

태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링에 관한 연구

이민행, 유현상, 김윤호, 한병길, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

Economic Evaluation Modeling of $\pm 35\text{kV}$ MVDC Distribution System Interconnected with PV systems

Min-Haeng Lee, Hyun-Sang You, Yun-Ho Kim, Byeong-Gill Han, Dae-Seok Rho
Korean University of Technology and Education

요약

현재 급격하게 도입되고 있는 신재생에너지의 계통 접속 지연문제를 해결하기 위한 방안으로, 국내에서는 기존의 AC 배전망에 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC를 적용하여 신재생에너지전원을 수용하는 MVDC 배전기술에 대한 실증연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 기존의 AC 배전선로와 다르게 MVDC 배전선로는 전압과 전류용량의 상승으로 동일한 선로에서 AC 배전망보다 더 많은 용량을 확보할 수 있어, 변전소 증설과 같은 추가적인 투자를 지연시킬 수 있다. 하지만, DC 배전망은 인버터 및 컨버터, DC 차단기와 같은 DC 배전망용 기기들을 사용해야 하므로, AC 배전망을 구축하는 것보다 막대한 비용이 발생할 가능성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전망의 도입에 대한 타당성을 평가하기 위하여, MVDC 실증배전망을 바탕으로 태양광전원의 연계용량과 선로 공장을 고려한 시나리오 별 MVDC 도입 모델을 제시하고, 이를 기반으로 경제성평가 모델링을 수행한다. 여기서, 경제성평가 모델링은 비용요소와 편익요소로 구분되며, 비용요소는 AC 배전망과 DC 배전망의 건설비용 및 운용비용이며, 편익요소는 AC/DC 배전망의 손실저감 이익과 태양광전원의 연계용량에 따른 전력량요금, REC 요금으로 구성된다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 현재가치환산법을 이용하여 경제성을 평가한 결과, 태양광전원의 규모에 따라 일정 선로 공장 이후에서 MVDC 배전망이 기존의 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 정부의 2050 탄소중립 정책에 따른 신재생에너지가 배전계통에 활발하게 도입되고 있지만, 친환경자원이 풍부한 특정 지역에 주로 집중되어 있어 신재생에너지전원의 계통접속 지연 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 신재생에너지의 급격한 도입으로 인한 계통접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안으로, 국내에서는 MVDC 배전기술에 대한 실증연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 특히, MVDC 배전망은 기존의 AC 배전망 보다 더 많은 용량을 공급할 수 있어 에너지 손실 감소와 분산 전원의 수용성 향상, 그리고 변전소 증설과 같은 추가적인 투자를 회피할 수 있다. 그러나, DC 배전망은 기존 AC 배전망에 비해 인버터 및 컨버터, DC 차단기와 같은 DC 배전망용 기기들을 사용해야 하므로 막대한 비용이 발생할 가능성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전망의 도입에 대한 타당성을 평가하기 위하여, MVDC 실증배전망을 바탕으로 태양광전원의 연계용량 및 선로 공장을 고려한 시나리오 별 MVDC 실증 모델을 제시하고, 이를 기반

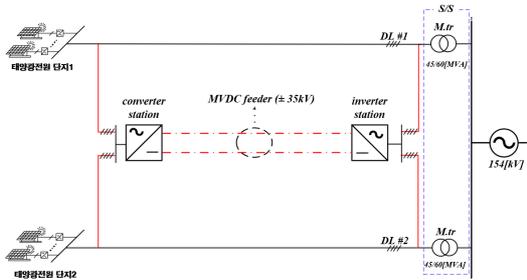
으로 경제성평가 모델링을 수행한다. 여기서, 경제성평가 모델링은 비용요소와 편익요소로 구분되며, 비용요소는 AC 배전망과 DC 배전망의 건설비용 및 운용비용이며, 편익요소는 AC/DC 배전망의 손실저감 이익과 태양광전원의 연계용량에 따른 전력량요금, REC요금으로 구성된다. 제시한 모델링을 바탕으로 현재가치환산법을 이용하여 경제성을 평가한 결과, 태양광전원의 규모에 따라 일정 선로공장 이후에서 MVDC 배전망이 기존의 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 경제성평가 모델링의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전망의 도입 모델

