

태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘에 관한 연구

이세연, 김정화, 곽충근, 정재범, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:seyeonlee@kopo.ac.kr

A Study on the Evaluation Algorithm for Minimum Introduction Capacity of ESS to Enhance Hosting Capacity of PV Systems

Se-Yeon Lee, Kyung-Hwa Kim, Chung-Guen Kwak, Jae-Beom Jung, Dae-Seok Rho
Korean University of Technology and Education

요약

최근, 정부의 탄소중립 및 그린뉴딜 정책에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지 전원을 확대하는 보급사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 배전계통에 연계된 태양광전원의 용량이 증가되면, 연계용량 및 연계구간에 따라 발생하는 역조류에 의해 수용가전압이 허용전압 범위를 벗어나는 현상이 발생되어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 배전계통 수용성 향상을 위한 ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘을 제안한다. 구체적으로, ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘은 수용가전압을 허용전압 범위 이내로 유지시킬 수 있는 각 시간대별 ESS의 유효전력을 산정하여 ESS의 최소 kW 및 kWh 도입용량을 제시한다. 또한, 태양광전원이 연계된 배전계통의 수용성을 평가하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원, 수용가부하 등으로 구성된 전체 배전계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 제안한 알고리즘에 의해 산정된 ESS의 최소 도입용량에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 수용가의 과전압현상을 해결하여 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 정부는 탈원전 및 미세먼지 대응, 온실가스 감축을 위해 신재생에너지의 발전 비중을 2040년까지 30~35[%]로 늘릴 계획을 발표하였으며, 태양광전원 등의 신재생에너지전원을 확대하는 보급사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 신재생에너지 전원이 배전계통에 도입되어 운용됨에 따라, 신재생에너지전원의 급격한 출력 변동성으로 인해 배전계통의 전력품질 및 신뢰도와 관련된 많은 문제점들이 발생되고 있다. 특히, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 기존의 단방향 조류가 아닌 역조류에 의해 수용가전압이 허용전압 범위(220±13V)를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 수용가의 과전압현상이 발생하는 경우, 충전 및 방전동작을 제어하여 수용가전압을 허용전압 범위 이내로 유지시킬 수 있는 ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘을 제안한다. 또한, 태양광전원이 연

계된 배전계통의 수용성을 평가하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원, 수용가부하 등으로 구성된 전체 배전계통 모델링을 수행한다. 상기의 알고리즘 및 모델링을 바탕으로, ESS의 최소 도입용량에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. 수용성 향상을 위한 ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘

주상변압기 2차측의 직하 및 말단 수용가전압은 식 (1)과 식 (2)와 같이 산정된다. 여기서, 직하 및 말단 수용가전압은 주상변압기 1차측 전압을 탭 전압에 의해 저압측으로 환산한 값과 저압선로의 전압강하 및 수용가부하율을 고려하여 산정할 수 있다.

$$V1(n, t) = (V_{pri}(n, t) \times \frac{V_s}{V_{tap}}) - V_f \times f_c(t) \quad (1)$$

$$V2(n, t) = (V_{pri}(n, t) \times \frac{V_s}{V_{tap}}) - V_l \times f_c(t) \quad (2)$$

여기서, $V1(n, t)$: n번째 구간에서의 직하 수용가전압 [V], $V2(n, t)$: n번째 구간에서의 말단 수용가전압[V], $V_{pri}(n, t)$: n번째 구간에서의 주상변압기 1차측 전압[V]

또한, 허용전압(220±13V) 범위를 벗어난 수용가전압을 고압측으로 환산하면 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max}(t) = (V1_{max}(t) + V_f \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (3)$$

$$V_{min}(t) = (V2_{min}(t) + V_l \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (4)$$

여기서, $V_{max}(t)$: 허용전압 범위를 벗어난 최대 직하 수용가전압을 고압측으로 환산한 값[V], $V_{min}(t)$: 허용전압 범위를 벗어난 최소 말단 수용가전압을 고압측으로 환산한 값[V], $V1_{max}(t)$: 최대 직하 수용가전압[V], $V2_{min}(t)$: 최소 말단 수용가전압[V]

