

# 마이크로그리드에서 SOC균형을 고려한 ESS의 충·방전 전력배분 방법

## Power Allocation Method for Multiple ESS Control Considering SOC Balancing in Microgrids

이 상 욱\* · 박 준 호\*

(Sang-Wook Lee · Juneho Park)

**Abstract** - In this paper, multiple ESS(Energy Storage System) control strategy for microgrids is presented. Installation of ESS becomes mandatory when microgrids are used to supply high quality power to the loads. The one of main functions of the ESS is to maintain power balance. However ESS has limitation of its capacity and instantaneous injecting power. Power allocation method based on SOC(State Of Charge) of each ESS is proposed. P-Q control is employed as the basic control strategy for the distributed ESSs. By using the proposed method, the coefficients in the conventional P-Q control method are modified. The ESSs with higher SOC inject more active power, while those with lower SOC inject less, leading to more balanced SOC levels among the ESSs. The proposed method is demonstrated by simulation using PSCAD/EMTDC.

**Key Words** : SOC balancing, Microgrids, Multiple ESS, Power allocation

### 1. 서 론

신재생에너지 기반의 마이크로그리드는 신재생에너지를 활용함으로써 화석연료 사용을 줄일 수 있다. 마이크로그리드 운영은 계통 연계형과 독립 운전모드로 구분되며, 마이크로그리드의 운용과 제어에 관한 연구가 최근 활발하게 발표되고 있다[1][2][3].

마이크로그리드에서 ESS는 전기요금에 저렴할 때 에너지를 저장하여 전기요금이 비싼 피크부하 시점에 방전하는 부하이전(load-shifting)에 활용될 수 있으며, 전력사용이 최대일 때 계통으로부터 송전 받는 전력을 줄일 수 있기 때문에 송전선 등에 과부하로 발생할 수 있는 사고를 예방하는 데 사용할 수도 있다. 계통 연계형 마이크로그리드는 전력 공급의 부족분을 전력 계통으로부터 보상받을 수 있지만, 독립 운전모드의 경우에는 신재생에너지원의 간헐적 출력특성 때문에 전력공급량의 부족 또는 잉여 시에 안정적인 전력수급의 방법으로 ESS가 활용된다[4][5][6].

ESS는 슈퍼캐패시터, 배터리, 플라이휠, 압축공기, 양수저장장치 등이 있는데 그 특성이 다르고 각각의 장·단점을 갖고 있다[7][8]. 마이크로그리드의 ESS는 전체 용량이 크기 때문에 BESS, 울트라캡, 플라이휠, 울트라캡과 배터리의 혼합저장장치

(hybrid energy storage)[9] 등이 사용되며, 효율적인 계통운영을 위하여 여러 대의 서로 다른 용량을 가진 ESS를 설치하였을 경우에 각각의 ESS를 어떻게 제어해야 할 것인지 하는 문제가 존재한다. 이 문제를 해결하기 위해서는 여러 대의 ESS의 SOC(State Of Charge) 균형을 고려하여 제어해야 할 필요가 있고, 사용가능한 ESS 수가 최대가 되어야 최대 순시 충전/방전 전력의 크기를 유지할 수 있으며 ESS 수명 특성에 악영향을 끼칠 수 있는 과방전, 과충전을 예방할 수 있다.

병행 사용되는 여러 대의 ESS를 제어하는 방법으로 여러 대의 ESS에 순서를 정하여 순차적으로 충/방전하는 방법[10][11], 최대 충전 시의 용량을 고려하여 ESS 출력을 분담하는 방법과 드롭 계수를 활용한 연구가 발표되었다[7][12]. 또, 중앙제어가 아닌 분산제어의 일종으로 ESS의 SOC를 고려하기 위해 드롭 계수에 SOC를 나누는 계수를 활용하여 여러 대의 ESS를 제어하는 방식이 제안되기도 했다[13]. 그런데, 드롭 계수에 SOC를 나누면 SOC에 비례하여 ESS의 출력이 조절되는 장점이 있지만, 전체 ESS출력의 합이 줄어들게 되는 문제점이 있다. 또한 방전 시에만 적용되어 충전을 할 경우에는 다른 방법이 필요하며 각 ESS마다 다른 SOC 운전 범위를 갖고 있는 경우는 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 이런 점들을 개선할 수 있도록 ESS 출력을 분배하는 방법을 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 본 논문에서는 마이크로그리드에서 다양한 용량의 ESS를 사용할 때, 사용 효율과 수명 사이클의 향상을 위해 ESS의 용량과 SOC를 동시에 고려한 출력 제어 방법을 제안하였고 여러 대의 ESS의 SOC 균형(balance)을 유지하도록 하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션 하여 제안한 방법이 마이크로그리드의 EMS 설계 시, 다수의 ESS를 운용하기 위한 ESS제어 알고리즘에 활용될 수 있음을 보였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.  
E-mail: parkjh@pusan.ac.kr

\* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

Received : January 18, 2017; Accepted : January 24, 2017

## 2. ESS 수명 사이클 특성

### 2.1 SOC(State Of Charge: 잔존용량)

$$SOC = \frac{\text{잔존용량}}{\text{최대용량}} \times 100\% \quad (1)$$

식 (1)과 같이 SOC는 ESS에 충전된 잔존 용량을 백분율로 나타낸 것이다[14]. ESS는 수명 사이클에 한계가 있고, 사용 횟수가 많아질수록 전극이 열화 되어 제 기능을 발휘하지 못한다. ESS의 수명 사이클을 결정하는 여러 요인 중 SOC와 DOD(방전심도, Depth Of Discharge)가 가장 큰 비중을 차지한다. ESS가 과충전이 되면 안정성이 낮고, 부족충전이 되면 수명이 급격하게 감소한다[15]. 본 논문에서는 SOC가 20%~80% 범위에서 동작하도록 시뮬레이션 하였지만 실제로는 여러 ESS의 SOC 동작범위가 다를 수 있으므로 마이크로그리드에서 개별 ESS가 분담해야 할 충·방전 전력을 각각 다른 비율로 충·방전할 필요가 있다.

