

ESS를 고려한 태양광전원의 배전계통 수용성 평가알고리즘에 관한 연구

이세연*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:seyeonlee@kopo.ac.kr

Evaluation Algorithm for Hosting Capacity of PV System Using ESS in Distribution Systems

Se-Yeon Lee*, Dae-Seok Rho*

*Korean University of Technology and Education

요 약

최근, 정부의 녹색성장 및 탄소중립 정책에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지전원을 확대하는 보급 사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하되어 보급이 지연될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위하여, 전기저장장치(energy storage system, ESS)에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘을 제시한다. 즉, 배전계통의 다양한 운용시나리오에 기반하여 수용가전압을 규정전압 이내로 유지시킬 수 있는 ESS의 적정용량을 산정하고, 태양광전원의 수용성을 평가한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 및 SVR, 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, SVR의 운용방식에 따라 ESS의 적정용량을 산정하여 태양광전원의 수용성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근, 정부는 탈원전 및 미세먼지 대응, 온실가스 감축을 위해 신재생에너지 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 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 이러한 배경으로, ESS 및 SVR(step voltage regulator, SVR)을 도입하여 대용량 태양광전원의 배전계통 연계에 의한 수용가의 과전압현상을 해결하고, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘을 제시한다. 구체적으로, 태양광전원의 연계용량, SVR의 설치 유·무 및 운용방식 등의 다양한 운용시나리오에 기반하여 수용가전압을 규정전압 이내로 유지시킬 수 있는 ESS의 적정용량을 산정하고, 태양광전원의 수용성을 평가한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여,

ESS와 SVR, 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안한다. 이를 바탕으로, SVR의 운용방식에 따라 ESS의 적정용량을 산정하여 태양광전원의 수용성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 연계용량 및 연계구간에 따라 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘을 제시한다. 이에 대한 자세한 평가절차는 다음과 같다.

[Step 1] 선종 및 공장, 부하량, 태양광전원 연계용량 및 구간, ESS의 연계구간, SVR 위치, LDC정정치, 주상변압기 탭전압 등의 배전계통 데이터를 입력한다. 또한, 배전계통 운용방식을 초기값인 SVR이 미설치된 경우로 설정한다.

[Step 2] 시뮬레이션 시간대(t)를 초기값으로 설정한다.

[Step 3] 수용가구간($s_c(n)$)을 초기값으로 설정한다.

[Step 4] 모든 구간의 직하수용가전압($V_{fc,s_c(n)}(t)$)을 계산하고, 최대 직하수용가전압($V_{fc,max}(t)$)을 산정한다.

[Step 5] [Step 4]에서 산정한 최대 직하수용가전압($V_{fc,max}(t)$)이 규정전압 범위의 상한치($V_{upperlimit}$)를 벗어나면, 식 (1)~식 (3)에 따라 ESS의 kW 적정용량을 산정한다. 여기서, 식 (1)은 ESS가 보상해야 하는 전압($V_{con}(t)$)으로 최대직하수용가전압을 고압측으로 환산한 값($V_{pri,max}(t)$)과 ESS의 충전동작전압(V_{ch})의 차로 나타낼 수 있다. 또한, 식 (2)는 ESS 전류의 유효분($I_{ESS,rc}(t)$)으로서, 식 (1)의 보상전압을 선로의 저항으로 나눈 값이다. 따라서, ESS의 kW 적정용량($P_{ESS}(t)$)은 식 (3)과 같이 최대직하수용가전압을 고압측으로 환산한 값과 전류의 유효분을 곱하여 산정한다.

$$V_{con}(t) = V_{pri,max}(t) - V_{ch} \quad (1)$$

$$I_{ESS,rc}(t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{i=0}^n (R_i \cdot L_i)} \quad (2)$$

