

태양광전원과 ESS가 연계된 LVDC 배전망의 전압관리 방안에 관한 연구

장형안*, 호삼*, 김혜원*, 박찬욱*, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail: wkdguddks@koreatech.ac.kr

A Study on Voltage Regulation Method in LVDC System with PV System and ESS

Hyeong-An Jang, Hossam S. Mohamed, Hye-Won Kim,
Chan-Wook Park, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

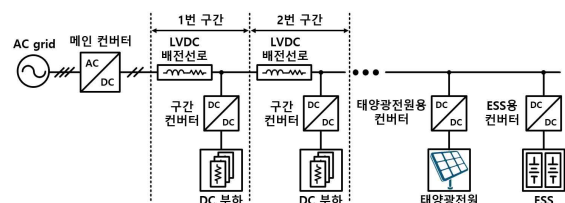
최근, 배전선로에 연계된 신재생에너지의 용량이 급속도로 증가함에 따라, 이를 해결할 수 있는 LVDC 배전망에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, LVDC 배전망에 많은 용량의 태양광전원이 연계되면, 태양광전원의 발전량이 급증하는 낮 시간대에 수용가의 과전압 현상이 발생할 수 있고, 전력 소비가 급증하는 피크부하 시간대에 저전압 현상이 나타날 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 현상과 피크부하시 전압강하에 의한 저전압 현상을 해소할 수 있는 LVDC 배전망의 전압관리 방안을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, ESS부 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, LVDC 배전망에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 본 논문에서 제안한 전압관리 방안을 통해 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

2050 탄소중립 선언과 제 10차 전력수급기본계획에 따라 신재생에너지 전원의 설치가 급증하고 있지만, 입지선정 및 계통접속에 따른 문제로 인하여 신재생에너지 전원의 접속대기 용량이 지속적으로 증가하고 있다. 이를 해결하기 위한 방안 중의 하나로 LVDC 배전망에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, LVDC 배전망에 많은 용량의 태양광전원이 연계되면, 태양광전원의 발전량이 급증하는 낮 시간대에 수용가의 과전압 현상이 발생할 수 있고, 전력 소비가 급증하는 피크부하 시간대에 수용가의 저전압 현상이 나타날 수 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 충·방전을 통해 LVDC 배전망의 수용가 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 전압관리 방안을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, ESS부 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 태양광전원과 ESS가 연계된 LVDC 배전망의 전압특성을 분석한 결과, 수용가에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 전압관리 방안에 의해 산정된 ESS의 충·방전을 통해 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 적정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

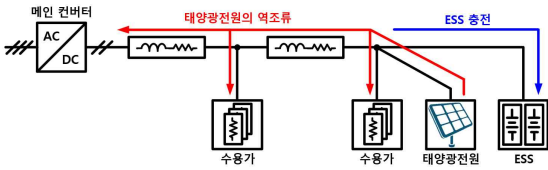
2. 태양광전원과 ESS가 연계된 LVDC 배전망의 전압관리 방안

일반적으로, LVDC 배전망은 방사형, 다중터미널, BTB(back-to-back) 등의 형태로 구분되는데, 방사형 구조는 기존의 AC 배전망의 형태와 유사하여 실현 가능성과 경제성 측면에서 가장 유망하다고 평가되고 있다. 여기서, 태양광전원과 ESS가 연계된 방사형 LVDC 배전망은 그림 1과 같이 메인 컨버터, 구간 컨버터, LVDC 배전선로, DC 부하, 태양광전원, ESS 등으로 구성된다. 먼저, 메인 컨버터는 계통측의 AC 전압을 DC로 변환하여 간선에 공급하고, 구간 컨버터는 간선의 DC 전압을 강압하여 수용가에 공급하며, LVDC 배전선로는 AC 배전선로보다 전압과 전류용량의 상승으로 인해 더 많은 용량의 태양광전원을 연계할 수 있다. 하지만, LVDC 배전망은 태양광전원의 역조류 현상에 의한 수용가의 과전압 현상과 피크부하시 전압강하로 인한 저전압 현상이 발생할 수 있다.

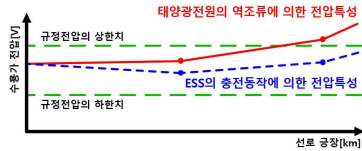


[그림 1] LVDC 배전망의 구성

즉, LVDC 배전망에서 수용가에 과전압 및 저전압 현상이 발생하면 경우, 이를 해결하기 위한 전압관리 방안은 각각 그림 2와 그림 3과 같다. 먼저 그림 2의 (a)는 태양광전원에 의한 역조류를 저감하기 위한 ESS의 충전동작이며, (b)는 ESS의 충전동작에 의해 수용가의 전압이 규정전압 범위 이내로 유지되는 특성을 나타낸다. 또한, 그림 3의 (a)는 피크부하에 의한 전압강하를 저감하기 위한 ESS의 방전동작이며, (b)는 ESS의 방전동작에 의해 수용가의 전압이 규정전압 범위 이내로 유지되는 특성을 나타낸다.