### 2.2 DOD(Depth Of Discharge: 방전심도)

$$DOD = \frac{CAP_{dis} (\text{최대 방전허용용량})}{CAP_{max} (\text{최대방전용량})} \quad (2)$$

식 (2)과 같이 DOD는 ESS의 잔존용량을 표현하는 다른 방법이다. 방전심도는 잔존용량과 반대 개념으로 방전심도가 증가할수록 잔존용량은 감소한다[15]. 또한 ESS는 DOD를 큰 값으로 운전하면 수명 사이클이 낮아진다[15][16]. 따라서 ESS를 SOC 운전 범위 내에서 운용하도록 해야 하고, 방전심도 DOD가 깊어질수록 ESS의 수명이 줄어들기 때문에 모든 ESS를 최대한 충전이 많이 되어 있는 상태로 유지하는 것이 수명적인 측면과 계통의 공급에너지 여유측면에서 유리하다. 이런 점을 고려하여 여러 대의 ESS를 사용할 경우에 SOC 균형을 맞추도록 제어하는 방법이 연구되어 왔다.

## 3. ESS 제어 알고리즘

여러 대의 ESS를 제어할 때 SOC의 크기에 따라 우선순위를 두고 방전 시에는 SOC가 높은 ESS, 충전 시에는 SOC가 낮은 ESS부터 사용하는 순차(Cascade)방식으로 운영하는 연구가 발표되었다[10][11]. 하지만 여러 대의 ESS를 동시에 사용하지 않으면 각 ESS의 충/방전 순시 전력밀도가 높아져 ESS 수명에 악영향을 미친다. 또한 높은 전력밀도가 필요할 때 여러 개의 ESS가 동시에 출력을 내지 못하면 출력 크기가 부족한 경우가 생길 수도 있다(가용 제어용량 불충분). 따라서 모든 ESS가 사용가능하게 유지하기 위하여 각 ESS의 SOC 균형을 맞춰지도록 제어할 필요가 있다. ESS를 동시에 사용하면서 SOC가 낮은 ESS는 상대적으로 적게 방전, 많이 충전하고, SOC가 큰 ESS는 상대적으로 많이 방전하고 적게 충전해야 한다. 참고 문헌 [7][13]에서는 드

롭 제어 방식을 도입하여 ESS 방전 시 SOC 균형을 맞추기 위해 드롭 계수에 SOC를 나누기도 하였다. 드롭계수 제어는 로컬제어의 일종으로 분산전원간 통신 없이 제어가 가능하다는 장점이 있으나, 여러 대의 ESS가 설치된 경우 다른 ESS의 SOC를 고려할 수 없다는 단점이 있다. 반면 본 논문에서 적용한 P-Q 제어는 중앙제어를 통해 여러 ESS의 출력을 제어하는 것으로 모든 ESS의 상태와 SOC를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 모든 ESS의 상태를 고려하고, ESS 출력 분배에 초점을 맞추기 위해 드롭 특성 제어가 아닌 P-Q 제어 방식을 사용하였다. 따라서 본 논문에서는 모든 ESS의 SOC를 고려하여 ESS 출력 분배를 하되 ESS 전체 출력의 크기는 유지할 수 있고 다른 SOC 범위를 갖는 ESS도 고려할 수 있는 방법을 제안한다.

### 3.1 P-Q 제어

마이크로그리드 내에서 급격한 부하 변동, 신재생에너지 출력의 급변, 디젤발전기 출력의 한계, 디젤발전기의 고장 또는 정비 등으로 부하에서 필요한 전력수요와 공급전력에 차이가 생길 때 부족한 유효전력  $\Delta P$ 를 ESS로 공급할 수 있다. 이 경우 여러 대의 ESS가  $\Delta P$ 를 분담하여 출력을 내야 한다. ESS 최대용량에 비례하여 분배계수를  $m_i$ (여기서,  $i$ 는  $i$ 번째 ESS를 뜻한다.)로 둔다면,  $m_i$ 는 각 ESS의 용량이 같으면 모든 분배계수의 값이 같지만 용량이 다를 경우에는 용량에 비례하여  $m_i$ 가 결정된다[17]. 예를 들어서 두 대의 ESS 용량이 같다면  $m_1 = m_2$ 이고 용량의 비율이 2:1이라면 분배계수도 2:1이 된다. 최대용량에 비례하여 ESS의 출력을 분배하는 방법은 ESS의 용량을 고려하여 출력을 달리할 수 있다는 장점이 있지만 이것은 모든 ESS가 최대 충전되어있거나 모든 ESS의 SOC 값이 같을 때에는 문제가 없지만, 각 ESS의 SOC가 다른 경우에는 이 방법은 여러 ESS의 SOC 균형을 유지하지 못하게 된다[18].

### 3.2 방전 모드

$\Delta P$ 를 ESS가 보상할 때 ESS 최대용량만을 고려하는 기존의 방법은 식 (3)과 같은 분배 방식을 사용할 수 있다.

$$P_{ESS_i} = m_i \cdot \Delta P \quad (3)$$

여기서  $m_i$ 는 ESS가 최대로 충전되어있는 경우로 가정하고, 최대용량에 비례하여 계산한다. 예를 들어 두 대의 ESS의 용량이 3 kWh, 1 kWh라면  $m_1:m_2 = 0.75:0.25$ 로 둘 수 있다.  $\Delta P$ 가 +이면 ESS가 방전하고, -이면 ESS는 충전을 의미한다. 또,  $ESS_i$ 는  $i$ 번째 ESS를 의미하며,  $P_{ESS_i}$ 는  $i$ 번째 ESS의 방전 전력을 나타낸다. 식 (3)은 ESS의 SOC가 전혀 고려되지 않기 때문에, SOC를 고려하여 ESS 출력을 식 (4)와 같이 분배하게 되면 SOC와 최대용량에 비례하여 ESS의 출력이 배분되지만 ESS 출력의 합이  $\Delta P$  보다 작아지게 된다.

