

# 태양광전원과 ESS가 연계된 LVDC 배전시스템의 전압관리 방안에 관한 연구

김윤호\*, 김경화\*, 이민행\*, 김세진\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

## A Study on Voltage Regulation Method of 400V LVDC Distribution System with PV and ESS

Yun-Ho Kim\*, Kyung-Hwa Kim\*, Min-Haeng Lee\*, Se-Jin Kim\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 제10차 전력수급 기본계획과 2050 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지 전원의 설치가 지속적으로 증가하고 있어, 전력변환 손실 저감, 전송용량 증대 등의 장점이 있는 DC 배전시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, LVDC 배전시스템에 대용량 태양광전원이 연계되거나 특정 시간대에 피크부하가 발생할 경우, LVDC 배전시스템의 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어날 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 현상과 피크부하시 선로저항에 의한 저전압 현상을 해소할 수 있는 LVDC 배전시스템의 전압관리 방안을 제시한다. 또한, 전력시스템 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인컨버터부, 구간컨버터부, 모의 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, ESS부 등으로 구성된 LVDC 배전시스템의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, LVDC 배전시스템에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 제시한 전압관리 방안을 통해 수용가 전압을 규정전압 범위 내로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서론

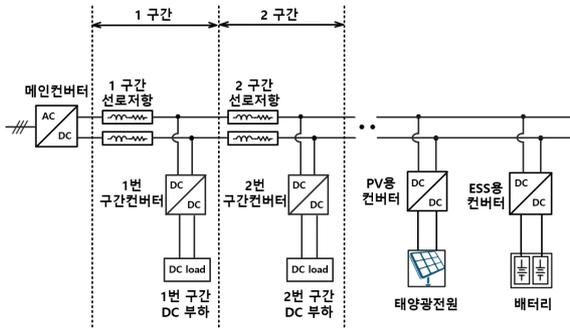
최근, 최근, 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지 전원의 설치가 급증하고 있지만, 입지선정 및 계통접속에 따른 문제로 인하여 신재생에너지 전원의 접속대기 용량이 지속적으로 증가하고 있다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위한 전력망 보강은 계통운영 측면에서 비용적, 시간적으로 많은 자원이 투입되므로, 전력변환 손실의 저감, 전송용량 증대 등의 장점이 있는 LVDC 배전시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2]. 하지만, 이러한 LVDC 배전시스템에 많은 용량의 태양광전원이 연계되면, 태양광전원의 역조류에 의한 과전압과 피크부하에 의한 저전압 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 충·방전을 통해 LVDC 배전시스템의 수용가 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 전압관리 방안을 제시한다. 또한, 전력시스템 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인컨버터부, 구간컨버터부, 모의 배전선로부, DC 부하부, 태양광전원부, ESS부 등으로 구성된 LVDC 배전시스템의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 LVDC 배전시스템의 전압특성을 분석한 결과, 수용가에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 전압관리 방안

에 의한 ESS의 충·방전을 통해 수용가 전압을 규정전압 범위 내로 적절하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

### 2. 태양광전원과 ESS가 연계된 LVDC 배전시스템의 전압관리 방안

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

있다.



[그림 1] LVDC 배전계통의 구성

[그림 2] LVDC 배전계통의 전압관리 방안

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

$$V_{con} = \begin{cases} V_{\max} - V_{ch} & \text{if } \delta(t) = -1 \\ V_{\min} - V_{dis} & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{con} = \frac{V_{con}}{\sum_{n=1}^m R_{(n)}} \quad (3)$$

$$P_{ESS} = \begin{cases} V_{\max} \times I_{con} & \text{if } \delta(t) = -1 \\ V_{\min} \times I_{con} & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