2.1 실증배전망의 구성

최근, 기존의 배전망을 활용하여 신재생에너지전원을 수용하는 MVDC 배전망의 실증 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 특히 나주지역에 구축된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 실증배전망을 나타내면 그림 1과 같다. 이 그림에서와 같이, MVDC 실증

망은 태양광전원, AC 배전선로, MVDC 스테이션(컨버터 및 인버터), 실증용 MVDC 선로, 배전용변전소 등으로 구성된다. 하지만, DC 배전망은 인버터 및 컨버터, DC 차단기와 같은 DC 기기들을 사용해야 하므로, AC 배전망을 구축하는 것보다 막대한 비용이 발생할 가능성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전망의 도입에 대한 타당성을 평가하기 위하여, MVDC 실증배전망을 바탕으로 배전계통에 추가적으로 연계되는 태양광전원의 용량과 선로 공장을 고려하여, 기존의 AC 배전망, AC/DC 하이브리드 배전망, MVDC 배전망의 3가지 도입 시나리오에 대한 타당성을 평가한다.

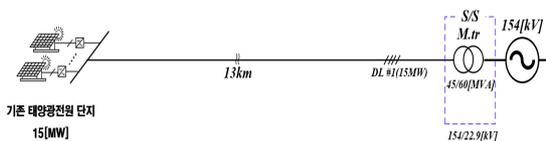


[그림 1] ±35kV급 MVDC 실증배전망의 구성도

2.2 태양광전원 수용성을 위한 배전망 도입 모델

2.2.1 기존 AC 배전망 도입모델

상기에서 제시한 실증배전망을 바탕으로, 태양광전원이 추가적으로 연계될 경우, 그림 2와 같이 기존의 AC 배전망을 이용한 도입모델을 제시한다. 여기서, 그림 2(a)는 기존에 설치되어 운용 중인 AC 배전망 모델을 나타내며, 배전용변전소의 주 변압기(154/22.9[kV], 45/60[MVA]), 22.9[kV] 배전선로(ACSR 240[mm²])와 전주, 태양광전원 단지 등으로 구성된다. 또한, 그림 2(b)는 기존 AC 배전망 모델에 태양광전원을 추가적으로 연계할 경우, AC 배전선로를 증설하는 모델을 나타낸다. 여기서, 기존의 22.9kV AC 배전망은 하나의 전주에 최대 2회선이 설치되며, 태양광전원을 추가적으로 연계할 경우, 22.9[kV] 배전선로(ACSR 240[mm²], 15[MVA])와 전주를 용량에 비례하여 증설해야 한다. 한편, 45[MW]를 초과하는 태양광전원이 연계될 경우, 기존의 22.9kV AC 배전선로는 환경과 공간의 제약으로 최대 2대까지 전주를 설치할 수 있으므로, 그림 2(b)의 D/L #5와 같이 건설비용이 높은 22.9[kV] 지중 배전선로(CNCV-W 600[mm²], 25[MVA])를 신설해야 한다.



