

배전용 ESS 연계위치 결정 알고리즘에 관한 연구

A Study on the Decision Algorithm of the Location of ESS for Power Distribution System

홍순일* · 황인성* · 문종필† · 정원욱**

(Soon-Il Hong · In-Sung Hwang · Jong-Fil Moon · Won-Wook Jung)

Abstract - In this paper, the ESS(Energy Storage System) is interconnected in order to reduce the maximum load in the distribution system and the target location of the ESS is set to be close to the rated voltage. We also applied the weights to nodes with large capacity and number of customers in the system. In the future, the interconnected location of the ESS was determined until 2029 in consideration of the load increase rated of the system. We propose a cooperative decision algorithm of interconnected location of ESS for Power Distribution System

Key Words : ESS, Power distribution system, Voltage, PSO, Power flow

1. 서론

오늘날 급격한 경제 성장과 산업화의 발달로 석유 에너지 및 석탄 에너지의 사용이 증가하고 있다. 그 영향으로 온실가스 배출로 지구 온난화가 지속되고 있으며, 세계적으로 온실가스를 감축시키기 위해 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 최근 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)를 배전계통에 연계하는 추세이다[1]. ESS는 전력수요가 낮은 시간대에 충전하여 전력수요가 높은 시간대에 방전함으로써 에너지를 효율적으로 사용할 수 있도록 하고 있다. 이외에도 배전용 ESS는 신재생 에너지 출력 안정, 주파수 조정 등으로 활용할 수 있다. 본 논문에서는 배전계통의 피더별 최대부하를 관리하기 위해 ESS의 용량을 산정하여 배전계통에 연계한다. 즉, 변전소 인출단(피더 앞단)에서 측정된 부하가 상시 운전용량을 초과하지 않게 ESS의 충·방전을 수행한다. 그러나 여기서 산정된 용량의 ESS를 배전계통에 연계할 위치를 결정하는 2차적인 문제가 발생하게 된다. 즉, ESS를 어느 위치에 연계하느냐에 따라 추가적인 효과를 가질 수 있게 된다. 기존의 연구에서는 주로 배전 손실저감 목적 또는 전압 안정도 향상을 목적으로 ESS의 연계 위치를 결정하였다. 배전 손실 저감의 경우 ESS가 충·방전을 수행할 때 손실량이 최소로 나오는 위치에 ESS를 연계하게 되며[2, 3], 전압도 마찬가지로 ESS가

충·방전을 수행할 때 각 노드별 전압이 정격전압과 가장 가까워지는 위치에 ESS를 연계하게 된다[4-6].

본 논문에서는 배전계통의 최대부하를 관리하기 위해 ESS의 용량을 산정하고, 2차적으로 ESS의 연계 위치 결정은 배전 피더의 각 노드별 전압이 정격 전압과 가까워지는 것을 목표로 하였다. 또한 노드별 설비 용량과 수용가 수 데이터를 이용하여 가중치를 적용하였다. 최적해 썬치를 위한 연산량이 많아 PSO(Particle Swarm Optimization) 기법을 적용하였다[7].

2. 배전용 ESS 용량 및 연계위치 결정 알고리즘

배전계통의 최대부하를 관리하기 위한 용도의 ESS를 연계하기 위해서는 먼저 ESS의 용량을 산정해야 한다. ESS의 용량산정 기준은 상시 운전용량을 초과하지 않는 용량을 산정하며, 7차 전력수급계획에 따라 부하 증가율을 고려하여 2029년까지 ESS의 용량을 산정한다. 그러나 여기서 산정된 연도별 ESS 용량을 계통에 매년도 별로 설치하는 것은 비효율적으로 판단하여 2029년까지 ESS를 총 3번 투입한다고 가정하였다. 투입시기가 결정된 ESS의 용량을 토대로 ESS의 연계 위치를 결정하였으며, 각 노드별 전압이 정격전압이 되도록 하는 것을 목표로 하였다. 추가적으로 노드별 설비용량과 수용가 수 데이터를 포함시켜, 가중치를 적용시켰으며 2029년까지 ESS의 연계 위치를 결정하였다. 그림 1은 본 논문에서 제시하는 배전용 ESS의 용량 및 연계 위치 선정 알고리즘을 나타낸다.

