

태양광전원의 배전계통 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안에 관한 연구

이세연, 박동명, 황소연, 정재범, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:seyeonlee@kopo.ac.kr

Operation Method of ESS for Hosting Capacity in Distribution Systems with PV System

Se-Yeon Lee, Dong-Myoung Park, So-Yeon Hwang, Jae-Beom Jung, Dae-Seok Rho
Korean University of Technology and Education

요약

최근, 정부의 탄소중립 정책에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지전원을 확대하는 보급 사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 기존의 단방향 조류가 아닌 역조류에 의해 양방향으로 전력의 흐름이 발생하게 된다. 태양광전원에 의해 발생하는 양방향 조류는 배전계통의 전압상승 및 강하와 같은 문제를 발생시키며, 전력품질 및 전력신뢰도를 저하시킨다. 특히, 역조류에 의한 수용가의 과전압현상으로 인해 태양광전원의 배전계통 수용성이 저하될 가능성이 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 양방향으로 전력을 공급할 수 있는 배전용 ESS가 고려되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 충·방전을 통해 배전계통의 전압 변동성에 대응하여, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 ESS의 운용방안을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 배전계통의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, ESS의 충·방전 운용에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS의 운용방안에 따라, 수용가의 과전압 현상을 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 보급 사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 연계용량 및 연계구간에 따라 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 이러한 배경으로, ESS를 도입하여 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. ESS는 양방향으로 전력을 공급할 수 있는 분산자원으로, 충전 및 방전동작을 제어하여 배전계통의 전압 변동성에 대응할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 배전계통 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안을 제안한다. 구체적으로, 태양광전원의 연계에

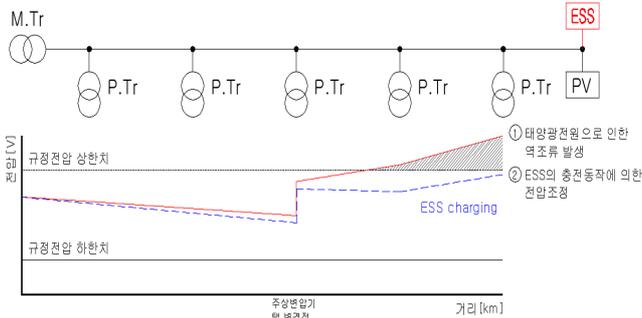
의해 발생하는 양방향조류를 고려하여, 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키기 위한 ESS의 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안한다. 이를 바탕으로, ESS의 충·방전 운용에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS 운용방안의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안

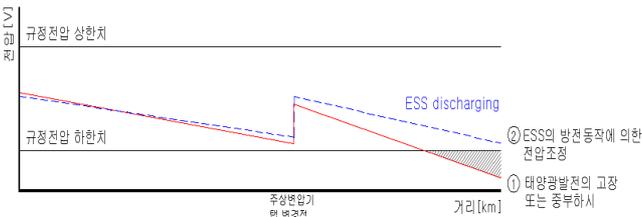
2.1 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 기존의 단방향 조류가 아닌 역조류에 의해 양방향으로 전력의 흐름이 발생하게 된다. 태양광전원에 의해 발생하는 양방향 조류는 배전계통의 전압상승 및 강하와 같은 문제를 발생시키며, 전력품질 및 전력신뢰도를 저하시킨

다. 특히, 역조류에 의한 수용가의 과전압현상으로 인해 태양광전원의 배전계통 수용성이 제한되고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 관점에서 ESS의 운용이 필요하다. ESS는 양방향으로 전력을 공급할 수 있는 분산자원으로, 충전 및 방전동작을 제어하여 배전계통의 전압 변동성에 대응할 수 있다. 따라서, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안은 그림 1과 같다. 여기서, 그림 1의 (a)는 태양광전원의 역조류에 의해 수용가의 과전압 현상이 발생하는 경우, ESS의 충전동작으로 수용가전압이 표준전압 범위 이내로 유지될 수 있음을 나타낸 것이다. 또한, 그림 1의 (b)는 태양광전원의 일시적인 고장, 또는 배전계통의 중부하에 의해 수용가의 저전압현상이 발생하는 경우, ESS의 방전동작으로 해결할 수 있음을 나타낸 것이다.



(a) 수용가 과전압현상 발생 시 ESS의 충전동작



(b) 수용가 저전압현상 발생 시 ESS의 방전동작 <그림 1> 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 운용 방안

2.2 수용성 향상을 위한 ESS 운용 알고리즘

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 수용가의 과전압현상이 발생할 수 있어, 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 운용알고리즘을 제시한다. 이에 대한 자세한 절차는 다음과 같다.

[STEP 1] 배전계통의 전체 수용가에 대하여, 최대수용가전압($V_{max}(t)$) 및 최소수용가전압($V_{min}(t)$)을 산정한다.

