

태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 LVDC 배전망의 전압특성에 관한 연구

장형안, 김윤호, 이민행, 김세진, 노대석*
한국기술교육대학교

e-mail: wkdguddks@koreatech.ac.kr

Operation Characteristics of Customer Voltage in LVDC System Considering Location of PV System and ESS

Hyeong-An Jang, Yun-Ho Kim, Min-Haeng Lee, Se-Jin Kim, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요 약

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 LVDC 배전망의 과전압과 저전압 현상을 해소시키기 위하여, 태양광전원과 전기저장장치를 연계한 LVDC 배전망의 구성을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, 전기저장장치부 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 전압특성을 분석한 결과, 태양광전원을 말단지점에 가까이 연계할수록 역조류에 의한 수용가의 과전압 현상이 크게 나타나고, 전기저장장치를 말단지점에 가까이 연계할수록 과전압 및 저전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다.

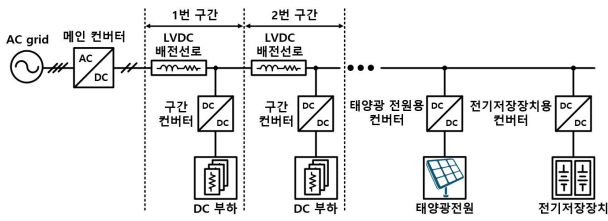
1. 서 론

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[1]. 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[2,3]. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 과전압과 저전압 현상을 해소시키기 위하여, 태양광전원과 전기저장장치를 연계한 LVDC 배전망의 구성을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, 전기저장장치부 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 전압특성을 분석한 결과, 태양광전원을 말단지점에 가까이 연계할수록 역조류에 의한 과전압 현상이 크게 나타나고, 전기저장장치를 말단지점에 가

까이 연계할수록 과전압 및 저전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다.

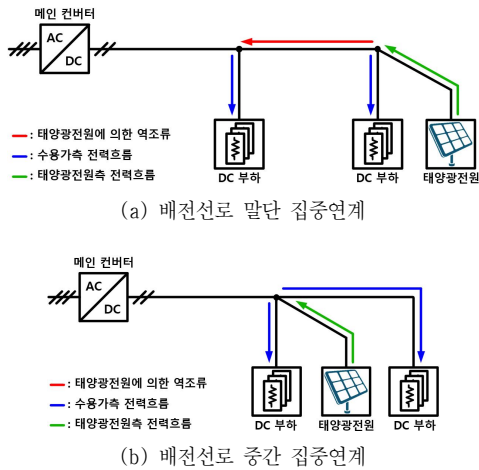
2. 태양광전원과 전기저장장치가 연계된 LVDC 배전망의 구성

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 전기저장장치가 연계된 방사형 LVDC 배전망은 그림 1과 같이 메인 컨버터, 구간 컨버터, LVDC 배전선로, DC 부하, 태양광전원, 전기저장장치 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 있어, 전기저장장치의 충·방전을 통해 이를 해결하는 방안이 제시되고 있다.



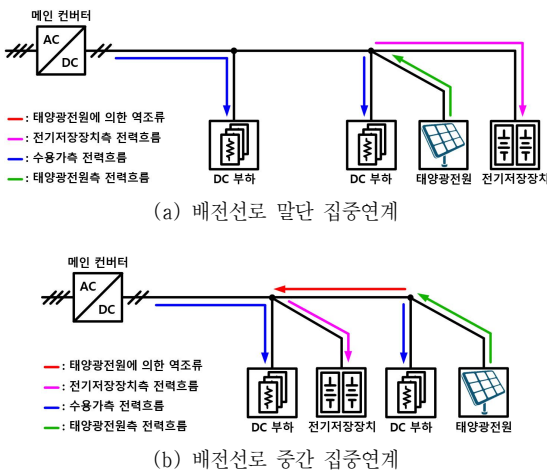
[그림 1] LVDC 배전망의 구성

먼저, 태양광전원의 연계지점에 따른 LVDC 배전망의 과전압 현상은 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2의 (a)는 배전선로의 말단에 연계한 태양광전원에 의해 역조류가 발생한 경우이며, 그림 2의 (b)는 태양광전원을 배전선로의 중간에 연계하여 역조류가 발생하지 않은 경우를 나타낸다.



