

태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전망의 전압변동 저감을 위한 ESS의 최소용량 산정방안

장형안*, 강동구*, 김혜원*, 이수용*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: wkdguddks@koreatech.ac.kr

Minimum Capacity Estimation Method of ESS for Voltage Variation Stabilization in $\pm 35\text{kV}$ MVDC Distribution System with PV System

Hyeong-An Jang*, Dong-Gu Kang*, Hye-Won Kim*,

Soo-Yong Lee*, Dae-Seok Rho*

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

요약

MVDC 배전선로에 연계된 태양광전원의 발전량 급증으로 인하여, 선로의 과전압 현상이 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전압변동을 저감하기 위한 ESS의 최소용량을 산정하는 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전선로의 전압을 허용범위 이내로 유지할 수 있는 ESS의 최소용량 산정방안을 제안한다. 여기서, 최소용량 산정방안은 선로정수와 태양광전원의 발전량, 수용가의 전력 사용량 등을 고려하여, ESS의 최소 MW/MWh 용량을 산정한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소부, MVDC 컨버터부, LVDC 수용가부, ESS부, 태양광전원부 등으로 구성된 $\pm 35[\text{kV}]$ 급 MVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 배전망의 운용 특성을 평가한 결과, ESS를 설치하지 않은 MVDC 배전망은 태양광전원의 발전량과 수용가의 전력 사용량에 따라, 일부 시간대에 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 이를 해소하기 위하여, 최소용량 산정방안을 바탕으로 ESS를 설치할 경우, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 MVDC 배전망의 전압변동 저감을 위한 ESS의 최소용량 산정방안의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서론

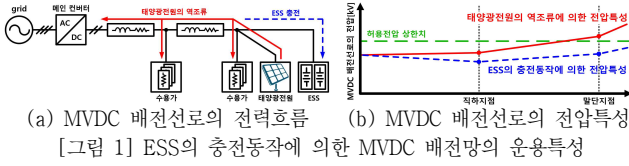
최근, 전 세계적인 그린 뉴딜 및 탄소중립 정책에 의하여 신재생에너지의 보급이 확대되고 있지만, 기존 AC 배전망의 수용성 한계로 인하여, 신재생에너지 전원의 효율적인 계통 연계가 어려운 상황이다[1]. 이를 극복하기 위한 방안 중의 하나로 MVDC 배전망이 주목을 받고 있지만, 주간에 발전량이 급증하는 태양광전원의 특성으로 인하여, MVDC 배전선로의 과전압 현상이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여, ESS를 설치하여 운용하는 방안이 기존에 제시되고 있지만, 전압변동을 저감하기 위한 ESS의 최소용량을 산정하는 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전선로의 전압을 허용범위 이내로 유지할 수 있는 ESS의 최소용량 산정방안을 제안한다. 여기서, 최소용량 산정방안은 선로정수와 태양광전원의 발전량, 수용가의 전력 사용량 등을 고려하여, ESS의 최소 MW/MWh 용량을 산정한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소부, MVDC 컨버터부, LVDC 수용가부, ESS부, 태양광전원부 등으로 구성된 $\pm 35[\text{kV}]$ 급 MVDC

배전망의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 배전망의 운용특성을 평가한 결과, ESS를 설치하지 않은 MVDC 배전망은 태양광전원의 발전량과 수용가의 전력 사용량에 따라, 일부 시간대에 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 이를 해소하기 위하여, 상기의 산정방안을 바탕으로 ESS를 설치할 경우, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 MVDC 배전망의 전압변동 저감을 위한 ESS의 최소용량 산정방안의 유효성을 확인할 수 있다.

2. MVDC 배전망의 전압변동 저감방안

MVDC 배전선로의 과전압 현상이 발생한 경우, 이를 해결하기 위한 ESS의 동작은 그림 1과 같다. 먼저, 그림 1의 (a)는 태양광전원에 의한 역조류를 저감하기 위한 ESS의 충전동작이며, (b)는 ESS의 충전동작에 의해 MVDC 배전선로의 전압이 허용범위 이내로 유지되는 특성을 나타낸다.