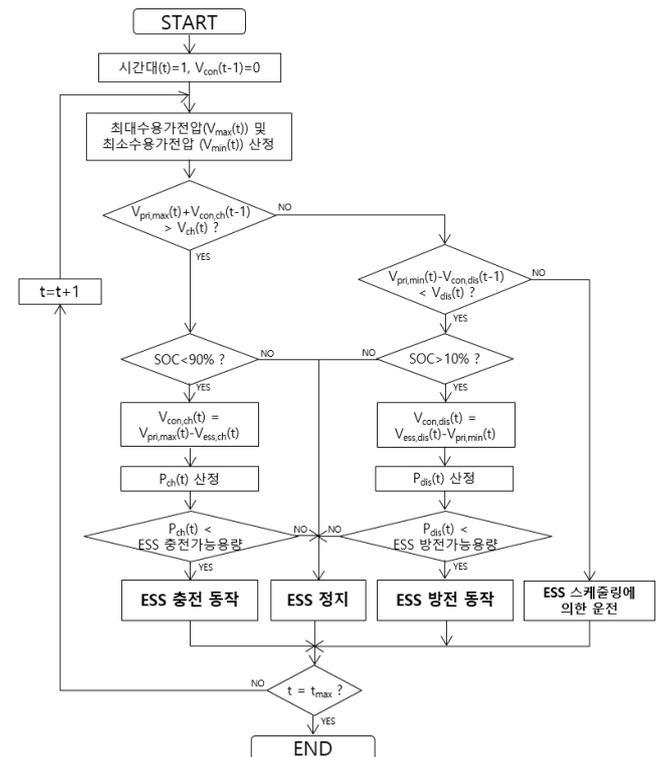
[STEP 2] 최대수용가전압을 고압측으로 환산한 값

($V_{pri,max}(t)$)이 ESS의 충전동작전압($V_{ch}(t)$) 보다 큰 경우, ESS의 SOC가 90% 미만이면 ESS의 전압조정범위($V_{con,ch}(t)$) 및 kW 충전용량($P_{ch}(t)$)을 산정한다. 또한, 산정된 kW 충전용량($P_{ch}(t)$)이 ESS의 충전가능용량보다 작은 경우 ESS는 충전동작을 수행하며, 충전가능용량보다 큰 경우 ESS는 정지한다. 한편, ESS의 SOC가 90% 초과인 경우에도 ESS는 정지한다.

[STEP 3] 최소수용가전압을 고압측으로 환산한 값($V_{pri,min}(t)$)이 ESS의 방전동작전압($V_{dis}(t)$)보다 작은 경우, ESS의 SOC가 10%를 초과한 상태이면 ESS의 전압조정범위($V_{con,dis}(t)$) 및 kW 방전용량($P_{dis}(t)$)을 산정한다. 또한, 산정된 kW 방전용량($P_{dis}(t)$)이 ESS의 방전가능용량보다 작은 경우 ESS는 방전동작을 수행하며, 큰 경우 ESS는 정지한다. 한편, ESS의 SOC가 10% 미만인 경우에도 ESS는 정지한다.

[STEP 4] 모든 수용가전압이 규정전압 범위를 만족하는 경우, ESS는 미리 정해진 스케줄에 따라, 규정전압 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 충방전동작을 수행한다. 또한, 전체 시간대에 대하여 상기의 절차를 반복하여 ESS를 운용한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



<그림 2> 수용성 향상을 위한 ESS 운용 알고리즘

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 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref-d} = (Kp + \frac{K_i}{s})(V_{DC-d}^* - V_{DC-d}) \quad (1)$$

$$I_{ref-q} = (Kp + \frac{K_i}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \quad (2)$$

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

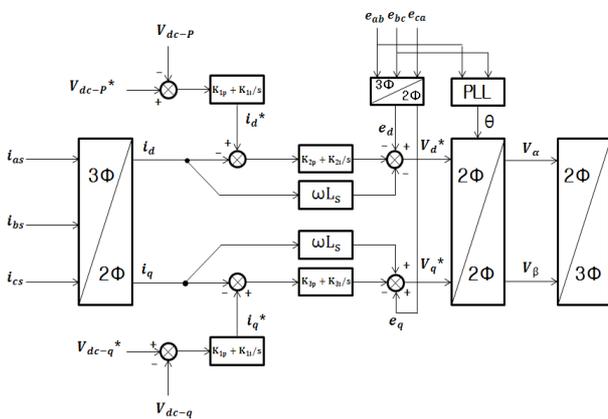
또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 ESS를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 ESS를 방전시키기 위하여, 전류 제어 알고리즘에 적용하여 인버터 출력을 위한 d-q축 전압을 구하면, 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(Kp + \frac{K_i}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \quad (3)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(Kp + \frac{K_i}{s}) - I_d \times \omega L \quad (4)$$