$$P_{ESS_i} = m_i (SOC_i) \cdot \Delta P \quad (4)$$

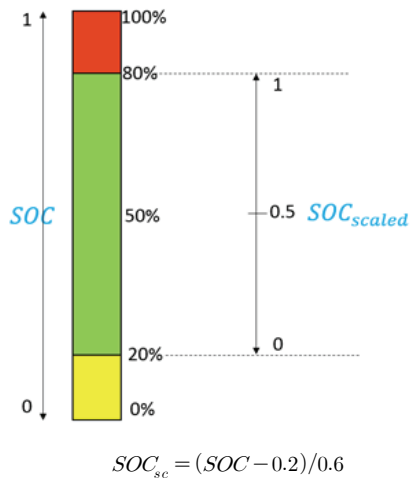


그림 1 스케일된 SOC  
Fig. 1 Scaled SOC

여기서  $SOC_i$ 는  $i$ 번째 ESS의 SOC를 의미한다. 따라서 본 논문에서는 ESS의 SOC 뿐만 아니라 ESS의 최대 충전용량을 함께 고려하여 분배 계수의 총합이 1이 되도록 식(5)로 배분하는 방식을 제안한다.

$$P_{ESS_i} = \frac{m_i(SOC_i)}{\sum_{i=1}^{Num} m_i(SOC_i)} \cdot \Delta P \quad (5)$$

2장에서 기술한 바와 같이 SOC가 20~80% 범위에서 동작하도록 제한하기 위하여 SOC의 스케일을 조정한다. 그림 1은 SOC의 20%~80%의 범위를 0~1 범위로 스케일된  $SOC_{sc}$ 를 나타낸다. 식 (5)에서  $SOC_i$ 를 스케일된  $SOC_{sc_i}$ 를 사용하면 식 (6)으로 표현된다.

$$P_{ESS_i} = \frac{m_i(SOC_{sc_i})}{\sum_{i=1}^{Num} m_i(SOC_{sc_i})} \cdot \Delta P \quad (6)$$

여기서, Num은 ESS의 갯수이며,  $SOC_{sc_i}$ 는  $i$ 번째 ESS의 스케일된 SOC를 나타낸다. 본 논문에서는 SOC 동작범위를 20~80%로 가정하였으며, ESS 제작업체에서 제공하는 ESS 특성에 따라 10%~90%로도 설정할 수 있다.

SOC 대신 스케일된  $SOC_{sc}$ 를 사용하게 되면, SOC가 하한인 20%가 되었을 때 “0”의 출력을 내게 된다. 즉, SOC=0.2일 때  $SOC_{sc}=0$ 이 된다. 식 (6)의 방식으로 ESS의 방전전력을 배분하면 각 ESS의 방전가능용량에 따라 출력이 달리 배분되지만, ESS간의 SOC 균형을 맞추는 시간을 줄이기 위하여 SOC에 더욱 비중을 두어 ESS의 출력 식을 바꾸면 아래 식 (7)과 같이  $SOC_{sc}$ 를  $n$ 차의 지수로 곱하여 SOC 를 계산한다.

$$P_{ESS_i} = \frac{m_i(SOC_{sc_i})^n}{\sum_{i=1}^{Num} m_i(SOC_{sc_i})^n} \cdot \Delta P \quad (7)$$

식 (7)에서  $\Delta P$ 의 분배방식은 지수  $n(n=0, 1, 2, 3, \dots)$  정수)이 커질수록 ESS의 최대용량보다 SOC에 더 높은 가중치가 주어지는 방식으로 분배 계수가 결정되고, ESS간 SOC 균형이 빠르게 맞추어 진다. 예를 들어, 두 ESS의  $SOC_{sc}$ 가 각각 0.4, 0.8 인 경우  $(SOC_{sc})^2$ 은 0.16, 0.64 가 되므로  $n=1$ 인 경우보다  $n=2$ 인 경우가 SOC에 더 높은 가중치를 주는 방식으로 분배 계수가 정해진다. 따라서 방전 시 SOC가 높은 ESS의 출력은 더 크게, SOC가 낮은 ESS는 상대적으로 더 낮은 출력을 내게 된다.

### 3.3 충전 모드

신재생에너지원의 공급전력이 부하보다 큰 경우, 부하에 비해 발전량이 더 많을 경우 ESS는 충전을 하여 잉여 전력을 저장한다. 이 때  $\Delta P$ 는 음수이며, 충전할 때 SOC가 낮은 ESS가 더 많은 전력을 충전하고, SOC가 높은 ESS는 상대적으로 적은 에너지를 충전해야 ESS간 SOC 균형을 맞출 수 있다.

식 (7)에서  $(SOC_{sc})^n$ 을  $(1 - SOC_{sc})^n$ 으로 대체하면 식 (8)과 같이 여러 ESS의 충전전력 배분식을 얻을 수 있다.

$$P_{ESS_i} = \frac{m_i(1 - SOC_{sc_i})^n}{\sum_{i=1}^{Num} m_i(1 - SOC_{sc_i})^n} \cdot \Delta P \quad (8)$$

SOC의 스케일을 변화시켜  $SOC_{sc}$ 를 사용하였으므로 SOC가 0.8이 되면  $(1 - SOC_{sc})^n$ 은 “0”이 되므로 충전을 멈추게 되고, ESS의 동작 범위가 SOC 80%를 넘지 않게 된다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