[그림 2] 태양광전원의 연계지점에 따른 전력흐름 개념도

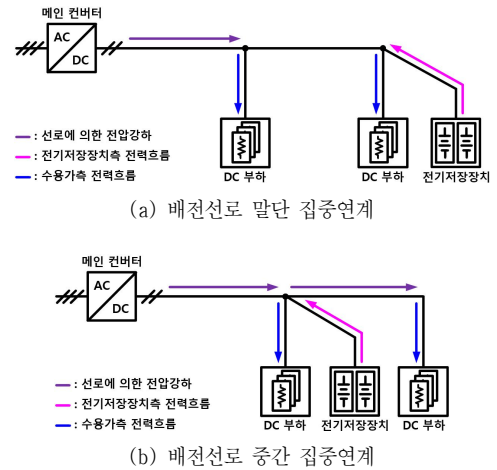
또한, 태양광전원의 연계로 과전압이 발생한 경우, 전기저장장치의 연계지점에 따른 충전시 전력흐름은 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3의 (a)는 배전선로의 말단에 연계한 전기저장장치에 의해 역조류가 발생하지 않은 경우이며, 그림 3의 (b)는 전기저장장치를 배전선로의 중간에 연계하여 역조류가 발생한 경우를 나타낸다.



[그림 3] 전기저장장치의 연계지점에 따른 충전시 전력흐름 개념도

한편, 피크부하시 전압강하로 인하여 저전압 현상이 발생한 경

우, 전기저장장치의 연계지점에 따른 방전시 전력흐름은 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4의 (a)는 배전선로의 말단에 연계한 전기저장장치에 의해 작은 용량의 전류가 전압강하를 발생시키는 경우이며, 그림 3의 (b)는 전기저장장치를 배전선로의 중간에 연계하여 비교적 큰 용량의 전류가 전압강하를 발생시키는 경우를 나타낸다. 즉, LVDC 배전망의 전압특성은 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 전력 흐름에 의해 변동될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 과전압과 저전압 현상을 해소하기 위하여, 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 수용가의 전압특성을 분석한다.

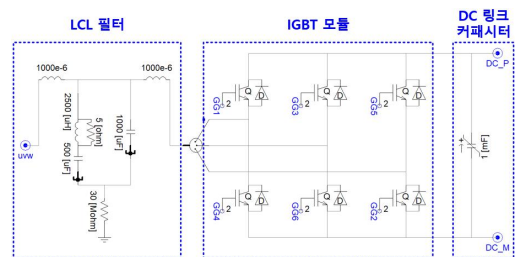


[그림 4] 전기저장장치의 연계지점에 따른 충전시 전력흐름 개념도

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

3.1 메인 컨버터부

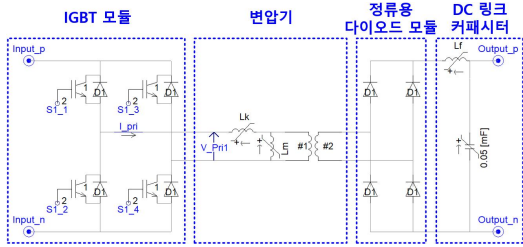
메인 컨버터부는 그림 5와 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, 메인 컨버터는 정전압 제어방식을 통해 3상의 AC 380[V]를 DC 400[V]로 변환한다.



[그림 5] 메인 컨버터부 모델링

3.2 구간 컨버터부

구간 컨버터부는 그림 6과 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 6] 구간 컨버터부 모델링

3.3 배전선로부

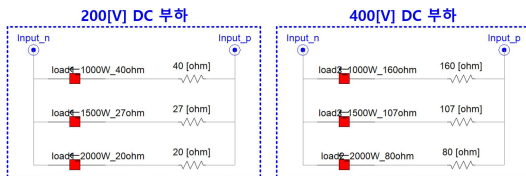
배전선로부는 그림 7과 같이, 1번 구간과 2번 구간의 선로저항을 1[Ω]과 2[Ω]으로 가변하여, 최대 20[%]의 전압강하를 모의할 수 있도록 구성한다.