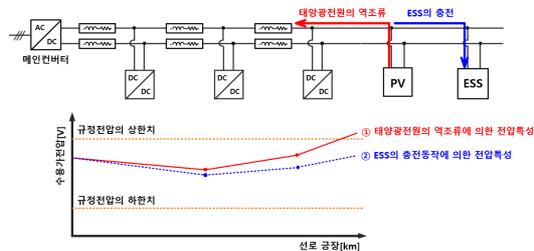
즉, LVDC 배전계통에서 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어난 경우, 이를 해결하기 위한 전압관리 방안은 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2의 (a)는 수용가에 과전압이 발생한 경우이며, 그림 2의 (b)는 저전압이 발생한 경우를 나타낸다. 먼저, 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 또는 피크부하에 의한 저전압 현상이 발생할 경우, ESS는 식 (1)에 의해 ESS의 동작모드를 결정하는데, 과전압 규정치를 벗어난 가장 큰 수용가 전압이 ESS의 충전 동작전압보다 크면 충전을 수행하고, 저전압 규정치를 벗어난 가장 작은 수용가 전압이 ESS의 방전 동작전압보다 작으면 방전을 수행하며, 그 외의 경우에는 ESS를 충·방전하지 않는다. 또한, ESS의 충·방전 동작으로 보상할 수 있는 전압은 식 (2)와 같으며, 충·방전에 의해 공급 및 소비되는 전류는 식 (3)과 같다. 즉, ESS의 충·방전 동작에 의해 공급 및 소비되는 전력은 식 (2)와 식 (3)을 곱하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 LVDC 배전계통의 태양광 전원에 의한 과전압과 피크부하에 의한 저전압 현상을 해소할 수 있다.

여기서,  $\delta(t)$  : ESS의 충·방전 모드,  $V_{\max}$  : 과전압 규정치를 벗어난 가장 큰 수용가 전압,  $V_{\min}$  : 저전압 규정치를 벗어난 가장 작은 수용가 전압,  $V_{ch}$  : ESS의 충전 개시전압,  $V_{dis}$  : ESS의 방전 개시전압,  $V_{con}$  : ESS의 보상전압,  $I_{con}$  : ESS의 충·방전전류,  $R_{(n)}$  :  $n$  구간의 선로저항,  $n$  : 구간 번호,  $m$  : 구간의 개수,  $P_{ESS}$  : ESS의 충·방전용량

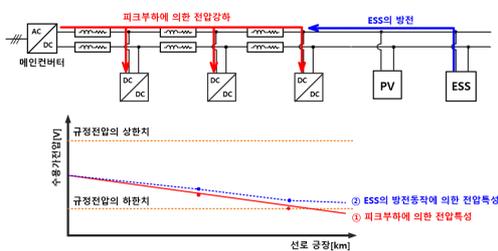
### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 400V LVDC 배전계통의 모델링

#### 3.1 메인컨버터부

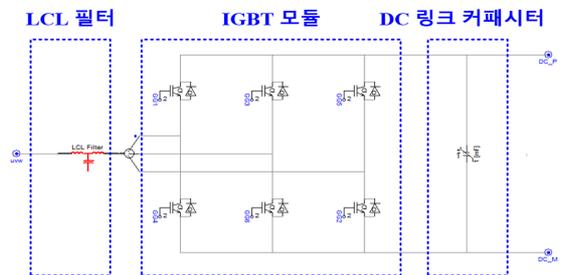
메인컨버터부는 그림 3과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, 메인컨버터는 정전압 제어방식을 통해 3상의 AC 380[V]를 DC 400[V]로 변환한다.



(a) 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 현상



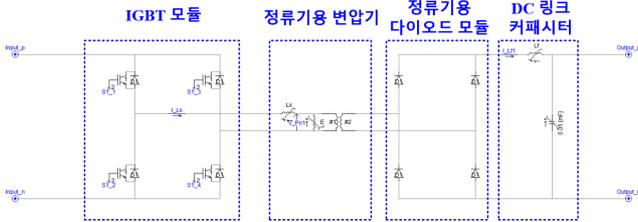
(a) 피크부하에 의한 저전압 현상



[그림 3] 메인컨버터부 모델링

### 3.2 구간컨버터부

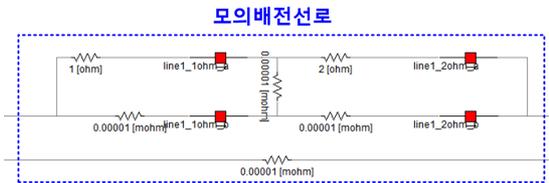
구간 컨버터부는 그림 4와 같이, full-bridge 형태의 IGBT 모듈과 정류기용 변압기, 정류용 다이오드 모듈, DC 링크 커패시터, 기생 커패시턴스 등으로 구성된다. 여기서, 구간 컨버터는 정전압 제어방식을 통해 DC 400[V]를 200[V]로 변환한다.