MVDC 배전선로의 전압변동을 저감하기 위한 ESS의 최소용량은 선로정수와 태양광전원의 발전량, 수용가의 전력 사용량 등을 바탕으로 산정된다. 먼저, 구간별 전압은 상위 구간의 전압 ($V_{n-1}(t)$)과 해당 구간(n)의 선로저항(R_n), 해당 구간부터 말단(l)까지의 구간별 전력 편차의 합($P_{n,dev}(t)$), 허용전압의 상한치(V_{upper})을 고려하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 구간별 전력 편차의 합은 식 (2)와 같이, 구간별 수용가의 연계용량($P_{n,cus}$)과 부하율($f_c(t)$), 태양광전원의 연계용량($P_{n,PV}$)과 발전율($f_{PV}(t)$)을 고려하여 산정한다. 또한, 전압 변동을 저감하기 위한 목표 보상전압($V_{com}(n,t)$)은 산정된 구간별 전압이 허용범위를 벗어난 정도로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 한편, 구간별 목표 보상전류($I_{com}(n,t)$)는 식 (4)과 같이, 목표 보상전압을 송출단에서 해당 구간까지의 선로저항으로 나눈 값으로 산정한다.

$$V_n(t) = V_{n-1}(t) - R_n \frac{P_{n,dev}(t)}{V_{upper}} \quad (1)$$

$$P_{n,dev}(t) = \sum_{k=n}^l \{P_{k,cus} \times f_c(t) - P_{k,PV} \times f_{PV}(t)\} \quad (2)$$

$$V_{com}(n,t) = V_n(t) - V_{upper} \quad (3)$$

$$I_{com}(n,t) = \frac{V_{com}(n,t)}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (4)$$

여기서, $V_n(t)$: 구간별 MVDC 배전선로의 전압[kV], n : 선로 구간, R_n : 구간별 선로저항[Ω], V_{upper} : 허용전압의 상한치[kV], $P_{n,dev}(t)$: 구간별 전력 편차의 합[MW], $P_{n,cus}$: 구간별 수용가 용량[MW], $P_{n,PV}$: 구간별 태양광전원 연계용량[MW], $f_c(t)$: 수용가의 부하율[%], $f_{PV}(t)$: 태양광전원의 발전율[%], l : 말단구간, $V_{com}(n,t)$: 구간별 목표 보상전압[kV], $I_{com}(n,t)$: 구간별 목표 보상전류[kA]

한편, 모든 구간의 전압을 허용범위 이내로 유지하기 위하여, ESS의 충전전류($I_{ESS}(t)$)는 식 (5)와 같이, 구간별 목표 보상전류 중 가장 큰 값으로 결정한다. 또한, ESS의 충전용량은 충전전류에 허용전압의 상한치를 곱하여, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로, MVDC 배전망의 전압관리를 위한 ESS의 최소 MW 용량($ESS_{min,MW}$)은 식 (7)과 같이, 하루 동

안의 충전용량 중 가장 큰 값으로 결정한다. 또한, ESS의 최소 MWh 용량($ESS_{min,MWh}$)은 식 (8)과 같이, 허용전압 상한치를 벗어난 $t_1 \sim t_2$ 시간대의 충전용량을 적산하여 산정한다.

$$I_{ESS}(t) = \max[I_{com}(1,t) \cdots I_{com}(l,t)] \quad (5)$$

$$P_{ESS}(t) = I_{ESS}(t) \times V_{upper} \quad (6)$$

$$ESS_{min,MW} = \max[P_{ESS}(0) \cdots P_{ESS}(24)] \quad (7)$$

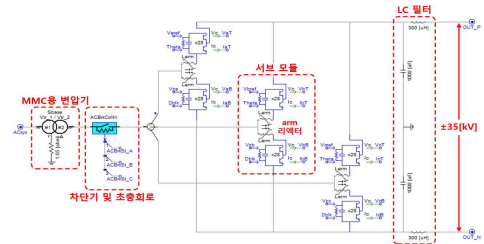
$$ESS_{min,MWh} = \max \left[\int_{t_1}^{t_2} P_{ESS}(t) dt \right] \quad (8)$$