ESS의 용량, SOC,  $\Delta P$ 를 표 1과 같이 3가지 경우로 설정하

표 1 3가지 경우의 시뮬레이션 데이터

Table 1 Simulation data for 3 cases

사례 연구	ESS 용량 (kWh)	$\Delta P$ (kW)	초기 SOC(%)
경우 1	$ESS_1 = 10kWh,$ $ESS_2 = 10kWh,$ $ESS_3 = 10kWh$	$\Delta P = 30kW$	$SOC_1 = 40%,$ $SOC_2 = 60%,$ $SOC_3 = 70%$
경우 2	$ESS_1 = 20kWh,$ $ESS_2 = 10kWh,$ $ESS_3 = 5kWh$	$\Delta P = -30kW$ $\Delta P = -30kW$	$SOC_1 = 50%,$ $SOC_2 = 60%,$ $SOC_3 = 30%$
경우 3	$ESS_1 = 20kWh,$ $ESS_2 = 10kWh,$ $ESS_3 = 5kWh$	$\Delta P = 30 \cdot \sin(t) kW$	$SOC_1 = 50%,$ $SOC_2 = 60%,$ $SOC_3 = 70%$

였으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 분석하였다. 마이크로그리드에서 ESS에 할당된 총·방전 전력  $\Delta P$  는 약 1시간 동안 충전 또는 방전할 수 있는 수준으로 선정하였고, 초기 SOC가 다른 경우, ESS의 용량이 다른 경우, 할당된 총·방전 전력이 일정한 경우와 변화하는 경우를 다양하게 설정하여 시뮬레이션 하였다.

#### 4.1 경우 1(방전)

ESS 용량이 10kWh로 동일하므로  $m_i$  는  $m_1 = m_2 = m_3 = 0.33$  이다. ESS가 계통에  $\Delta P = 30kW$ 를 공급해야 하는 경우, 식 (7)의 방법으로  $n=0,1,2,3$ 일 때 시뮬레이션 하였다.

그림 2는  $n=0$ 인 경우, 1,500초 동안 시뮬레이션 한 결과이다. 식 (7)은 식 (9)과 같이 표현되므로  $P_{ESS_1} = P_{ESS_2} = P_{ESS_3} = 0.33 \cdot \Delta P$  가 된다. 따라서 3대의 ESS의 출력은 각각 10kW로 같다.

$$P_{ESS_i} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{Num} m_i} \cdot \Delta P \quad (9)$$

그림 2의 SOC를 보면 3대의 ESS가 같은 출력을 내기 때문에 시간에 따른 변화율이 같으며, SOC가 고려되지 않아서 1,300초가 지났을 때 SOC 초기 값이 40%였던  $ESS_1$ 이 SOC 20% 이하가 되는 것을 볼 수 있다.  $n=0$  즉, SOC를 고려하지 않은 여러대의 ESS 제어는 문제가 있음을 보여준다. 그림 2에서 SOC Unbalance는 식 (10)과 같이 ESS간 SOC 크기 차이를 평균하여 나타낸 것이다.

$$(|SOC_1 - SOC_2| + |SOC_2 - SOC_3| + |SOC_3 - SOC_1|) / 3 \quad (10)$$

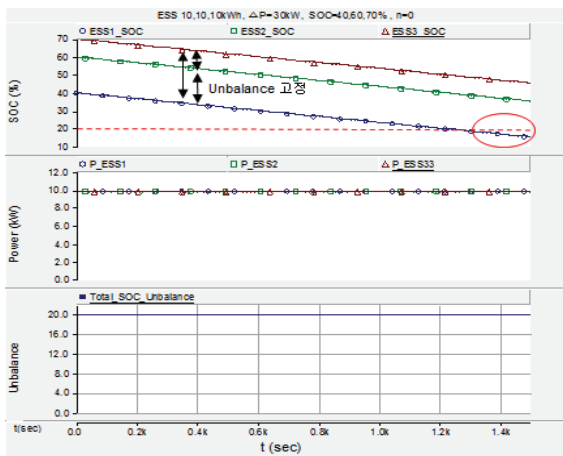


그림 2 경우1의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 ( $n=0$ )  
**Fig. 2** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 1( $n=0$ )

그림 3은  $n=1$ 인 경우로서 SOC를 고려하여 방전 비율이 결정되었다. 참고 문헌 [17]에서 ESS간 전력 분배 계수를 구하는 식 (11)과 비교해 보면,

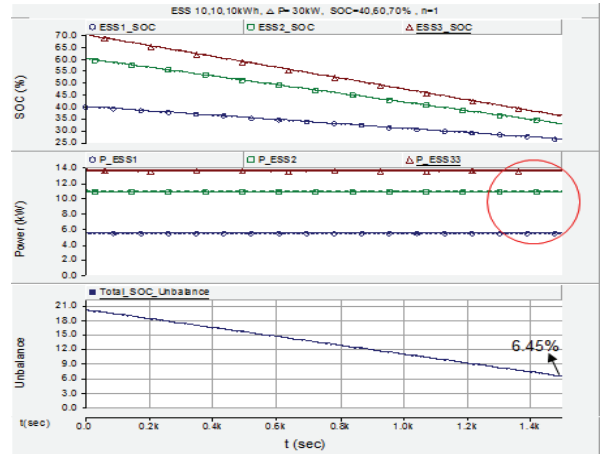


그림 3 경우1의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 ( $n=1$ )  
**Fig. 3** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 1 ( $n=1$ )