$$P_{ESS}(t) = 3 \cdot V_{pri,max}(t) \cdot I_{ESS,rc}(t) \quad (3)$$

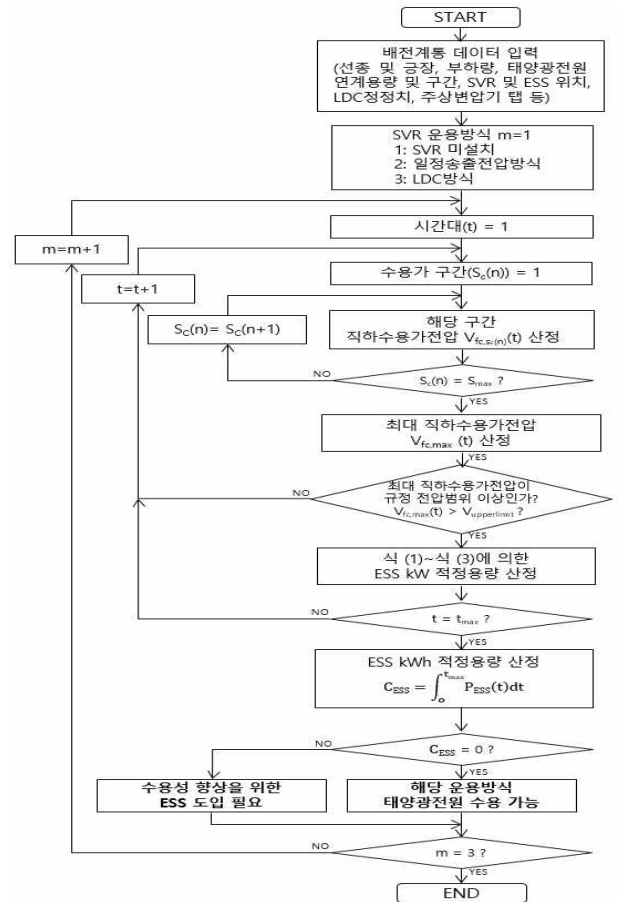
여기서, $V_{con}(t)$: ESS의 전압조정범위[V], $V_{pri,max}(t)$: 규정치를 벗어난 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산한 값[V], V_{ch} : ESS의 충전 동작전압[V], $I_{ESS,rc}(t)$: ESS 전류의 유효분[A], R_i : i번째 구간의 선로저항[Ω], L_i : i번째 구간의 선로 공장[km], $P_{ESS}(t)$: ESS의 kW 적정용량[kW]

[Step 6] 전체 시간대(t_{max})에 대하여, [Step 5]에서 구한 ESS의 kW 적정용량($P_{ESS}(t)$)을 적분하여 ESS의 kWh 적정용량(C_{ESS})을 산정한다.

[Step 7] ESS의 kWh 적정용량(C_{ESS})을 비교하여, 해당 배전계통 운용방식에 따른 태양광전원의 수용성을 평가한다.

[Step 8] 배전계통 운용방식을 다음 방식으로 설정하여 [Step 3]으로 돌아간다. 또한, 상기의 절차를 반복하여, SVR의 일정송출전압방식 및 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성을 평가한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 1과 같다.



[그림 1] ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘

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 (4)와 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref-d} = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-d}^* - V_{DC-d}) \quad (4)$$

$$I_{ref-q} = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \quad (5)$$

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

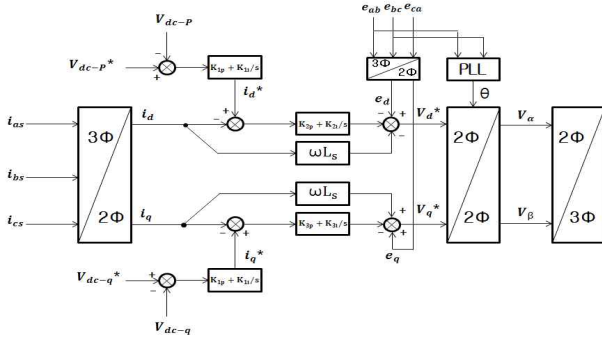
또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 ESS를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 ESS를 방전시키기 위하여, 전류제어 알고리즘에 적용하여 인버터 출력을 위한 d-q축 전압을 구하면, 식 (6)과 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \quad (6)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_d \times \omega L \quad (7)$$

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

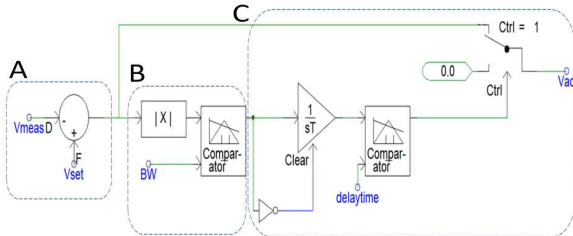
따라서, 상기의 식 (6) 및 식 (7)에 의하여 정전류원으로 충방전을 수행할 수 있는 ESS를 모델링하면 그림 2와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 2] ESS 모델링