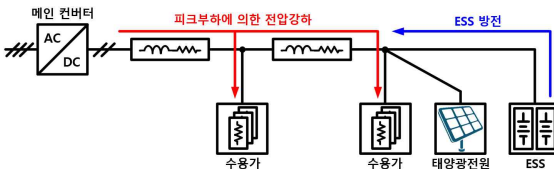


(a) 태양광전원에 의한 역조류의 저감을 위한 ESS의 충전동작

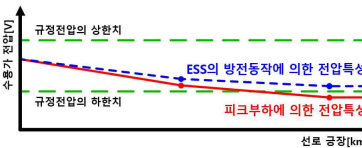


(b) ESS의 충전동작에 의한 수용가의 전압특성

[그림 2] 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 현상의 전압관리 방안



(a) 피크부하에 의한 전압강하의 저감을 위한 ESS의 방전동작



(b) 저전압 현상 발생시 ESS의 방전동작에 의한 전압특성

[그림 3] 피크부하에 의한 저전압 현상의 전압관리 방안

한편, 가장 큰 수용가의 전압과 가장 작은 수용가의 전압을 산정하면 각각 식 (1)과 식 (2)와 같다. 여기서, 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 또는 피크부하에 의한 저전압 현상이 발생할 경우, ESS는 식 (3)에 의해 ESS의 동작모드를 결정하는데, 가장 큰 수용가의 전압이 과전압 규정치보다 크면 충전을 수행하고, 가장 작은 수용가 전압이 저전압 규정치보다 작으면 방전을 수행하며, 그 외의 경우에는 ESS를 충·방전하지 않는다. 또한, ESS의 충·방전 동작을 통해 보상하는 전압의 크기는 식 (4)와 같으며, 충·방전에 의해 공급 및 소비되는 전류는 식 (5)와 같다. 따라서, ESS의 충·방전 용량은 식 (5)를 제공하여 수용가와 ESS 사이의 저항값을 곱하고, 식 (5)와 전압 규정치를 곱한 값을 합하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 LVDC 배전망의 과전압

및 저전압 현상을 해소할 수 있다.

$$V_{\max} = \max \left[V_{n-1} - R_n \frac{\sum_{n=k}^{\infty} P_{cus}(n) - \sum_{n=k}^{\infty} P_{DER}(n)}{V_{ch}} \right] \quad (1)$$

$$V_{\min} = \min \left[V_{n-1} - R_n \frac{\sum_{n=k}^{\infty} P_{cus}(n) - \sum_{n=k}^{\infty} P_{DER}(n)}{V_{dis}} \right] \quad (2)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } V_{\max} > V_{ch} \\ 1 & \text{if } V_{\min} < V_{dis} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{con} = \begin{cases} V_{\max} - V_{ch} & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{\min} - V_{dis}| & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{con} = \frac{V_{con}}{R_{line}} \quad (5)$$

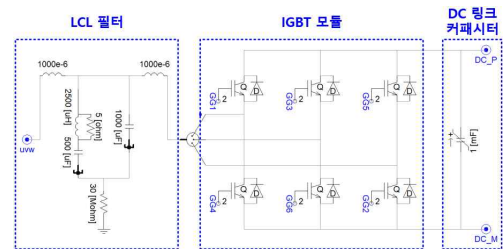
$$P_{ESS} = \begin{cases} I_{con} \times V_{ch} + (I_{con})^2 \times R_{bet} & \text{if } \delta(t) = -1 \\ I_{con} \times V_{dis} + (I_{con})^2 \times R_{bet} & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서, V_n : n번 구간의 수용가 전압, R_n : n번 구간의 선로 저항, V_{\max} : 가장 큰 수용가 전압, V_{\min} : 가장 작은 수용가 전압, $P_{cus}(n)$: n번 구간의 수용가 용량, $P_{DER}(n)$: n번 구간의 분산전원 투입용량, V_{ch} : 과전압 규정치, V_{dis} : 저전압 규정치, $\delta(t)$: ESS의 충·방전 모드, V_{con} : ESS의 보상전압, I_{con} : ESS의 충·방전 전류, R_{line} : 규정치를 가장 크게 벗어난 수용가와 ESS의 연계지점까지의 선로저항 중 작은 값, P_{ESS} : ESS의 충·방전 용량, R_{bet} : 규정치를 가장 크게 벗어난 수용가와 ESS 연계지점 사이의 선로저항

3. 태양광전원과 ESS가 연계된 10kW, 400V급 LVDC 배전망의 모델링

3.1 메인 컨버터부

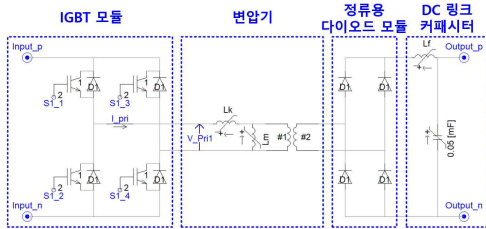
메인 컨버터부는 그림 4와 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, 메인 컨버터는 정전압 제어방식을 통해 3상의 AC 380[V]를 DC 400[V]로 변환한다.