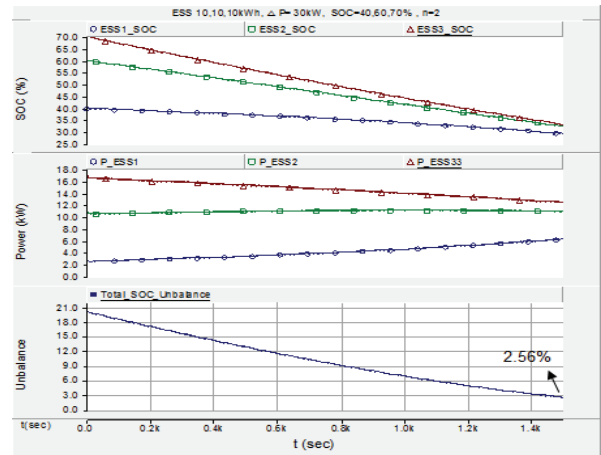


그림 4 경우1의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 ( $n=2$ )  
**Fig. 4** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 1( $n=2$ )

$$pf_i = \frac{ESS_i - P_{Mar}}{Total\_P_{Mar}} \quad (11)$$

$pf_i$ 는  $i$ 번째 ESS의 출력 분배 계수를 나타내며, 분모  $Total\_P_{Mar}$ 는 모든 ESS의 방전 가용량 합을, 분자  $ESS_i - P_{Mar}$ 는  $i$ 번째 ESS의 방전 가용량을 나타낸다. 따라서 ESS간 출력 분배는 식 (5)와 같고, 그림 3의  $n=1$ 인 경우와 같다.  $n=1$ 인 경우 분배 계수가 잔존용량에 비례하기 때문에 시간에 관계없이 ESS간 같은 비율로 출력을 낸다.  $n=0$ 일 때와 달리 SOC가 고려되었기 때문에 1,500초 후 Unbalance는 6.45%가 된다.

따라서 본 논문에서는 SOC를 제공함으로써 SOC에 더 큰 비중을 가할 수 있도록 하였고, SOC를 스케일링하여 ESS 운전 범위 내에서 ESS의 출력이 분배되도록 하였다. 그림 4는  $n=2$ 인 경우,  $n=1$ 일 때보다 SOC 비중이 커지며 1,500초 후 Unbalance는

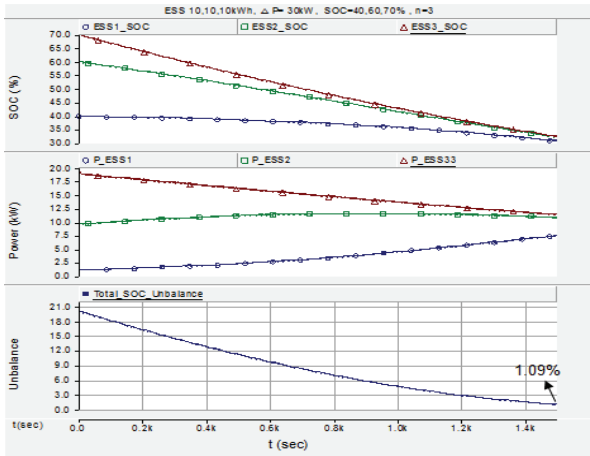


그림 5 경우1의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=3)  
**Fig. 5** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 1(n=3)

2.56%로서 SOC 균등화되는 속도가 빨라진다. 그림 5는 n=3인 경우, 1,500초 후 Unbalance가 1.09%이다. 차수 n이 커질수록 SOC 비중이 커져서 SOC 균등화 속도가 향상됨을 볼 수 있다.

n의 차수가 높아질수록 SOC가 높은 ESS는 더 큰 출력을, SOC가 낮은 ESS는 더 낮은 출력을 낸다. 이 경우, SOC 균형을 빠르게 맞출 수 있는 장점이 있지만 SOC가 높은 ESS의 출력이 너무 커져서 고밀도의 전력을 방전하게 되면 ESS 수명 cycle에 악영향을 미칠 수 있다. 차수 n을 결정하는 기준에 대하여는 4.4 절에 제시한다.

4.2 경우 2(충전)

경우 1에서는 ESS간 용량이 같기 때문에 용량을 고려한 결과를 확인할 수 없다. 따라서 경우 2에서는 ESS간 용량과 SOC 모두 고려한 경우를 설정하여 시뮬레이션 하였다.  $\Delta P$ 가 -30kW 일 때 ESS는 충전하게 되고 식 (8)를 적용한다.  $(1 - SOC_{sci})^n$ 의 n=0,1,2,3일 때를 시뮬레이션 하였다. 그림 8은 n=0인 경우, 1,500초 시뮬레이션 한 결과이다. n=0일 때 충전 전력 분배 식 (8)은 식 (9)와 같고, 용량 비율로  $m_i$ 이 결정되므로  $m_1 = 0.571$ ,  $m_2 = 0.286$ ,  $m_3 = 0.143$  이다.

그림 6을 보면, ESS의 용량이 다르므로  $m_i$  즉, 용량에 비례하여 충전전력이 분배됨을 알 수 있다. SOC가 고려되지 않았으므로 SOC Unbalance는 개선되지 않고 20%로 고정된다. 또한 초기 SOC가 60%인 ESS<sub>2</sub>는 1,500초가 되었을 때 SOC 상한선인 80%를 넘게 되므로 SOC를 고려해야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

그림 7은 n=1인 경우로서 ESS 잔존용량에 비례하여 충전전력의 크기가 정해진다. 1,500초 후 Unbalance는 5.75%이다. ESS 최대용량은 ESS<sub>2</sub>가 ESS<sub>3</sub>보다 커지만 SOC가 30%인 ESS<sub>3</sub>의 잔존용량이 더 작으므로 ESS<sub>3</sub>가 ESS<sub>2</sub>보다 더 큰 크기로 충전한다.