2.1 연도 별 ESS 용량 산정

연도 별 ESS 용량은 변전소 인출단에서 측정된 부하가 상시 운전용량을 초과하지 않도록 산정하였다. 식 (1)은 ESS의 용량 산정을 위한 식을 나타낸다.

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

E-mail : moon@ut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of transportation, Korea

** Korea Electric Power Research Institute, Korea

접수일자 : 2018년 2월 6일

최종완료 : 2018년 2월 23일

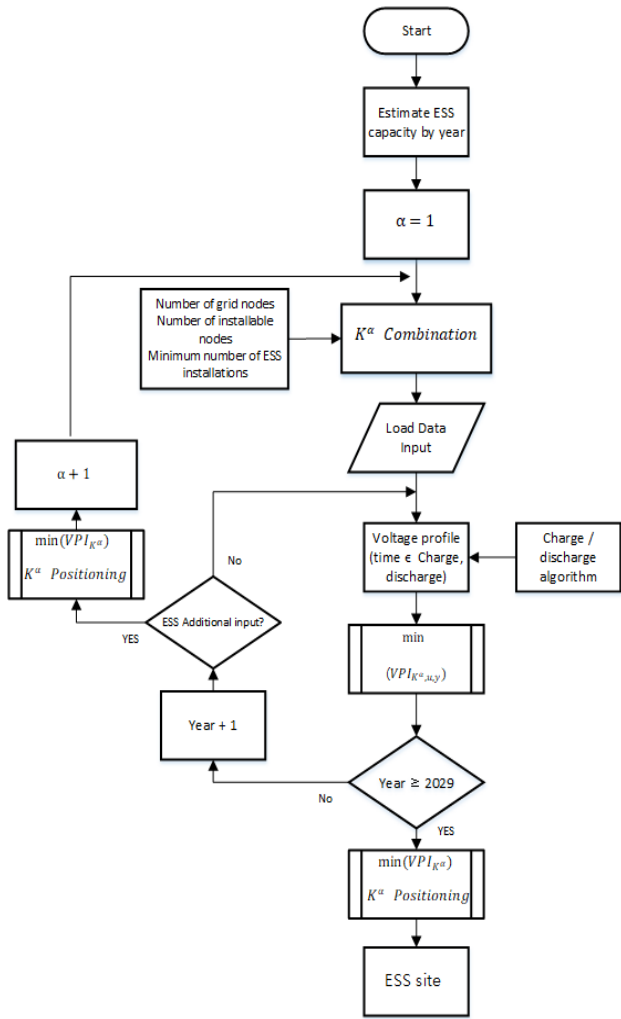


그림 1 ESS 연계 위치 결정 알고리즘
Fig. 1 ESS interconnected Location Decision Algorithm

$$ESS_{capacity} = \frac{1}{n_{SOC}} \times \frac{1}{n_{op}} \times \frac{1}{n_{PCS}} \times \left(\sum_{t=1}^{720} (P_{load}(t) - P_{rated}) \right) \quad (1)$$

여기서 $ESS_{capacity}$ 는 산정된 ESS의 용량을 말하며, n_{SOC} 는 SOC의 충·방전 제약을 말한다. n_{op} 는 ESS의 운영 알고리즘 오차율, n_{PCS} 는 PCS의 효율, P_{load} 는 변전소 인출단에서 측정된 부하, P_{rated} 는 상시 운전용량을 말한다.

7차 전력수급계획에 따라 부하를 증가시켜 2029년까지 식 (1)을 통해 ESS의 용량을 산정하였다. 또한 연도 별로 ESS의 용량을 추가로 설치하는 것은 비효율적이라 판단하여 ESS의 설치시기를 가정하였다. 표 1은 연도 별 ESS의 용량과 설치시기를 나타낸다. 또한 ESS의 기본 설치 단위를 0.5MWh로 선정하였다.