[그림 4] 메인 컨버터부 모델링

3.2 구간 컨버터부

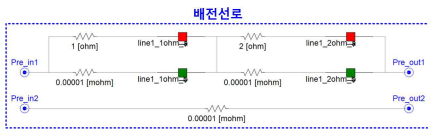
구간 컨버터부는 그림 5와 같이, full-bridge 형태의 IGBT 모듈과 변압기, 정류용 다이오드 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, 구간 컨버터는 정전압 제어방식을 통해 DC 400[V]를 200[V]로 변환한다.



[그림 5] 구간 컨버터부 모델링

3.3 배전선로부

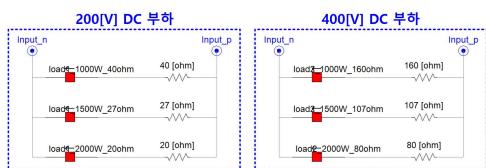
배전선로부는 그림 6과 같이, 1번 구간과 2번 구간의 선로저항을 각각 1[Ω]과 2[Ω]으로 가변하여, 최대 25[%]의 전압강하를 모의할 수 있도록 구성한다.



[그림 6] 배전선로부 모델링

3.4 DC 부하부

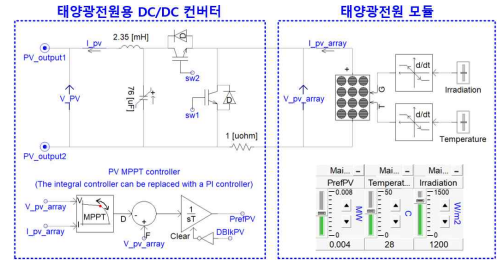
DC 부하부는 그림 7과 같이, 400[V] DC 부하, 200[V]급 DC 부하로 구성된다. 여기서, 400[V] DC 부하와 200[V]급 DC 부하는 각각 1,000[W], 1,500[W], 2,000[W]의 저항을 조합하여, 1000[W] ~ 4,500[W]로 가변할 수 있도록 구성한다.



[그림 7] DC 부하부 모델링

3.5 태양광전원부

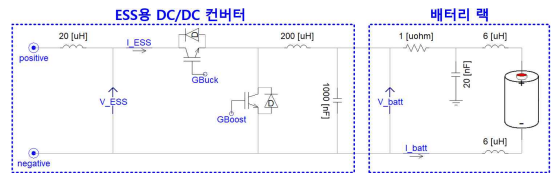
태양광전원부는 그림 8과 같이, boost 형태의 태양광전원용 DC/DC 컨버터와 태양광전원 모듈로 구성된다. 여기서, 태양광전원용 DC/DC 컨버터는 태양광전원 모듈의 출력 전압과 전류를 바탕으로 MPPT 제어방식을 통해 최대 전력점을 추종한다.



[그림 8] 태양광전원부 모델링

3.6 ESS부

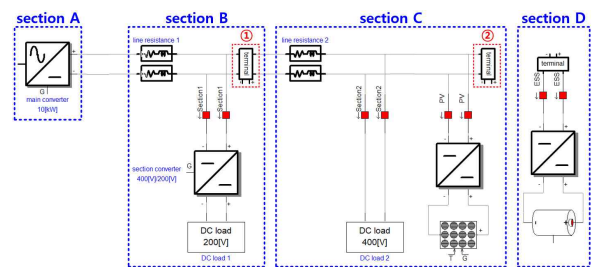
ESS는 그림 9와 같이, buck-boost 형태의 ESS용 DC/DC 컨버터와 배터리 랙으로 구성된다. 여기서, ESS용 DC/DC 컨버터는 정출력 제어방식을 통해 충·방전 동작을 수행하여, LVDC 배전망의 과전압, 저전압 현상을 해소한다.



[그림 9] ESS부 모델링

3.7 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, section A는 메인 컨버터부, section B는 배전선로부와 구간 컨버터부, 200[V] DC 부하로 구성된 1번 구간, section C는 배전선로부와 400[V] DC 부하, 태양광전원부로 구성된 2번 구간, section D는 ESS부를 나타낸다. 또한, section B와 section C의 터미널 ①과 ②는 각각 중간지점, 말단지점을 상징하여 ESS부의 연계지점을 변동할 수 있도록 구성한다.