$I_{ESS}(t)$: ESS의 충전전류[kA], $P_{ESS}(t)$: ESS의 충전용량[MW], $ESS_{min,MW}$: ESS의 최소 MW 용량[MW], $ESS_{min,MWh}$: ESS의 최소 MWh 용량[MWh], $t_1 \sim t_2$: 허용전압 상한치를 벗어난 시간대

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ±35kV급 MVDC 배전망의 모델링

3.1 MVDC 컨버터부

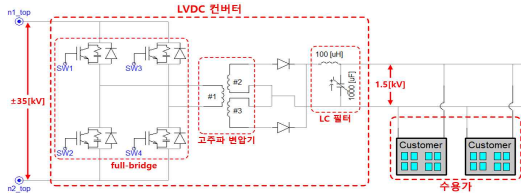
MVDC 컨버터부는 Half-bridge sub-module의 MMC(modular multilevel converter) 구조를 바탕으로, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 구체적으로, MMC용 변압기, 차단기 및 초충회로, 서브모듈, arm 리액터, LC 필터 등으로 구성되며, 서브모듈의 스위칭 동작을 통해 변전소 측의 22.9[kV_{AC}]를 ±35[kV_{DC}]로 변환한다.



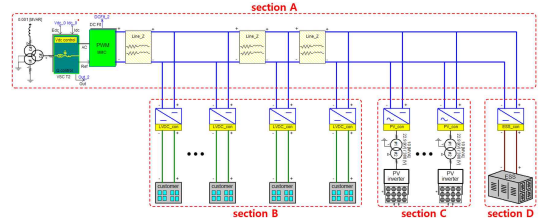
[그림 2] MVDC 컨버터부의 모델링

3.2 LVDC 수용가부

MVDC 배전선로에 연계되는 LVDC 수용가부는 그림 3과 같이, LVDC 컨버터와 수용가 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, LVDC 컨버터는 full-bridge 형태의 IGBT 모듈과 고주파 변압기, LC 필터 등으로 구성되며, MVDC 배전선로의 ±35[kV_{DC}]를 1.5[kV_{DC}]로 강압하여 수용가에 전력을 공급한다.



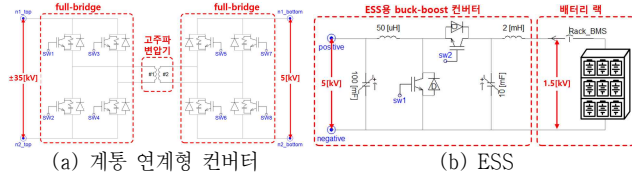
[그림 3] LVDC 수용가부의 모델링



[그림 6] ±35[kV]급 MVDC 배전망의 전체 시스템 모델링

3.3 ESS부

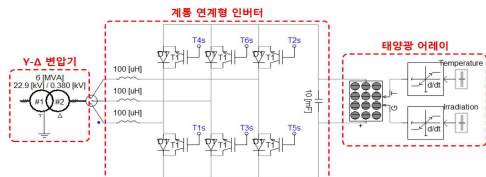
MVDC 배전선로에 연계되는 ESS부는 그림 4와 같이, 계통 연계형 컨버터와 ESS 등으로 구성된다. 여기서, 계통 연계형 컨버터는 그림 4의 (a)와 같이, 양방향 DC/DC DAB(dual active bridge) 컨버터를 채용하고, DPS(dual phase shift) 제어방식을 통해, MVDC 배전선로의 $\pm 35[kV_{DC}]$ 를 $5[kV_{DC}]$ 로 강압하여 ESS를 연계한다. 또한, ESS는 그림 4의 (b)와 같이, 정전력 제어 방식의 buck-boost 컨버터에 의해 유효전력 및 무효전력을 조정하여, 배터리 랙의 충·방전 동작을 수행한다.



[그림 4] ESS부의 모델링

3.4 태양광전원부

태양광전원부는 그림 5와 같이, Y-Δ 변압기와 계통 연계형 인버터, 태양광 어레이 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, Y-Δ 변압기는 태양광전원을 MVDC 배전선로에 연계하기 위하여, 계통 연계형 인버터의 출력 전압을 $22.9[kV_{AC}]$ 로 승압한다. 또한, 계통 연계형 인버터는 태양광 어레이에서 생성된 DC 출력을 120° 의 위상차를 갖는 3상 AC 출력으로 변환하고, 태양광 어레이는 다수의 스트링을 1개의 모듈로 등가화하여 나타낸다.