2.2 K^α Combination

ESS의 연계 위치 조합을 나타내기 위하여 변수 K 를 도입하였다. ESS의 연계 위치 조합은 총 계통 노드 수, ESS

표 1 ESS 용량

Table 1 ESS Capacity

Year	ESS capacity by year [MWh]	Total installed ESS capacity [MWh]
2016	0.046	3.00
2017	0.374	
2018	0.960	
2019	1.702	
2020	2.660	
2021	4.567	16.50
2022	6.968	
2023	9.782	
2024	12.648	
2025	16.076	
2026	19.634	31.00
2027	23.317	
2028	27.017	
2029	30.815	

의 설치 가능한 노드 수, ESS의 최소 설치 개수를 이용하여 산출할 수 있으며, 설치 가능한 노드 수는 총 계통 노드 수에서 ESS가 여러 곳에 ESS가 설치하는 것을 막기 위한 제약조건을 나타낸다. ESS의 최소 설치 개수는 설치 용량에 2.1절에서 언급한 ESS의 설치 단위를 나눔으로서 계산되는 값을 의미한다. α 는 ESS의 설치 횟수로 정의하였다. 예를 들어, 표 1에서 2016년부터 2020년까지 ESS 3MWh가 계통에 설치하는 것을 $\alpha=1$ 이라 정의하였다. 따라서 K^1 은 ESS가 첫 번째로 설치되는 용량의 연계 위치 조합이라 할 수 있다.

2.3 Load Data 및 충·방전 알고리즘

ESS의 연계 위치 선정 알고리즘은 2016년도부터 2017년도까지 변전소 인출단에서 측정된 부하데이터를 토대로 알고리즘을 수행했으며, ESS의 충·방전 알고리즘은 부하가 높을 때 방전하고, 낮을 때 충전하였다. 본 논문에서는 과거 데이터를 이용했기 때문에 완벽한 충·방전 알고리즘을 수행할 수 있었으며, 또한 ESS의 잦은 충·방전은 ESS의 수명과 직결되기 때문에 부하크기가 9MW이상인 부하곡선만 선택하여 ESS를 충·방전하였다.

2.4 Voltage profile

Voltage profile은 본 논문에서 ESS의 연계 위치에 따른 각 노드별 전압을 나타낸다. Voltage profile은 ESS가 충·방전을 수행할 때에만 전압을 계산하게 되며, 산출된 값은 주목적함수에서 사용된다.

2.5 VPI(Voltage Profile Improvement)

본 논문에서의 ESS의 연계 위치는 목적함수 VPI를 통해 결정된다. VPI는 ESS의 연계 위치조합에 따른 전압 값과

노드 별 설비용량, 수용가 수로 이루어져 있으며, VPI의 최솟값을 찾음으로서 ESS의 연계 위치를 결정한다. 식 (2)는 ESS의 연계 위치를 결정하는 목적함수를 나타낸다.

$$VPI_{k^{\alpha},u,y} = \sum_{t=1}^{720 \times 365} \sum_{i=1}^N |V_{ref} - V_{i,k^{\alpha},y}(t)| \times \left[\omega_1 \left(1 - \frac{P_{i,y}}{\sum_{j=1}^N P_{j,y}} \right) + \omega_2 \left(1 - \frac{N_{i,y}}{\sum_{j=1}^N N_{j,y}} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 t는 시간을 말하며, 제약조건으로는 ESS가 충·방전 알고리즘을 수행할 때에만 알고리즘을 수행하게 된다. V_{ref} 는 정격전압을 나타내며, $V_{i,k^{\alpha},y}$ 는 y연도에 ESS의 연계 위치 조합(k^{α})에 따른 i번째 노드의 전압을 나타낸다. ω_1, ω_2 는 설비용량과 고객 수의 가중치를 나타낸다. $P_{i,y}$ 는 y연도에 i노드 설비 용량이고, $N_{i,y}$ 는 y연도에 i노드 수용가 수이다. u는 ESS의 연계 위치 조합이 결정된 연도를 나타낸다. 또한 ESS가 연계되었음에도 불구하고 노드 별 전압이 전압 상한치를 초과하거나 전압 하한치보다 낮을 경우, 그 때의 ESS의 연계 위치 조합은 제외하게 된다. 그림 2는 연도 별 $VPI_{k^{\alpha},u,y}$ 의 최솟값을 찾는 알고리즘을 나타낸다.