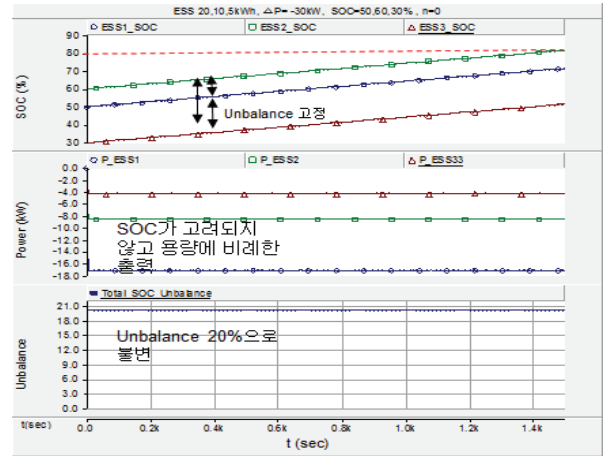


그림 6 경우2의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=0)  
**Fig. 6** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 2(n=0)

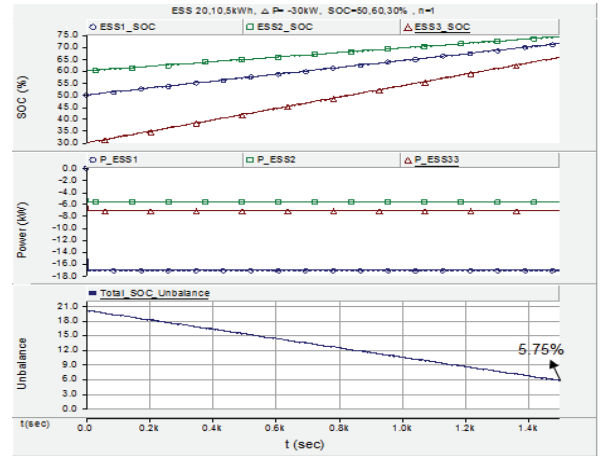


그림 7 경우2의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=1)  
**Fig. 7** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 2(n=1)

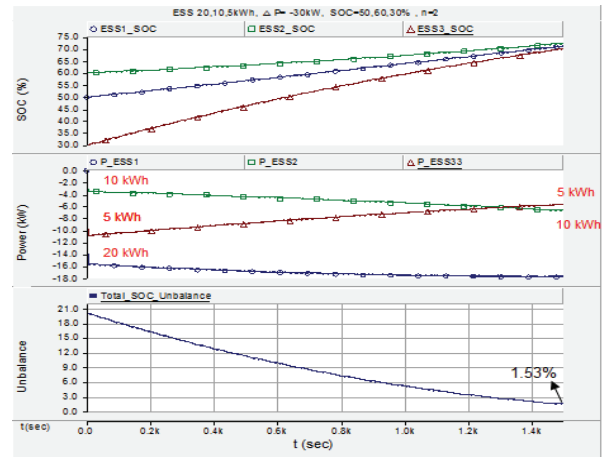


그림 8 경우2의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=2)  
**Fig. 8** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 2(n=2)

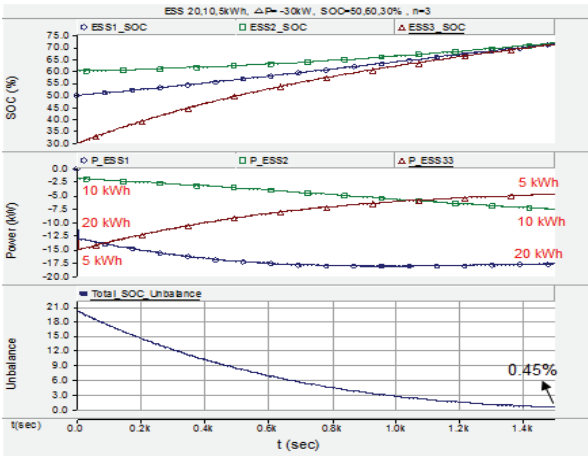


그림 9 경우2의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=3)  
**Fig. 9** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 2 (n=3)

그림 8은 n=2인 경우로서 SOC 차이로 인한 잔존용량이 ESS<sub>3</sub>가 ESS<sub>2</sub> 더 낮아서 처음에는 ESS<sub>3</sub>가 더 큰 충전을 한다. 하지만 SOC 균형이 비슷해진 후에는 SOC보다 용량 비중이 커져서 용량이 큰 ESS<sub>3</sub>가 더 큰 크기로 충전하는 것을 볼 수 있다. 1,500초가 되었을 때 Unbalance는 1.53%이다.

그림 9는 n=3인 경우로서 ESS간 충전량 분배를 함에 있어 용량보다 SOC의 비중이 커서 용량이 작은 ESS<sub>3</sub>의 충전전력이 더 커지만, SOC가 비슷해짐과 동시에 Unbalance가 작아지면서 충전전력이 용량 비율과 같아짐을 보여준다. 1,500초에서 n=3일 때는 Unbalance가 0.45%이다.

### 4.3 경우 3(충·방전)

경우 3에서는 3대의 ESS의 용량이 다른 경우에 충/방전이 교대로 일어나는 상황을 모의하기 위하여 전체 ESS가 분담해야 할 전력  $\Delta P$ 를  $30 \cdot \sin(t)$  [kW]로 두어 충전/방전모드가 반복되도록 하였다.  $\Delta P$ 가 양의 값을 가지면 방전, 음의 값을 가지면 충전을 의미한다. 방전 시에는 식 (7)을, 충전 시에는 식 (8)을 사용한다.  $m_i$ 을 용량 비율로 결정하였고,  $m_1 = 0.571, m_2 = 0.286, m_3 = 0.143$ 이며 3,000초 동안 시뮬레이션 하였다.

그림 10은 n=0인 경우로서, ESS간 전력분배를 함에 있어 SOC는 고려되지 않고 용량만 고려되었기 때문에 ESS간 Unbalance는 13.3%에서 개선되지 않음을 볼 수 있다. 그림 11은 n=1인 경우이며 잔존 용량에 비례하여 출력이 결정된다. 3,000초가 되었을 때 Unbalance는 5.28%이다.