한편, ESS의 충전 및 방전을 결정하는 충전 동작전압 및 방전 동작전압은 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ch}(t) = \{V_{limit} + V_f \times f_c(t)\} \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (5)$$

$$V_{dis}(t) = \{V_{limit} + V_l \times f_c(t)\} \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (6)$$

여기서, $V_{ch}(t)$: ESS의 충전 동작전압[V], $V_{dis}(t)$: ESS의 방전 동작전압[V]

또한, ESS의 충전 및 방전 동작 모드는 식 (7)의 조건에 따라 결정된다. 즉, 허용전압 범위를 벗어난 최대 직하 수용가전압을 고압측으로 환산한 값이 ESS의 충전 동작전압보다 크면 ESS는 충전 동작($\delta(t) = -1$)을 수행하고, 최소 말단 수용가전압을 고압측으로 환산한 값이 ESS의 방전 동작전압보다 작을 경우에는 방전 동작($\delta(t) = 1$)을 수행한다.

$$\delta(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } V_{max}(t) > V_{ch}(t) \\ 1 & \text{if } V_{min}(t) < V_{dis}(t) \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $\delta(t)$: ESS의 충전 및 방전 동작 모드

한편, ESS의 충전 및 방전 동작으로 보상할 수 있는 전압 제어값은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{con}(t) = \begin{cases} V_{max}(t) - V_{ch}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{min}(t) - V_{dis}(t)|, & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $V_{con}(t)$: ESS의 전압 제어값[V]

또한, 식 (9)는 ESS의 충전 및 방전동작에 의하여 공급 또는 소비되는 전류값으로서, 식 (8)의 전압 제어값을 송출단에서 ESS의 연계구간까지의 선로 저항으로 나눈 값이다.

$$I_{ESS}(t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{n=1}^{n_\alpha} (R(n) \cdot L(n))} \quad (9)$$

여기서, $I_{ESS}(t)$: ESS의 전류[A], $R(n)$: n번째 구간의 선로 저항[Ω/km], $L(n)$: n번째 구간의 선로 공장[km], n_α : ESS의 연계구간

또한, ESS의 충전 및 방전동작에 의해 공급 또는 소비되는 유효전력은 허용전압 범위를 벗어난 최대 및 최소 수용가전압을 고압측으로 환산한 값과 ESS의 전류값을 곱하여, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = \begin{cases} 3 \cdot V_{max}(t) \cdot I_{ESS}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ 3 \cdot V_{min}(t) \cdot I_{ESS}(t), & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서, $P(t)$: ESS의 유효전력[W]

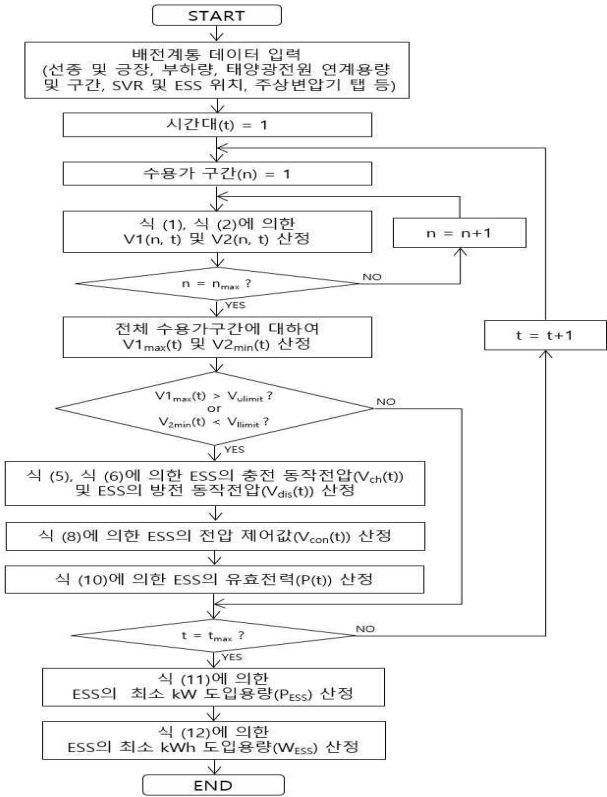
따라서, ESS의 최소 kW 도입용량(P_{ESS})은 ESS의 시간대별 유효전력의 크기 중에서 가장 큰 값을 고려하여, 식 (11)과 같이 산정할 수 있으며, ESS의 최소 kWh 도입용량(W_{ESS})은 전체 시간대에 대한 ESS의 유효전력을 적산하여, 식 (12)와 같이 산정할 수 있다.

$$P_{ESS} = \max[|P(t)|]_{t=0}^{t=t_{max}} \quad (11)$$

$$W_{ESS} = \int_0^{t_{max}} P(t) dt \quad (12)$$

여기서, P_{ESS} : ESS의 최소 kW 도입용량[W], W_{ESS} : ESS의 최소 kWh 도입용량[Wh]

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 1과 같다.