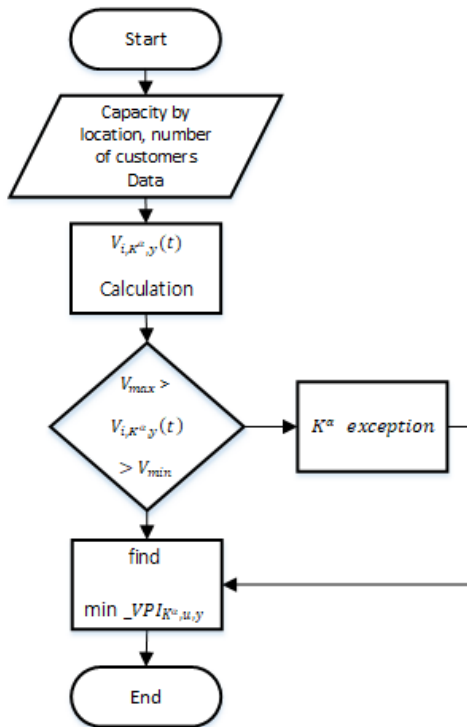


그림 2 연도 별 ESS 연계 위치 결정 알고리즘
Fig. 2 Interconnected Location Decision of ESS Algorithm by Year

2.6 최종 ESS 연계 위치 결정

그림 2의 연도 별 ESS 위치 결정 알고리즘을 이용하여 $VPI_{k^{\alpha},u,y}$ 의 최솟값을 찾음으로서 y연도에 해당하는 ESS의 연계 위치를 결정하게 된다. 또한 계통의 부하를 증가시켜 다음 연도에 대한 ESS의 연계 위치를 결정하게 되며, α 에 해당하는 연도 별 ESS의 연계 위치를 결정하게 된다. 연도 별로 산정된 ESS의 연계 위치는 각각 다르게 나올 수 있으며 매년도에 산정된 방식을 종합적으로 계산하여 최종적으로 ESS의 연계 위치를 선정할 필요성이 있다. 또한 ESS의 추가설치가 있는 경우 추가 설치하기 전에 ESS의 연계 위치는 고정된 상태에서 새롭게 설치되는 ESS의 연계 위치를 결정해야한다. 식 (3)은 연도 별 결정된 ESS의 연계 위치를 하나로 결정하는 식을 나타낸다. 부하의 크기를 고려하여 가중치를 적용했다.