그림 12, 13은 n=2, 3인 경우이다. ESS<sub>1</sub>의 용량이 20kWh로 가장 크지만, SOC는 50%로 ESS<sub>2</sub>, ESS<sub>3</sub>에 비하여 상대적으로 낮다. 따라서 방전하는 경우는 ESS<sub>2</sub>와 비슷한 크기로 출력을 내지만, 반대로 충전하는 경우는 SOC가 낮고 용량도 커서 충전전력의 크기가 가장 크다. 3,000초 후 Unbalance는 각각 2.23%, 0.94%로 n의 차수가 높아질수록 같은 시간에 SOC 균형이 더 빠르게 이루어지는 것을 볼 수 있다.

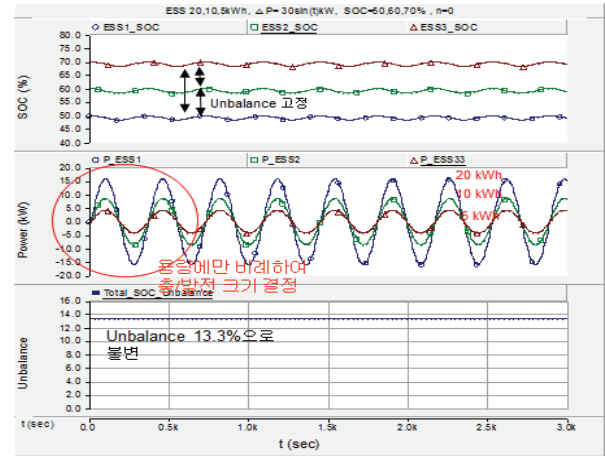


그림 10 경우3의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=0)  
**Fig. 10** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 3 (n=0)

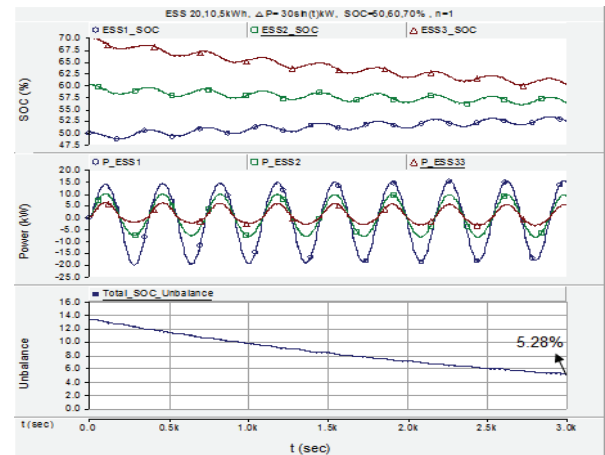


그림 11 경우3의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=1)  
**Fig. 11** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 3 (n=1)

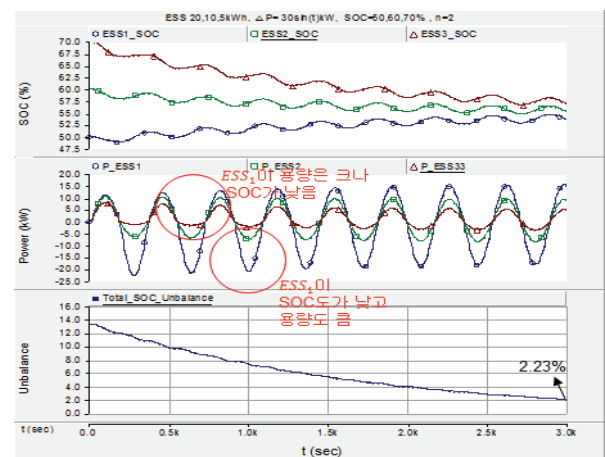


그림 12 경우3의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=2)  
**Fig. 12** SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 3 (n=2)



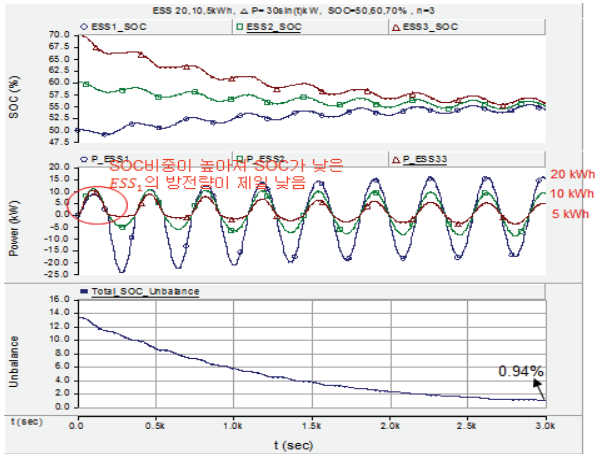


그림 13 경우3의 SOC, 방전전력, SOC 불균형 (n=3)  
 Fig. 13 SOC, Output Power, and SOC Unbalance for Case 3 (n=3)

4.4 차수 n의 한계

그림 14는 경우 3에서 차수 n이 1~5인 경우의 Unbalance를 비교한 것이다. 가로축은 분 단위의 시간을, 세로축은 SOC Unbalance를 나타내었다. 차수 n이 높아질수록 SOC Unbalance가 빠르게 작아지고 SOC 균형이 이뤄지는 시간이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 하지만 경우 3에서 본 바와 같이 차수 n이 높을수록 방전모드의 경우에는 SOC가 낮은 ESS가, 충전모드에는 SOC가 높은 ESS가 큰 출력을 내게 된다. 차수 n이 높아질수록 SOC 균등화 속도는 빨라지지만 출력이 커지므로 차수 n을 제한할 필요가 있다. ESS는 출력 크기에 제한이 있고 식 (12)와 같이 ESS 출력이 최대 출력 상한치( $P_{ESSi,max}$ )를 넘지 않는 범위에서 n을 구해야 할 것이다.

$$P_{ESSi} \leq P_{ESSi,max} \tag{12}$$

예를 들어, 경우 3에서  $P_{ESS1,max} = 25kW$  라면 n=3 이상이 되면 상한선을 초과하게 되므로 ESS의 최대출력 상한치를 고려하여 n을 선택해야 할 것이다.