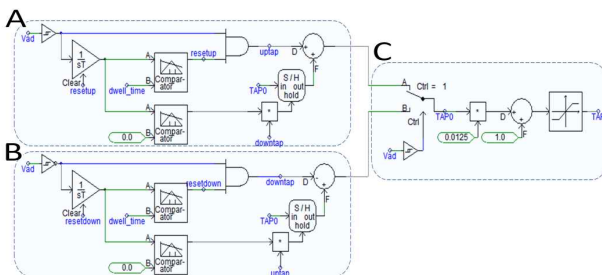
3.2 SVR 모델링

SVR의 제어부를 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 목표로 하는 전압(V_{set})과 SVR의 2차측 전압(V_{means})의 오차를 구하는 것이고, B부분은 오차에 대한 불감대폭(BW)의 범위를 벗어난 값인지 판정하는 것이다. C부분에서는 오차가 시지연동안 지속되면 다음 단계로 수행하고, 지속되지 않으면 초기치로 정정한다.



[그림 3] SVR의 제어부 모델링

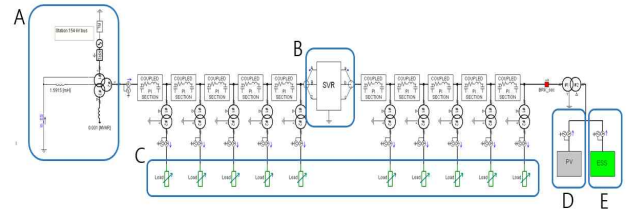
상기에서 구한 오차를 통해, SVR의 탭 동작제어부를 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 오차가 양의 값으로 탭 업 동작을 수행하는 것이고, B부분은 오차가 음의 값으로 탭 다운 동작을 수행하는 것이다. 또한, C부분은 최종적으로 SVR의 탭 위치를 선택하는 것이다.



[그림 4] SVR의 탭 동작 제어 모델링

3.3 전체 배전계통 모델링

SVR 및 ESS, 태양광전원 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서 A 부분은 배전용 변전소, B부분은 SVR, C부분은 수용가 부하, D부분은 태양광전원, E 부분은 ESS를 나타낸 것이다.



[그림 5] 전체 배전계통 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서는 태양광전원의 연계용량, SVR의 설치 유·무 및 운용방식 등의 다양한 운용시나리오에 기반하여, ESS의 적정용량을 산정하여 태양광전원의 수용성을 비교·분석하기 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, SVR이 설치되지 않은 경우의 주상변압기 1차측 탭은 1~5구간은 13,200탭, 6~10구간은 12,600탭을 적용한다. 또한, SVR이 설치되는 경우, 주상변압기 1차측 탭은 13,200탭을 전체 구간에 적용한다.

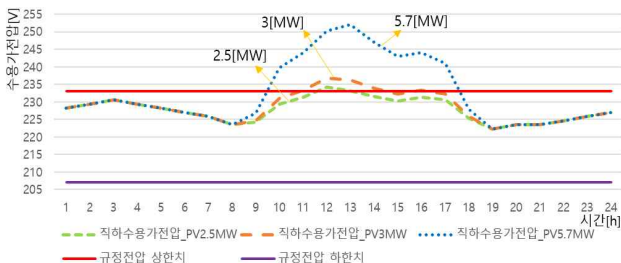
[표 1] 시뮬레이션 조건

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

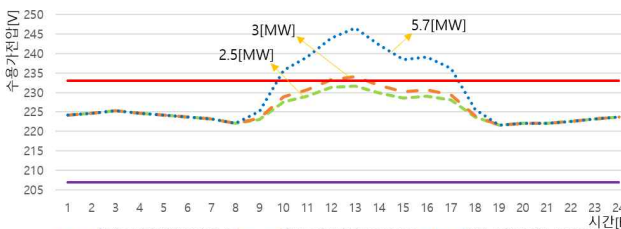
한편, 태양광전원의 연계용량은 2.5[MW], 3[MW], 5.7[MW]로 상정하며, 연계구간은 수용가의 과전압현상이 가장 빈번하게 발생할 수 있는 선로 말단지점으로 상정한다. 또한, 수용성 향상을 위한 ESS의 도입구간도 10번 구간으로 상정한다.