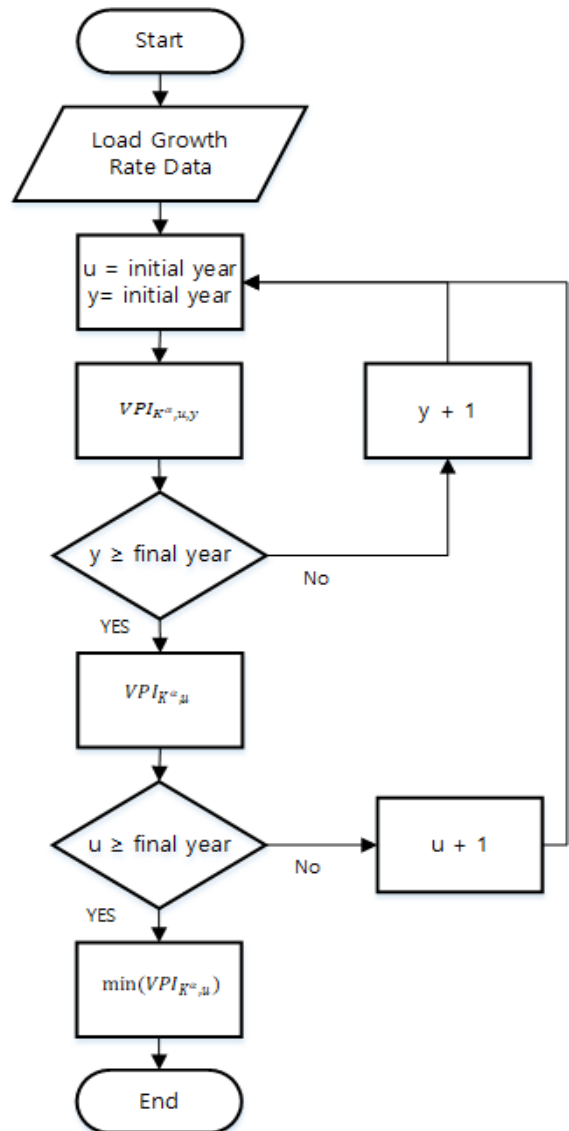


그림 3 최종 ESS 연계 위치 선정 알고리즘
Fig. 3 Final Location Decision of ESS Algorithm

$$VPI_{k,u}^{\alpha} = \sum_{y=initial\ year}^{final\ year} VPI_{K^{\alpha},u,y} \times \left(1 - \frac{AVG-rate_y}{\sum_{R=initial\ year}^{final\ year} AVG-rate_R} \right), \quad (3)$$

$u = initial\ year \sim final\ year$

여기서 $AVG-rate_y$ 은 부하의 증가율을 나타내며, u 의 initial year과 final year은 α 의 설치연도 중 초기연도와 마지막 연도를 나타낸다. α 에 해당하는 연도 별 ESS의 연계 위치를 식 (3)을 통해 최종적으로 ESS의 연계 위치를 결정하게 된다. 그림 3은 α 에 해당하는 최종 ESS의 연계 위치를 결정하는 $VPI_{k,u}^{\alpha}$ 의 알고리즘을 나타낸다.

3. ESS 위치 결정 사례 연구

3.1 샘플 배전계통

본 논문에서는 ESS의 연계 위치 결정 알고리즘을 적용하기 위하여 샘플 배전계통을 구성하였다. 그림 4는 배전계통 모델을 나타내며, 표 2는 각 Load Point[LP]별 설비용량과 수용가 수를 나타낸다.

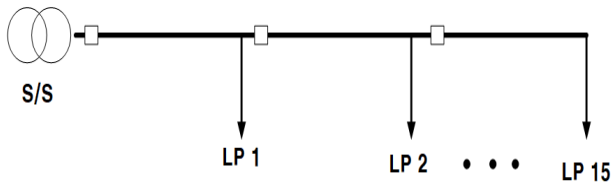


그림 4 샘플 배전계통 모델

Fig. 4 Sample Distribution System model

표 2 샘플 배전계통 설비용량 및 수용가 수

Table 2 Sample Distribution System Capacity and Number of Customers

LP	Capacity of equipment [MVA]	Number of consumers
1	1.45	85
2	3.7	154
3	5.87	502
4	1.86	87
5	0.21	21
6	7.54	913
7	9.44	1073
8	1.6	252
9	6.87	782
10	2.47	200
11	1.1	125
12	0.4	73
13	2	63
14	0.75	267
15	1.29	249

3.2 샘플 배전계통 ESS 연계 위치

표 3은 식 (2)를 통해 α 가 1에 해당하는 연도 별 ESS의 연계 위치를 나타낸다. 연도 별로 결정된 ESS의 위치는 다시 식 (3)을 통해 최종적으로 ESS의 연계 위치를 결정하게 되며, 결정된 ESS의 연계 위치는 표 4에서 $\alpha=1$ 에 나타내었다. 본 논문에서는 ESS의 설치횟수가 3번이기 때문에 α 가 3번째까지 알고리즘을 수행했다. 표 4는 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 수행한 결과이다. α 가 1일 경우 ESS의 연계 위치는 LP 15에 ESS 용량 3MWh가 연계되었다. 이는 2016년부터 2020년까지 배전계통의 각 LP 전압이 정격전압과 가까워지는 ESS의 연계 위치는 LP 15로 볼 수 있다. 다만, 추가적으로 고려한 사항으로는 각 LP 별 설비용량과 수용가 수를 고려하였다. 추가적으로 α 가 2, 3일 경우 배전계통에 부하 증가를 고려해서 ESS를 추가 연계를 하게 된다. α 가 2, 3일 때 ESS의 연계 위치는 말단에서 계통 중간부분으로 연계되는 것을 볼 수 있는데, 이는 ESS의 연계로 인하여 말단 부분의 전압이 정격전압과 가까워지면서 가장 전압이 정격전압과 차이가 많은 위치로 결정된 것으로 판단된다. 최종 ESS의 연계 위치는 LP 4, 5, 13, 15에 연계되어 ESS를 운영하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서의 ESS는 배전계통의 최대부하를 관리하기