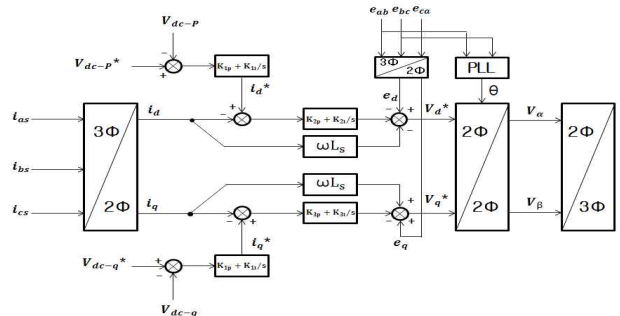


<그림 1> ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_d \times \omega L \quad (16)$$

여기서, V_d , V_q : d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_d , I_q : 계통전류의 d-q축 전류, V_{sq} : 계통의 순시전압

따라서, 상기의 식 (15) 및 식 (16)에 의하여 정전류원으로 충·방전을 수행할 수 있는 ESS를 모델링하면 그림 2와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 2] ESS 모델링

3. PSCAD/EMTDC에 의한 배전계통 모델링

3.1 ESS 모델링

ESS의 기준 DC 링크전압과 목표전력에 의한 DC 링크전압을 비교하여 전압차를 구한 후, 이 전압차를 비례적분하면 목표로 하는 d-q축의 기준전류(I_{ref-dq})를 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref-d} = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{DC-d}^* - V_{DC-d}) \quad (13)$$

$$I_{ref-q} = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \quad (14)$$

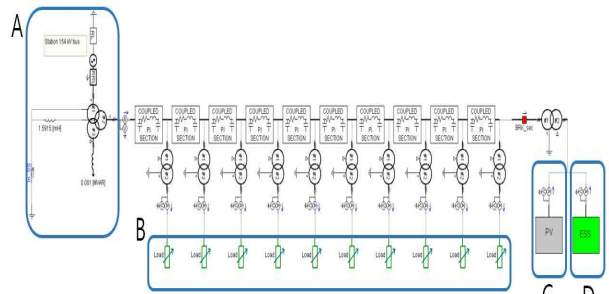
여기서, I_{ref-d} : d축 기준전류, I_{ref-q} : q축 기준전류, V_{DC-dq}^* : 기준 DC 링크전압, V_{DC-dq} : 목표 DC 링크전압

또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 ESS를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 ESS를 방전시키기 위하여, 전류제어 알고리즘에 적용하여 인버터 출력을 위한 d-q축 전압을 구하면, 식 (15)와 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \quad (15)$$

3.2 전체 배전계통 모델링

ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서 A 부분은 배전용 변전소, B부분은 수용가 부하, C부분은 태양광전원, D부분은 ESS를 나타낸 것이다. 또한, D부분은 정전류원으로 충·방전을 수행할 수 있는 ESS부로 디커플링 방식으로 전류 제어부를 구성하여, 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 3] 전체 배전계통 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 ESS의 최소 도입용량에 따른 수용가전

압의 특성을 분석하여, 태양광전원의 수용성을 평가하기 위해 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 10개 구간으로 구성하고, 1번~6번 구간의 선종은 ACSR-160[mm], 7번~10번 구간의 선종은 ACSR-95[mm]로 상정한다. 한편, 주상변압기 1차측 탭은 1~5구간은 13,200탭, 6~10구간은 12,600탭을 적용한다.