[그림 5] 태양광전원부의 모델링

3.5 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 $\pm 35[kV]$ 급 MVDC 배전망의 전체 시스템을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, section A는 배전용 변전소부와 MVDC 컨버터부, MVDC 배전선로 등으로 구성되며, 선로의 공장에 따라 4개의 구간으로 구분한다. 또한, section B는 각 구간에 연계된 LVDC 수용가부, section C는 상정된 구간에 연계된 태양광전원부, section D는 말단지점에 연계된 ESS부를 나타낸다.

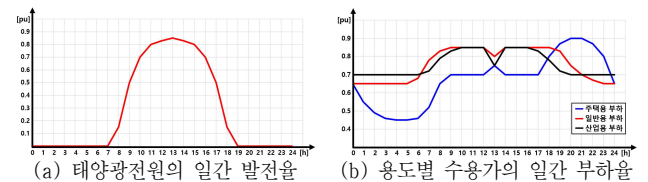
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

상기의 전압관리방안을 바탕으로, $\pm 35[kV]$ 급 MVDC 배전망의 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 또한, 고압선로에 연계된 태양광전원의 발전율과 수용가의 부하율 그림 7과 같은데, (a)는 태양광전원의 일간 발전율, (b)는 수용가의 일간 부하율을 나타낸 것이다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목	내역	
배전용 변전소 정격용량 [MVA]	60	
MVDC 컨버터 정격용량 [MW]	30	
MVDC 배전선로	선종	ACSR 160mm ²
	공장	각 구간당 25[km]
LVDC 수용가 용량 [MW]	1번 구간	20
	2번 구간	2
	3번 구간	2
태양광전원 연계용량 [MW]	20	
허용전압 상한치[pu]	1.04	