[그림 10] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

태양광전원과 ESS가 연계된 10kW, 400V급 LVDC 배전망의 전압관리 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 상기 그림 10의 모델링을 바탕으로 상정한다. 먼저, 과전압 상정 시나리오는 표 1과 같이, 태양광전원의 투입용량과 ESS의 연계지점을 고려하여 Case 1 ~ Case 4로 상정하고, 1번 구간 및 2번 구간의 선

로저항과 부하용량은 각각 $2[\Omega]$ 과 $1[\text{kW}]$ 를 적용한다. 또한, 저전압 상정 시나리오는 표 2와 같이, 부하용량과 ESS의 연계지점을 고려하여 Case 5 ~ Case 8로 상정하고, 1번 구간 및 2번 구간의 선로저항은 $2[\Omega]$ 을 적용한다. 한편, LVDC 배전망의 규정전압 범위는 $\pm 10[\%]$ 로 상정한다.

[표 1] LVDC 배전망의 과전압 상정 시나리오

Case	태양광전원 투입용량	ESS 연계지점	1번 및 2번 구간 선로저항	1번 및 2번 구간 부하용량
1	6[kW]	중간지점	2[Ω]	1[kW]
2		말단지점		
3	8[kW]	중간지점		
4		말단지점		

[표 2] LVDC 배전망의 저전압 상정 시나리오

Case	1번 및 2번 구간 부하용량	ESS 연계지점	1번 및 2번 구간 선로저항
5	3.5[kW]	중간지점	2[Ω]
6		말단지점	
7	4.5[kW]	중간지점	
8		말단지점	

4.2 과전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전망의 과전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 태양광전원의 투입용량에 따른 Case 1과 Case 3의 과전압 특성을 비교하면, 태양광전원이 연계된 2번 구간에 가장 큰 과전압이 발생하고, 투입용량이 증가할수록 과전압 현상이 심화됨을 알 수 있다. 또한, 상기의 식 (6)을 바탕으로 ESS의 적절한 용량을 산정하여 충전할 경우, Case 1 ~ Case 4의 과전압 현상을 해소할 수 있고, 동일한 태양광전원에 대하여 ESS의 연계지점이 말단지점에 근접할수록 충전용량이 작게 산정됨을 확인할 수 있다. 즉, LVDC 배전망의 과전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성을 평가한 결과, 태양광전원의 역조류에 의한 수용가의 과전압 현상이 규정전압 범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 전압관리 방안이 적절함을 알 수 있다.

[표 3] LVDC 배전망의 과전압 특성 및 전압관리 방안의 운용특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	ESS 충전시 1번 구간전압 [V]	ESS 충전시 2번 구간전압 [V]	ESS 충전용량 [kW]
1	417.9	440.6	417.0	439.8	0.2
2			417.5	439.8	0.1
3	426.0	456.8	407.4	439.3	4
4			417.5	439.8	2.1

4.3 저전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전망의 저전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성을 나타내면 표 4와 같다. 여기서, 1번 및 2번 구간의 부하용량에 따른 Case 5과 Case 7의 저전압 특성을 비교하면, 전압강하에 의해 2번 구간에 가장 큰 저전압이 발생하고, 부하용량이 증가할수록 저전압 현상

이 심화됨을 알 수 있다. 또한, 상기의 식 (6)을 바탕으로 ESS의 적절한 용량을 산정하여 방전할 경우, Case 5 ~ Case 8의 저전압 현상을 해소할 수 있고, 동일한 부하조건에 대하여 ESS의 연계지점이 말단지점에 근접할수록 방전용량이 작게 산정됨을 확인할 수 있다. 즉, LVDC 배전망의 저전압 현상에 대한 전압관리 방안의 운용특성을 평가한 결과, 전압강하에 의한 수용가의 저전압 현상이 규정전압 범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 전압관리 방안이 적절함을 알 수 있다.

[표 4] LVDC 배전망의 저전압 특성 및 전압관리 방안의 운용특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	ESS 방전시 1번 구간전압 [V]	ESS 방전시 2번 구간전압 [V]	ESS 방전용량 [kW]
5	360.0	339.5	380.5	361.1	3.5
6			370.9	360.6	1.7
7	346.0	317.9	387.6	362.8	6.9
8			368.1	360.6	3.2

5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 충·방전을 통해 LVDC 배전망의 수용가 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 전압관리 방안을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, LVDC 배전망에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 본 논문에서 제안한 전압관리 방안을 통해 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00409639, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 이창우 외 2명, “재생에너지 출력제한 최소화 에너지 믹스 및 저감 방안”, 조명·전기설비학회논문지, 33권, 제 12호, pp. 41-48, 2019.12.