 지점
25[°C]	37 ~ 63[%]	26[%]

3. 결 론

본 논문은 최적 SOC를 도출하기 위해 배터리의 전압과 수명 및 투자비 특성을 품질과 경제성 관점에서 분석하여 적정 결과를 도출하는 기법을 제시하였다. 리튬이온 배터리의 SOC의 변화에 따른 리튬이온 배터리의 충방전 출력전압과 리튬이온 배터리의 SOC의 변화가 수명과 투자비에 미치는 영향을 분석하였다. 이 분석을 토대로 리튬이온 배터리의 충방전 출력전압 관점에서의 품질과 배터리의 수명 및 투자비 관점에서의 경제성을 DOD(Depth of Discharge)에 관한 수식으로 유도하였다. 제안된 이 수식들을 사용하여 이러한 상이한 특성을 동시에 고려할 시의 SOC의 적정 운전점을 설정하는 기법을 제시하였다. 현재 입수 가능한 리튬이온 배터리의 특성에 근거하여 출력전압 관점에서의 품질과 배터리의 수명 및 투자비 관점에서의 경제성이라는 상이한 특성에 대하여 각각 가중치를 변화시켜 가면서 그 영향을 분석하고, 각 경우의 배터리의 SOC(State of Charge)의 적정운전 영역을 제시하였다.

본 연구의 접근 방식에 대한 더 깊은 연구를 통하여 지금 주요 이슈가 되고 있는 배터리의 효율적인 운영에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2013년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임.
(과제번호: R13DA10)

References

- [1] R. Lasseter, A. Akh, C. Marnay, J. Stevens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Sakis Meliopoulos, R. Yinger and J. eto, White Paper on Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS Microgrid Concept, Office of Power Technologies of the US Department of Energy, Apr. 2002.
- [2] Pike Research[Online]. Available: <http://www.navigantresearch.com>.
- [3] W. Gu, Z. Wu, and X. Yu, "Microgrid Economic Optimal Operation of the Combined Heat and Power System with Renewable Energy," Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Jul. 2010.
- [4] C. M. Colson, and M. H. Nehrir, "A Review of Challenges to Real-Time Power Management of Microgrids," Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Jul. 2009.
- [5] H.-M. Kim, and T. Kinoshita, "A Multiagent System for Microgrid Operation in the Grid-interconnected Mode," Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 246-254, 2010.
- [6] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, and G. G. Soma, "Optimal Participation of a Microgrid to the Energy Market with an Intelligent EMS," Proceedings of 2005 IPEC Power Engineering, Vol. 2, pp. 663-668, Dec. 2005.
- [7] Farhangi, H., "The Path of the Smart Grid", IEEE Power Energy Mag., Vol. 8, No. 1, pp. 18-28, Jan./Feb. 2010.
- [8] Ji-Hye Lee, Byung-Ha Lee, "Optimal Microgrid Operation Considering Fuel Cell and Combined Heat and Power Generation" Trans. KIEE, Vol.62, No. 5, pp.596-603. 2013
- [9] Seong Heum Sim, Jin Hyuk Gang, Dawn An, Sun Il Kim, Jin Young Kim and Joo Ho Choi "Remaining Useful Life Prediction Of Li-Ion Battery Based On Charge Voltage Characteristics", Trans. Korean Soc.Mech.Eng.B, Vol.37, No.4, pp.313-322. 2013
- [10] Goebel, K., Saha, B., Saxena, A., Celaya, J. R. and Christophersen, J. P., "Prognostics in Battery Health Management," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, pp. 33~40, 2008.
- [11] Seong Heum Sim, "Remaining Useful Life Prediction of Li-Ion Battery Based on Charge Voltage Characteristics", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 37, No. 4, pp. 313-322, 2013
- [12] Zhang, J. and Lee, J., "A Review on Prognostics and Health Monitoring of Li-Ion Battery," Journal of Power Sources, Vol. 196, No. 15, pp. 6007-6014, 2011.
- [13] Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L. and Pecht, M., "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles," Energies, Vol. 4, No. 11, pp. 1840-1857, 2011.
- [14] Madeleine Ecker, "Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data", Journal of Power Sources, pp.248-257, 2012.
- [15] Chih-Chiang Hua, "Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery", The 2010 International Power Electronics Conference, pp.1478~1483, 2010.
- [16] 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.
- [17] Electropaedia. "Battery and Energy Technologies", <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [18] Languang Lua, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles",

Journal of Power Sources, Volume 226, pp.272 - 288,
March 2013.

저 자 소 개



윤 대 식(Dae-Sik Yoon)

1987년 8월 1일생. 2013년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).



추 대 혁(Dae-Hyeok Choo)

1987년 3월 18일생. 2013년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).



기 병 국(Byung-Kook Ki)

1990년 2월 25일생. 2015년 인천대학교 전기공학과 졸업.



김 준 석(Joohn-sheok Kim)

1988년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.



이 병 하(Byung Ha Lee)

1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수. 2007년~2008년 University of Illinois (Urbana-Champaign) 방문교수.

Tel : 032-835-8437

E-mail : bhlee@inu.ac.kr



채 우 규(Woo-Ku Chae)

1977년 4월 22일생. 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충북대학교 전기공학과 석사학위 취득, 2014년 충북대학교 전기공학과 박사과정 수료. 2004년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5986, Fax : 042-865-5829

E-mail : wkchae@kepco.co.kr