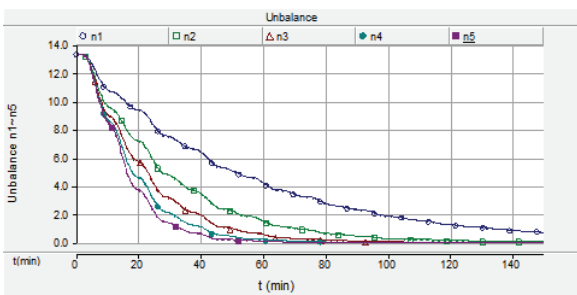


그림 14 경우 3에서 차수 n에 따른 SOC Unbalance  
 Fig. 14 SOC Unbalance according to exponent n for Case 3

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 계통에서 유효전력의 변화, 잉여, 부족분을 여러 대의 ESS가 동시에 보상할 때 ESS 최대 용량 뿐만 아니라 SOC를 고려하여 ESS의 출력을 분담하는 방법을 제시하였다. ESS의 수명특성을 고려해 SOC가 일정 범위 안에서 운전될 수 있도록 SOC의 스케일을 0~1로 조정하여 상한, 하한 한계치를 벗어나지 않도록 하였고, 다수의 ESS가 동시에 출력을 내서 높은 순시 전력밀도를 보상할 수 있도록 ESS간 SOC 균형을 맞추는 방식을 제안하였다. SOC 균형을 빠르게 맞추기 위하여 ESS간 출력 분배 계수를 계산할 때 SOC의 비중을 높이는 방안과 방전과 충전 시 모두 SOC를 고려할 수 있는 전력 배분 방법을 제시하였다.

스케일 조정된 SOC의 차수인 n의 값이 커질수록 ESS의 출력에 SOC의 비중이 높아지므로 방전의 경우에 SOC가 높은 ESS는 더 많은 출력을, SOC가 낮은 ESS는 더 낮은 출력을 내게 된다. 반대로 충전의 경우 SOC가 낮은 ESS가 더 큰 충전을, SOC가 높은 ESS가 상대적으로 적은 충전을 하게 된다. 차수 n이 높아지면 SOC Balance를 빠르게 맞출 수 있는 장점이 있지만 ESS 출력이 너무 커져서 ESS는 고밀도의 전력을 방전하게 되고 이것이 수명 사이클에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 ESS 출력이 상한치를 넘지 않도록 차수 n의 값을 제한할 필요가 있다. 본 연구는 마이크로그리드의 EMS 설계 시, 다수의 ESS를 운용하기 위한 ESS제어 알고리즘에 활용할 수 있을 것이다. 향후 마이크로그리드 계통에서 ESS뿐만 아니라 디젤발전기와 ESS를 연계하여 부하 특성, 신재생에너지 특성, 디젤발전기 출력을 동시에 고려한 여러 개의 ESS를 활용한 부하-주파수제어 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

References

- [1] N. D. Hatziargyriou, H. Asano, H. R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrid," IEEE Trans. on Power Energy, Vol. 5, pp. 78-94, 2007
- [2] R. H. Lasseter, "Microgrids" in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, New York, NY, USA, vol. 1, pp. 305-308, 2002
- [3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE Power Energy Mag, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, Jul./Aug., 2007
- [4] Amorim, A, "Analysis of the Connection of a Micro-turbine to a Low Voltage Grid" International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, The Netherlands,

16-18 Nov., 2005

- [5] Saha, A. K. "Modeling and performance analysis of a microturbine as a distributed energy resource" IEEE Trans. Energy Conversion, pp. 529-538, Feb., 2009
- [6] X. Tan, "Advances and trends of energy storage technology in microgrid", Int. J. Elect. Power Energy Syst, vol. 44, no.1, pp. 179-191, Jan. 2013
- [7] Eyke Liegmann and Ritwik Majumder, "An Efficient Method of Multiple Storage Control in Microgrids", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 30, No. 6, Nov. 2015
- [8] Laxman, "State-of-Charge (SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage System Based on a Cascade PWM Converter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 24, No. 6, June, 2009
- [9] M. Glavin, "A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system", in Proc. 13th Power Electron. Motion Control Conf(EPE-PEMC 2008), pp. 1688-1695, 2008
- [10] Hyeong-Jun Yoo, "Design of Coordinated Frequency Control Strategy applied to EDLC and BESSs for Microgrid in the Islanded Mode", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 6, pp. 820-827, 2014
- [11] Tomislav Dragičević, "Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 29, No. 2, pp. 695-706, Feb. 2014
- [12] Seong-Geun Han, "Fuzzy Droop Control considering SOC Balancing of BESSs", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 4, pp. 616-622, 2015
- [13] Xiaonan Lu, "SoC-Based Dynamic Power Sharing Method with AC-Bus Voltage Restoration for Microgrid Applications", IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.5677-5682, 2012
- [14] Zhixin Miao, "An SOC-Based Battery Management System for Microgrid", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 5, No. 2, pp. 966-973, Mar. 2014
- [15] Electropaedia. "Battery and Energy Technologies", <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [16] Jun Yeong Yun, "SOC-based Control Strategy of Battery Energy Storage System for Power System Frequency Regulation", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 5, pp. 622-628, 2014
- [17] Jong-Yul Kim, "Power Output Control of Wind Generation System Through Energy Storage System and STATCOM", Trans. KIEE. Vol. 59, No. 10, pp. 1718-1726, Oct., 2010
- [18] Xiaonan Lu, "State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 6, pp. 2804-2815, June, 2014

## 저 자 소 개



### 이 상 욱 (Sang-Wook Lee)

1987년 9월 1일생, 2013년 부산대학교 전자전기공학부 졸업, 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2016~현재 동 대학원 박사과정 현재 한국전력공사 재직



### 박 준 호 (June Ho Park)

1955년 09월 17일생, 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 부산대 전기컴퓨터공학부 교수