4.2 ESS에 의한 수용성 평가

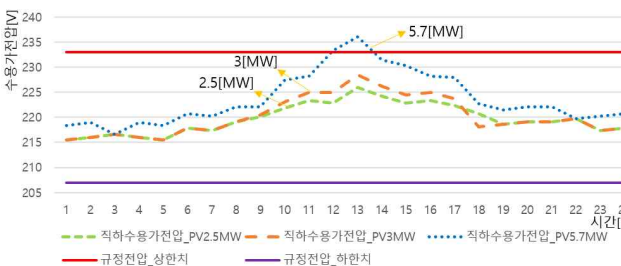
여기서는 SVR의 운용방식에 따른 태양광전원의 연계용량별 수용가전압의 특성 및 ESS의 적정용량을 산정한다. 먼저, 전체 구간 중 전압이 가장 높은 10번 구간의 직하수용가전압에 대하여, 태양광전원의 연계용량별 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6의 (a)와 같이, 고압배전선로에 SVR이 설치되지 않은 경우 2.5[MW] 이상의 태양광전원이 연계되면 선로말단의 수용가전압이 과전압현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 확인하였다. 또한, 그림 6의 (b)와 같이, 고압배전선로에 SVR이 설치되어 일정송출전압방식으로 운용되는 경우 3[MW] 이상의 태양광전원이 연계되면 수용가전압에 과전압현상이 발생되어 수용성이 저하됨을 알 수 있었다. 또한, 그림 6의 (c)와 같이, LDC방식으로 운용되는 경우 5.7[MW]의 태양광전원이 연계되면, 수용가전압이 과전압현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 알 수 있었다.



(a) SVR 미설치 시 수용가 전압 특성



(b) 일정송출전압방식의 SVR 운용 시 수용가 전압 특성



(c) LDC방식의 SVR 운용 시 수용가 전압 특성

[그림 6] SVR의 운용방식에 따른 수용가 전압 특성

따라서, 상기에서 제안한 알고리즘에 따라 수용가의 규정전압 범위를 만족시키는 ESS의 적정용량을 산정하면 표 2와 같다. 여기서, 태양광전원의 연계용량이 2.5[MW]이면 SVR이 미설치된 경우, ESS의 적정용량은 0.2[MW]/0.3[MWh]이지만, SVR을 설치하여 일정송출전압방식 또는 LDC방식으로 운용하는 경우

ESS의 도입이 필요하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 태양광전원의 연계용량이 3[MW]이면 SVR이 미설치된 경우 ESS의 적정용량은 0.7[MW]/1.7[MWh]이고, SVR을 설치하여 일정송출전압방식으로 운용할 경우 0.3[MW]/0.4[MWh]로 감소되며, LDC방식으로 운용할 경우 ESS의 도입이 필요하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 태양광전원의 연계용량이 5.7[MW]이면 ESS의 적정용량은 SVR이 미설치된 경우 3.3[MW]/16.7[MWh]이고, SVR을 일정송출전압방식으로 운용할 경우 3[MW]/12.5[MWh]로 감소되며, SVR을 LDC방식으로 운용할 경우 0.7[MW]/0.8[MWh]로 더욱 감소됨을 알 수 있었다.

[표 2] SVR의 운용방식에 따른 ESS의 필요용량

PV 연계 용량 [MW]	ESS 필요용량					
	SVR 미설치		SVR 설치 (일정송출전압)		SVR 설치 (LDC방식)	
	kW [MW]	kWh [MWh]	kW [MW]	kWh [MWh]	kW [MW]	kWh [MWh]
2.5	0.2	0.3	0	0	0	0
3	0.7	1.7	0.3	0.4	0	0
5.7	3.3	16.7	3	12.5	0.7	0.8

5. 결 론

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위하여, SVR 및 ESS에 의한 태양광전원의 수용성 평가알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 배전계통에 SVR을 설치할 경우, 설치하지 않은 경우보다 태양광전원의 역조류에 의한 수용가의 과전압현상이 어느 정도 해소되어 ESS의 적정용량이 감소되며, 이에 따라 태양광전원의 수용성이 향상됨을 확인하였다.

(2) SVR을 LDC방식으로 운용할 경우, 일정송출전압방식으로 운용하는 경우 보다 수용가전압을 안정적으로 유지할 수 있어 ESS의 적정용량이 감소되며, 이에 따라 태양광전원의 수용성이 향상됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 노대석 외 5인, “고압배전선로용 선로전압조정장치(SVR)의 최적 도입 방안에 관한 연구”, 전기학회논문지, 제 53A권 제11호, pp. 581-587, 11월, 2004년.