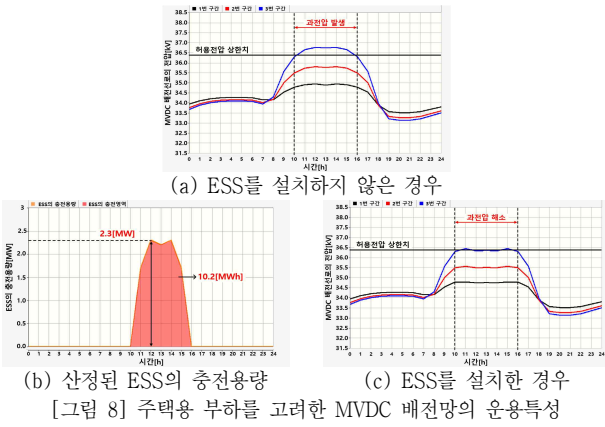


[그림 7] 태양광전원과 수용가의 발전 및 부하 패턴

4.2 ESS의 최소용량에 의한 MVDC 배전망의 운용특성

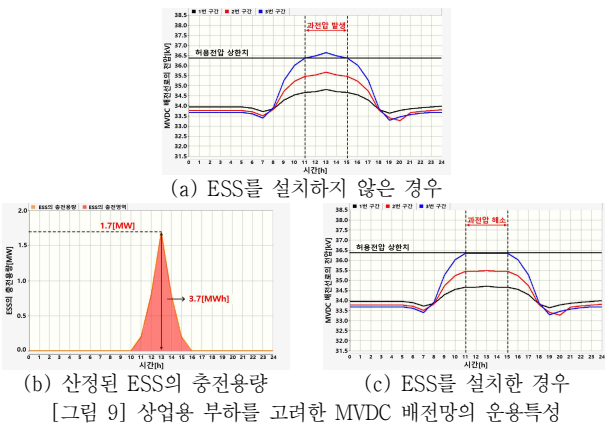
4.2.1 주택용 부하를 고려한 MVDC 배전망

상기의 그림 7에서 제시한 용도별 수용가의 부하율을 바탕으로, 주택용 부하를 고려한 MVDC 배전망의 운용특성을 나타내면 그림 8과 같다. 먼저, ESS를 설치하지 않은 경우, MVDC 배전망은 그림 8의 (a)와 같이, 10시~16시에 허용전압의 상한치를 벗어난 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 이를 해소하기 위한 ESS의 충전용량은 그림 8의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, ESS의 최소 MW 용량은 상기의 식 (7)에 의해 충전용량 중 최대값인 2.3[MW]로 결정되고, 최소 MWh 용량은 식 (8)에 따라 충전영역을 적산한 값인 10.2[MWh]로 산정된다. 한편, 최소용량의 ESS를 설치한 경우, MVDC 배전망은 그림 8의 (c)와 같이, 10시~16시의 과전압 현상이 해소되어, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있다.



4.2.2 상업용 부하를 고려한 MVDC 배전망

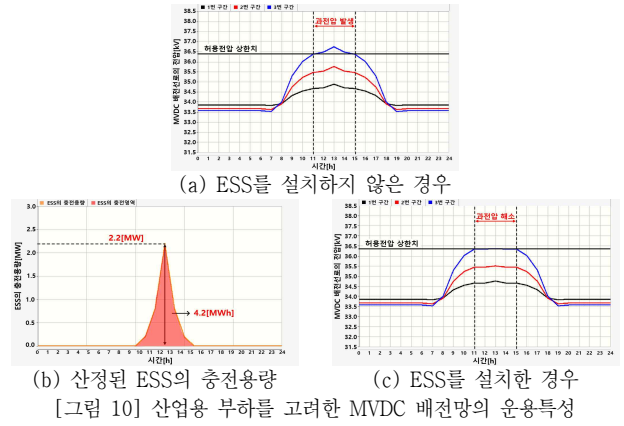
상기의 그림 7에서 제시한 용도별 수용가의 부하율을 바탕으로, 상업용 부하를 고려한 MVDC 배전망의 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 먼저, ESS를 설치하지 않은 경우, MVDC 배전망은 그림 9의 (a)와 같이, 11시~15시에 허용전압의 상한치를 벗어난 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 이를 해소하기 위한 ESS의 충전용량은 그림 9의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, ESS의 최소 MW 용량은 상기의 식 (7)에 의해 충전용량 중 최댓값인 1.7[MW]로 결정되고, 최소 MWh 용량은 식 (8)에 따라 충전영역을 적산한 값인 3.7[MWh]로 산정된다. 한편, 최소용량의 ESS를 설치한 경우, MVDC 배전망은 그림 9의 (c)와 같이, 11시~15시의 과전압 현상이 해소되어, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있다.



4.2.3 산업용 부하를 고려한 MVDC 배전망

상기의 그림 7에서 제시한 용도별 수용가의 부하율을 바탕으로, 산업용 부하를 고려한 MVDC 배전망의 운용특성을 나타내면 그림 10과 같다. 먼저, ESS를 설치하지 않은 경우, MVDC 배전망은 그림 10의 (a)와 같이, 11시~15시에 허용전압의 상한치를 벗어난 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 이를 해소하기 위한 ESS의 충전용량은 그림 10의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, ESS의 최소 MW 용량은 상기의 식 (7)에 의해 충전용량 중 최댓값인 2.2[MW]로 결정되고, 최소 MWh 용량은 식 (8)에 따

라 충전영역을 적산한 값인 4.2[MWh]로 산정된다. 한편, 최소용량의 ESS를 설치한 경우, MVDC 배전망은 그림 10의 (c)와 같이, 11시~15시의 과전압 현상이 해소되어, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 MVDC 배전망의 전압관리를 위한 ESS의 최소용량 산정방안의 유효성을 확인할 수 있다.



5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원이 연계된 MVDC 배전망의 전압변동 저감을 위한 ESS의 최소용량 산정방안을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ±35[kV]급 MVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, ESS를 설치하지 않은 MVDC 배전망은 일부 시간대에 과전압 현상이 발생한다. 또한, 최소용량 산정방안을 바탕으로 ESS를 설치할 경우, 모든 구간의 전압이 허용범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 MVDC 배전망의 전압변동 저감을 위한 ESS의 최소용량 산정방안의 유효성을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00409639, 2026년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

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