[그림 7] 배전선로부 모델링

3.4 DC 부하부

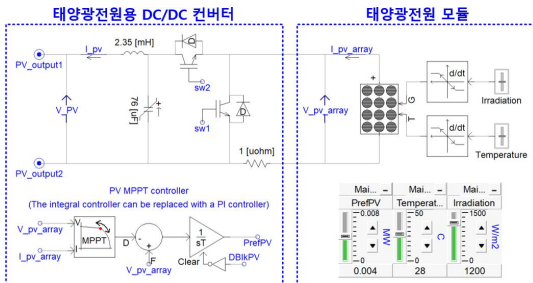
DC 부하부는 그림 8과 같이, 400[V] DC 부하, 200[V]급 DC 부하로 구성된다. 여기서, 400[V] DC 부하와 200[V]급 DC 부하는 각각 1,000[W], 1,500[W], 2,000[W]의 저항을 조합하여, 500[W] ~ 4,500[W]로 가변할 수 있도록 구성한다.



[그림 8] DC 부하부 모델링

3.5 태양광전원부

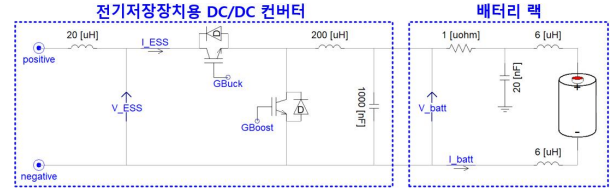
태양광전원부는 그림 9와 같이, boost 형태의 태양광전원용 DC/DC 컨버터와 태양광전원 모듈로 구성된다. 여기서, 태양광전원용 DC/DC 컨버터는 태양광전원 모듈의 출력 전압과 전류를 바탕으로 MPPT 제어방식을 통해 최대 전력점을 추종한다.



[그림 9] 태양광전원부 모델링

3.6 전기저장장치부

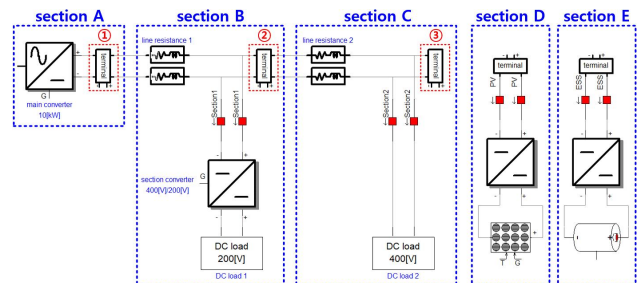
전기저장장치는 그림 10과 같이, buck-boost 형태의 전기저장장치용 DC/DC 컨버터와 배터리 팩으로 구성된다. 여기서, 전기저장장치용 DC/DC 컨버터는 정출력 제어방식을 통해 충·방전 동작을 수행하여, LVDC 배전망의 과전압, 저전압 현상을 해소한다.



[그림 10] 전기저장장치부 모델링

3.7 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, section A는 메인 컨버터부, section B는 배전선로부와 구간 컨버터부, 200[V] DC 부하로 구성된 1번 구간, section C는 배전선로부와 400[V] DC 부하로 구성된 2번 구간, section D는 태양광전원부, section E는 전기저장장치부를 나타낸다. 또한, section A, section B, section C의 터미널 ①, ②, ③은 각각 직하지점, 중간지점, 말단지점을 상정하여 태양광전원부 및 전기저장장치부를 연계한다.



[그림 11] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

태양광전원과 전기저장장치가 연계된 10kW, 400V급 LVDC 배전망의 전압특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 상기의 그림 11의 모델링을 바탕으로 상정한다. 먼저, 과전압 상정 시나리오는 표 1과 같이, 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점을 고려하여 Case 1 ~ Case 9로 상정하고, 1번 구간 및 2번 구간의 선로저항과 부하용량은 각각 2[Ω]과 1[kW]를 적용한다. 또한, 저전압 상정 시나리오는 표 2와 같이, 전기저장장치의 연계지점을 고려하여 Case 10 ~ Case 12로 상정하고, 1번 구간 및 2번 구간의 선로저항 및 부하용량은 각각 2[Ω]과 4.5[kW]를 적용한다.