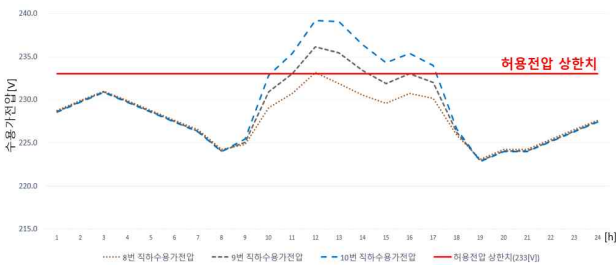
[표 1] 시뮬레이션 조건

구간	선로임피던스 [Ω /km]		선로 길이 [km]	부하용량 [MVA]		역률	주상변압기 1차측 탭전압 [V]
	R	X		중부하	경부하		
1	0.18	0.39	2	0.2	0.09	0.95	13200
2	0.18	0.39	2	0.8	0.36	0.95	13200
3	0.18	0.39	2	2.5	1.125	0.95	13200
4	0.18	0.39	3	0.1	0.045	0.95	13200
5	0.18	0.39	3	0.4	0.18	0.95	13200
6	0.18	0.39	3	4	1.8	0.95	12600
7	0.4	0.48	3	1.5	0.675	0.95	12600
8	0.4	0.48	4	0.25	0.113	0.95	12600
9	0.4	0.48	4	0.15	0.068	0.95	12600
10	0.4	0.48	4	0.1	0.045	0.95	12600

한편, 태양광전원의 연계용량은 5[MW]로 상정하며, 연계 구간은 수용가의 과전압현상이 가장 빈번하게 발생할 수 있는 선로 말단지점으로 상정한다. 또한, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 도입구간도 10번 구간으로 상정한다.

4.2 수용성 향상을 위한 ESS의 운용 특성

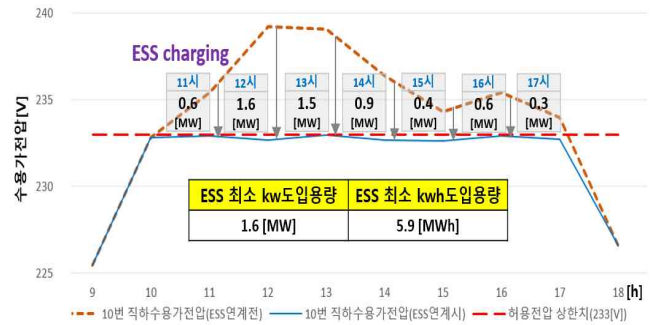
여기서는 5[MW]의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, ESS의 운용에 의한 수용가전압의 특성을 분석한다. 먼저, ESS를 도입하지 않은 경우, 8번~10번 구간의 직하수용가전압 특성을 나타내면 그림 4와 같다. 이 그림에서와 같이, 5[MW]의 태양광전원이 연계되면 선로말단의 수용가전압이 과전압현상에 의해 허용전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 확인하였다.



[그림 4] 5[MW]의 태양광전원 연계시 수용가전압 특성

따라서, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있는 ESS의 운용특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여

기서, 5[MW]의 태양광전원이 연계되는 경우, 수용가의 과전압 현상이 발생하는 시간은 11시 ~ 17시이며, 제안한 알고리즘에 의하여 ESS의 충전 유효전력은 최소 0.3[MW]에서 최대 1.6[MW]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, ESS의 최소 kW 도입용량은 시간대별 유효전력의 크기 중에서 가장 큰 값인 1.6[MW]로 산정되며, ESS의 최소 kWh 도입용량은 전체 시간대에 대한 ESS의 유효전력을 적산하여 5.9[MWh]로 산정됨을 알 수 있다.



[그림 5] 5[MW]의 태양광전원 연계시 ESS의 운용 특성

5. 결 론

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 최소 도입용량 평가알고리즘을 제안하였다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안하였다. 이를 바탕으로, 제안한 알고리즘에 의해 산정된 ESS의 최소 도입용량에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 수용가의 과전압현상을 해결하여 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010, No. 20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김병기 외 3인, “대용량 태양광발전이 연계된 배전계통의 수용가전압 특성해석에 관한 연구”, 전기학회논문지, 제 62권 제1호, pp. 29-36, 1월, 2013년.
- [2] 남양현, “전기저장장치에 의한 태양광전원이 연계된 배전계통의 수용성 향상에 관한 연구”, 한국기술교육대학교 대학원, 학위논문(석사), 8월, 2018년.