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

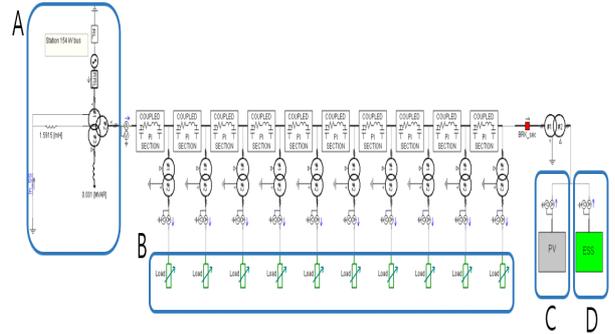
따라서, 상기의 식 (3) 및 식 (4)에 의하여 정전류원으로 충·방전을 수행할 수 있는 ESS를 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 3] ESS 모델링

3.2 전체 배전계통 모델링

ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 4와 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 4] 전체 배전계통 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되었을 경우, ESS의 충방전 운용에 의한 수용가전압의 특성을 비교·분석하기 위해 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 10개 구간으로 구성하고, 1번~6번 구간의 선종은 ACSR-160[mm²], 7번~10번 구간의 선종은 ACSR-95[mm²]로 상정한다. 한편, 주상변압기 1차측 탭은 1~5구간은 13,200탭, 6~10구간은 12,600탭을 적용한다.

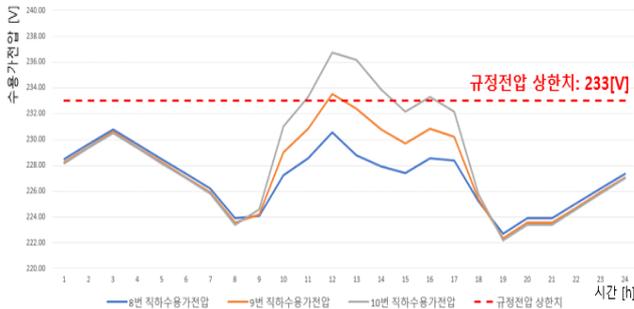
[표 1] 시뮬레이션 조건

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	1	0.1	0.045	0.95	13200
5	0.18	0.39	4	0.4	0.18	0.95	13200
6	0.18	0.39	3	4	1.8	0.95	12600
7	0.4	0.48	5	1.5	0.675	0.95	12600
8	0.4	0.48	7	0.25	0.113	0.95	12600
9	0.4	0.48	7	0.15	0.068	0.95	12600
10	0.4	0.48	7	0.1	0.045	0.95	12600

한편, 태양광전원의 연계용량은 3[MW]로 상정하며, 연계구간은 수용가의 과전압현상이 가장 빈번하게 발생할 수 있는 선로 말단지점으로 상정한다. 또한, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 도입구간도 10번 구간으로 상정한다.

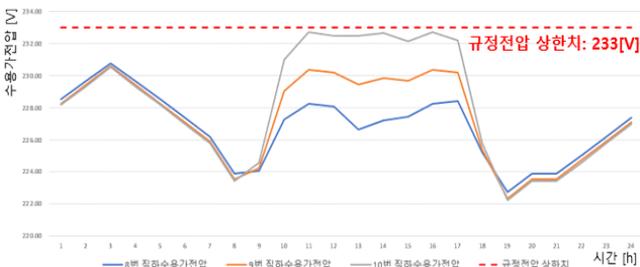
4.2 ESS의 운용에 의한 수용성 특성 분석

여기서는 3[MW]의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, ESS의 운용에 의한 수용가전압의 특성을 분석한다. 먼저, ESS를 도입하지 않은 경우, 8번~10번 구간의 직하수용가전압 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 이 그림에서와 같이, 3[MW]의 태양광전원이 연계되면 선로말단의 수용가전압이 과전압현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 확인하였다.



[그림 5] 3[MW]의 태양광전원 연계시 수용가전압 특성

따라서, 제안한 알고리즘에 따라 ESS를 운용하는 경우, 8번~10번 구간의 직하수용가전압 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 이 그림에서와 같이, 3[MW]의 태양광전원이 연계되어도, 모든 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지됨을 확인하였다. 따라서, 수용가의 과전압현상 발생 시, ESS의 충전동작으로 인하여 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되어 태양광전원의 수용성이 향상됨을 알 수 있었다.



[그림 6] ESS의 운용에 의한 수용가전압 특성

한편, 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키기

위한 ESS의 도입용량은 표 2와 같다. 여기서, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 도입용량은 0.7[MW]/1.7[MWh]로 선정됨을 확인하였다.

[표 2] 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 도입용량

과전압 발생 시간 [h]	과전압 발생 구간	ESS 연계 전 최대 수용가 전압 [V]	ESS 연계 후 최대 수용가 전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
11	10	233.3	232.9	0.1	1.7
12	9~10	236.8	232.8	0.7	
13	10	236.2	232.9	0.6	
14	10	233.9	232.9	0.2	
16	10	233.3	232.8	0.1	

5. 결 론

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 운용방안을 제안하였다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안하였다. 이를 바탕으로, ESS의 충·방전 운용에 따른 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 방안이 따라 ESS를 운용하는 경우, 수용가의 과전압 현상을 해결하여 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(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.