[표 1] LVDC 배전계통의 과전압 상정 시나리오

Case	태양광전원 연계지점	전기저장장치 연계지점	태양광전원 용량	전기저장장치 충전용량
1	직하지점	직하지점	8[kW]	2[kW]
2		중간지점		
3		말단지점		
4	중간지점	직하지점		
5		중간지점		
6		말단지점		
7	말단지점	직하지점		
8		중간지점		
9		말단지점		

[표 2] LVDC 배전계통의 저전압 상정 시나리오

Case	전기저장장치 연계지점	전기저장장치 방전용량
10	직하지점	2[kW]
11	중간지점	2[kW]
12	말단지점	2[kW]

4.2 LVDC 배전망의 과전압 특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전망의 과전압 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 태양광전원이 직하지점에 연계된 Case 1 ~ Case 3에서 과전압 현상이 발생하지 않음을 알 수 있으며, 전기저장장치를 태양광전원 보다 말단측에 연계하여 충전동작을 할 경우, 저전압 현상이 심화됨을 알 수 있다. 또한, 태양광전원이 중간지점 및 말단지점에 연계된 Case 4 ~ Case 9를 통해, 태양광전원 연계지점까지의 선로저항이 커질수록 과전압 현상이 심화됨을 알 수 있으며, 전기저장장치를 태양광전원 보다 말단측에 연계하여 충전동작을 할 경우, 과전압 현상이 해소됨을 알 수 있다. 즉, LVDC 배전망은 태양광전원을 말단지점에 가까이 연계할수록 역조류에 의한 과전압 현상이 크게 나타나고, 전기저장장치를 말단지점에 가까이 연계할수록 과전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다.

[표 3] LVDC 배전망의 과전압 특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	전기저장장치 충전시 1번 구간전압 [V]	전기저장장치 충전시 2번 구간전압 [V]
1	388.6	383.8	388.6	383.8
2			378.5	373.8
3			378.1	362.6
4	426	420.7	426	420.7
5			417.5	412.3
6			417.2	402.3
7	423.2	452.8	423.2	452.8
8			414.6	445
9			415.8	437.7

4.3 LVDC 배전망의 저전압 특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전망의 저전압 특성을 나타내면 표 4와 같다. 여기서, 전기저장장치가 직하지점에 연계된 Case 10은 저전압 현상이 해소되지 않음을 알 수 있으며, 전기저장장치가 중간지점 및 말단지점에 연계된

Case 11과 Case 12를 통해 전기저장장치 연계지점까지의 선로 저항이 커질수록 저전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다. 즉, LVDC 배전망은 전기저장장치를 말단지점에 가까이 연계할수록 피크부하에 의한 저전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다.

[표 4] LVDC 배전망의 저전압 특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	전기저장장치 방전시 1번 구간전압 [V]	전기저장장치 충전시 2번 구간전압 [V]
10	352	333.3	352	333.3
11			362.4	343.1
12			362.1	353.5

5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원과 전기저장장치의 연계지점에 따른 LVDC 배전망의 전압특성을 분석하기 위해, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 LVDC 배전망의 전압특성을 분석한 결과, 태양광전원을 말단지점에 가까이 연계할수록 역조류에 의한 과전압 현상이 크게 나타나고, 전기저장장치를 말단지점에 가까이 연계할수록 과전압 및 저전압 현상이 크게 해소됨을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 이후동 외 3명, “태양광전원 수용을 위한 MVDC 배전망의 경제성평가 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, 22권, 제 3호, pp. 1-12, 2021.03.
- [2] 노성은 외 4명, “신재생에너지 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL의 운용특성에 관한 연구”, 2024 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1,204-1,205, 2024.07.
- [3] 이창우 외 2명, “재생에너지 출력제한 최소화 에너지 믹스 및 저감 방안”, 조명·전기설비학회논문지, 33권, 제 12호, pp. 41-48, 2019.12.