[그림 4] 구간컨버터부 모델링

### 3.3 모의 배전선로부

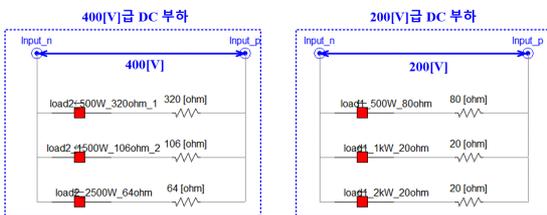
모의 배전선로부는 그림 5와 같이 저항과 MC를 이용하여 1 구간과 2 구간의 선로저항을 1[Ω]와 2[Ω]으로 가변할 수 있도록 구성한다.



[그림 5] 모의 배전선로부 모델링

### 3.4 DC 부하부

DC 부하부는 그림 6과 같이, 400[V]급 DC 부하, 200[V]급 DC 부하로 구성된다. 여기서, 400[V]급 DC 부하는 500[W], 2,000[W], 2,000[W], 200[V]급 DC 부하는 500[W], 1,500[W], 2,500[W]의 저항을 조합하여, 500[W] ~ 4,500[W]로 가변할 수 있도록 구성한다.

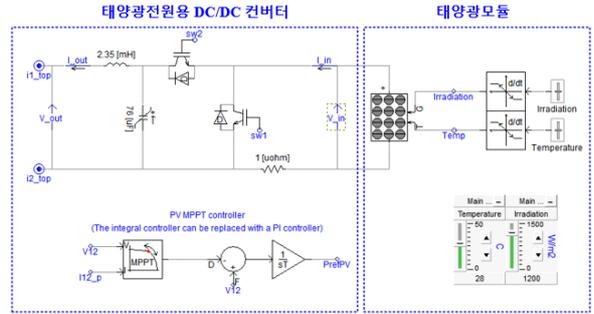


[그림 6] DC 부하부 모델링

### 3.5 태양광전원부

태양광전원부는 그림 7과 같이, boost 형태의 태양광전원용

DC/DC 컨버터와 태양광모듈로 구성된다. 여기서, 태양광전원용 DC/DC 컨버터는 MPPT 제어방식을 통해 태양광모듈의 출력전압과 전류를 이용해 최대 전력점을 추종한다.



[그림 7] 태양광전원부 모델링

### 3.6 ESS부

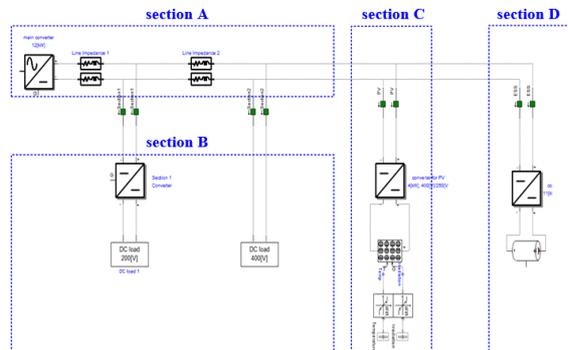
ESS는 그림 8과 같이, buck-boost 형태의 ESS용 DC/DC 컨버터와 배터리 랙으로 구성된다. 여기서, ESS용 DC/DC 컨버터는 정출력 제어방식을 통해 상기의 식 (4)를 바탕으로 충·방전 동작을 수행하여, LVDC 배전계통의 과전압, 저전압 현상을 해소시킨다.



[그림 8] ESS부 모델링

### 3.7 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서 section A는 메인컨버터부와 모의 배전선로부, section B는 구간컨버터부와 DC 부하부, section C는 태양광전원부, section D는 ESS부를 나타낸다.



[그림 9] 전체 시스템 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

태양광전원과 ESS가 연계된 400V LVDC 배전계통의 과전압 특성을 분석하기 위한 상정 시나리오는 표 1과 같이 1 구간 및 2 구간의 선로저항과 태양광전원의 용량을 고려하여 case 1 ~ case 4로 상정한다. 또한, 400V LVDC 배전계통의 저전압특성을 분석하기 위한 상정 시나리오는 표 2와 같이 1 구간 및 2 구간의 선로 저항과 1 구간 및 2 구간의 DC 부하용량을 고려하여 case 5 ~ case 8로 상정한다. 한편, LVDC 배전계통의 규정전압 범위는  $\pm 10\%$ 로 상정한다.