표 3 $\alpha=1$ 의 연도 별 ESS 연계 위치 [단위: MWh]

Table 3 ESS interconnected location of $\alpha=1$ by year [Unit: MWh]

LP	2016	2017	2018	2019	2020
1	0	0	0	0	0
...
12	0	0	0	0	0
13	0	0	1.5	0	0
14	0.5	0	0	0	0
15	2.5	3	1.5	3	3

표 4 ESS 연계 위치 [단위: MWh]

Table 4 Interconnected Location of ESS [Unit: MWh]

LP	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=3$
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	6
5	0	0	8.5
6	0	0	0
...
12	0	0	0
13	0	1	1
14	0	0	0
15	3	15.5	15.5

위해 ESS를 충·방전하며, ESS의 연계 위치 선정 알고리즘은 노드 별 전압이 정격전압과 수렴하는 것을 목표로 하였다. 추가적으로 설비용량과 수용가 수가 높은 노드에 가중치를 적용했으며, 7차 전력수급계획에 따라 배전계통의 부하를 증가시켰다. 최종 ESS의 연계 위치는 LP 4, 5, 13, 15에 연계되어 배전계통의 전체적인 전압 균형을 맞추게 된다.

추후 분산전원이 연계된 배전계통에서의 ESS의 연계 위치 선정에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] "Total energy storage device of energy new industry," *Ministry of Trade, Industry and Energy*, 2015.
- [2] Junainah Sardi, N. Mithulananthan, Duong Quoc Hung, "A Loss Sensitivity Factor Methode for Locating ES in a Distribution system with PV units," *IEEE PES General Meeting*, Nov. 2015.
- [3] Zidar, M., Capuder, T., Georgilakis, P. S., et al.: "Convex AC optimal power flow method for definition of size and location of battery storage systems in the distribution grid," in *Ban, M. (Ed.): Proc. of the Ninth Conf. on Sustainable Development of Energy, Water and Environment System*, Sep. 2014.
- [4] H. Nazaripouyal, Y. Wang1, P. Chu1, H. R. Pota2, and R. Gadh1, "Optimal Sizing and Placement of Battery Energy Storage in Distribution System Based on Solar Size for Voltage Regulation," *IEEE PES General Meeting*, Jul. 2015.
- [5] Zhong Qing, Yu Nanhua and Zhang Xiaoping, "Optimal Siting & Sizing of Battery Energy Storage System In Active Distribution Network," *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2013
- [6] Chandu Venu, Seddik Bacha, "Battery Storage System Sizing in Distribution Feeders with Distributed Photovoltaic Systems," *IEEE Power Tech*, June 2009.
- [7] "7th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand," *MOTIC*, June 2015.

저 자 소 개



홍 순 일 (Soon-Il Hong)

2016년 한국교통대 전기공학과 졸업.
2016년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

E-mail : soonil1999@ut.ac.kr



황 인 성 (In-Sung Hwang)

2016년 한국교통대 전기공학과 졸업.
2016년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

E-mail : his274@ut.ac.kr



문 중 필 (Jong-Fil Moon)

2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
2009년~현재 한국교통대학교 전기공학과 부교수

E-mail : moon@ut.ac.kr



정 원 옥 (Won-Wook Jung)

2003년 충남대학교 전기공학과 졸업.
2005년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.

E-mail : wonwook.jung@kepco.co.kr