[표 1] LVDC 배전계통의 과전압 상정 시나리오

Case	1번 구간 선로저항	2번 구간 선로저항	1번 구간 DC 부하	2번 구간 DC 부하	태양광 전원 용량
1	1[Ω]	1[Ω]	0.5[kW]	0.5[kW]	8[kW]
2	1[Ω]	2[Ω]	0.5[kW]	0.5[kW]	8[kW]
3	2[Ω]	1[Ω]	0.5[kW]	0.5[kW]	8[kW]
4	2[Ω]	2[Ω]	0.5[kW]	0.5[kW]	8[kW]

[표 2] LVDC 배전계통의 저전압 상정 시나리오

Case	1번 구간 선로저항	2번 구간 선로저항	1번 구간 DC 부하	2번 구간 DC 부하
5	1[Ω]	1[Ω]	4.5[kW]	4.5[kW]
6	1[Ω]	2[Ω]	4.5[kW]	4.5[kW]
7	2[Ω]	1[Ω]	4.5[kW]	4.5[kW]
8	2[Ω]	2[Ω]	4.5[kW]	4.5[kW]

### 4.2 LVDC 배전계통의 과전압 특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전계통의 과전압 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 1번과 2번 구간의 선로저항이 작은 case 1에서 과전압 현상이 발생하지 않음을 알 수 있으며, case 2 ~ case 4을 통해 태양광전원이 연계된 말단부분의 선로저항이 커질수록 과전압 현상이 심화됨을 알 수 있다. 한편, 상기의 식 (4)를 바탕으로 ESS의 적절한 용량을 산정하여 방전할 경우, case 2 ~ case 4의 과전압 현상을 해소할 수 있어, 본 연구에서 제시한 전압관리 방안이 적절함을 알 수 있다.

[표 3] LVDC 배전계통의 과전압 특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	전압관리 방안에 의한 1번 구간전압 [V]	전압관리 방안에 의한 2번 구간전압 [V]	ESS 충전용량 [kW]
1	414.7	431.9	414.7	431.9	-
2	414.0	447.0	411.7	440.0	1.2
3	428.1	444.6	424.8	444.0	0.9
4	426.9	458.7	417.6	440.0	2.5

### 4.3 LVDC 배전계통의 저전압 특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 LVDC 배전계통의 저전압 특성을 나타내면 표 4와 같다. 여기서, 1번과 2번 구간의 선로저항이 작은 case 5에서 저전압 현상이 발생하지 않음을 알 수 있으며, case 6 ~ case 8을 통해 선로저항이 커질수록 말단지점의 저전압 현상이 심화됨을 알 수 있다. 한편, 상기의 식 (4)를 바탕으로 ESS의 적절한 용량을 산정하여 방전할 경우, case 6 ~ case 8의 저전압 현상을 해소할 수 있어, 본 연구에서 제시한 전압관리 방안이 적절함을 알 수 있다.

[표 4] LVDC 배전계통의 저전압 특성

Case	1번 구간전압 [V]	2번 구간전압 [V]	전압관리 방안에 의한 1번 구간전압 [V]	전압관리 방안에 의한 2번 구간전압 [V]	ESS 방전용량 [kW]
5	374.3	363.7	374.3	363.7	-
6	374.6	353.9	377.2	361.6	1
7	350.8	340.9	363.5	360.0	2.5
8	351.5	332.1	366.1	361.4	2.8

## 5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 충·방전을 통해 LVDC 배전계통의 수용가 전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 전압관리 방안을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 LVDC 배전계통의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 LVDC 배전계통의 전압특성을 분석한 결과, 수용가에 과전압 및 저전압 현상이 발생할 경우, 전압관리 방안에 의해 산정된 ESS의 충·방전을 통해 수용가 전압을 규정전압 범위 내로 적절하게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 김하늘 외 1명, “국가 신재생에너지 보급계획에 따른 전환 부문의 2050 탄소중립 달성도 분석”, 한국신재생에너지학회, pp. 194, 2024.05.
- [2] 이민행 외 5명, “태양광전원의 연계용량에 따른  $\pm 35kV$ 급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링”, 한국산학기술학회 논문지, 25권, 제 2호, pp. 504-513, 2024.02.