(a) 기존 배전망의 모델



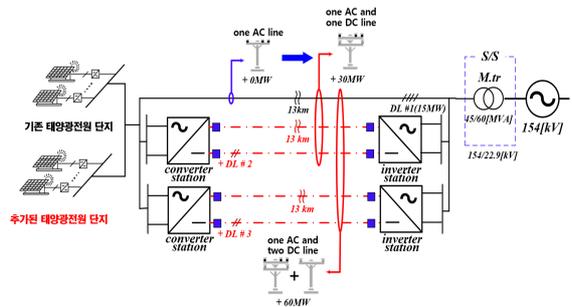
추가된 태양광전원 단지

(b) AC 선로를 추가적으로 증설하는 경우

[그림 2] AC 배전망 모델

2.2.2 AC/DC 하이브리드 배전망 도입모델

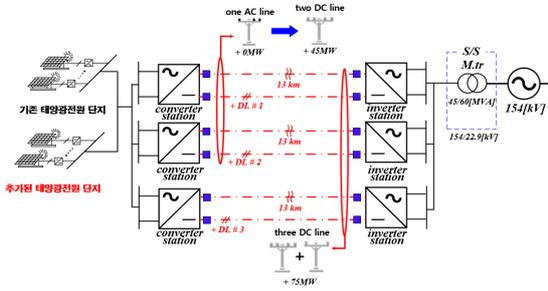
상기의 2.2.1절에서 제시한 기존의 AC 배전망 모델에서 태양광전원이 추가적으로 연계될 경우, 기존의 AC 배전망을 활용한 AC/DC 하이브리드 배전망 도입모델은 그림 3과 같다. 먼저, 기존 AC 배전망 모델에 30[MW]의 태양광전원을 추가적으로 연계할 경우, AC/DC 하이브리드 배전망 도입모델은 그림 3의 DL #2와 같이 DC 1회선을 증설하고, 실증배전망에 설치된 컨버터 및 인버터 스테이션을 통해 기존의 전주를 이용하여 ±35kV급의 MVDC 배전선로와 AC 1회선을 활용한다. 또한, 30[MW]를 초과하는 태양광전원이 연계될 경우, 그림 3의 D/L #3과 같이 MVDC 스테이션과 함께 DC 1회선 및 전주를 신설해야 한다.



[그림 3] AC/DC 하이브리드 배전망 모델

2.2.3 MVDC 배전망 도입모델

상기의 2.2.1절에서 제시한 기존의 AC 배전망 모델에서 태양광전원이 추가적으로 연계될 경우, 기존의 AC 배전망의 선로를 DC 배전선로로 전환하는 MVDC 배전망 도입모델은 그림 4와 같다. 먼저, 기존 AC 배전망 모델에 30[MW]의 태양광전원을 추가적으로 연계할 경우, MVDC 배전망 도입모델은 그림 4의 D/L #1과 #2와 같이 기존의 AC 배전선로에 1개의 도체(선로)를 추가하여 DC 2회선으로 전환하고, 실증배전망에 설치된 컨버터 및 인버터 스테이션과 새로운 컨버터 및 인버터 스테이션을 통해 기존의 전주를 이용하여 ±35kV급의 MVDC 배전선로로 활용한다. 또한, 45[MW]를 초과하는 태양광전원이 연계될 경우, 그림 4의 D/L #3과 같이 MVDC 스테이션과 함께 DC 1회선 및 전주를 신설해야 한다.



[그림 4] DC 배전망 모델

3. ±35kV급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링

3.1 비용요소 모델링

3.1.1 AC/DC 배전망 건설비용 및 운용비용

AC 배전망 건설비용은 태양광전원을 수용하기 위하여 AC 배전망을 건설하는데 지출되는 총 비용으로서, 식 (1)과 같이 구성된다. 또한, DC 배전망 건설비용은 태양광전원을 수용하기 위하여 DC 배전망을 건설하는데 지출되는 총 비용으로서, 식 (2)와 같이 MVDC 스테이션과 배전선로의 건설비로 구성된다. 여기서, MVDC 스테이션의 건설비는 식 (3)과 같이 단위 설비 비용에 인버터와 컨버터 스테이션의 용량을 각각 곱하여 산정한다. 또한, 배전선로의 건설비는 식 (4)와 같이 DC 차단기와 배전선로의 회선수, 공장, 전주로 구성한다. 그리고, DC 차단기는 선로의 회선 수를 고려하여 DC 차단기의 개수를 상정한다.

$$C_{AC} = C_{T/L} \cdot L_{T/L} + C_{D/L} \cdot L_{D/L} \cdot N_{D/L} + C_{U/P} \cdot \frac{L_{D/L}}{P_{span}} \quad (1)$$

$$C_{DC} = C_{stn} + C_{fdr} \quad (2)$$

$$C_{stn} = C_{I/S} \cdot Q_{I/S} + C_{C/S} \cdot Q_{C/S} \quad (3)$$

$$C_{fdr} = N_{D/L} \cdot (k \cdot C_{CB} + C_{D/L} \cdot L_{D/L}) + C_{U/P} \cdot \frac{L_{D/L}}{P_{span}} \quad (4)$$

여기서, C_{AC} : AC 배전망 건설비용(원), $C_{T/L}$: 지중선로 공사비용(원/km), $L_{T/L}$: 지중선로 공장(km), $C_{D/L}$: 배전선로 공사비용(원/km), $L_{D/L}$: 배전선로 공장(km), $N_{D/L}$: 배전선로의 회선 수, $C_{U/P}$: 전주 공사비용(원/km), P_{span} : 전주경간(m), C_{DC} : DC 배전망 건설비용(원), C_{stn} : MVDC 스테이션의 건설비용(원), $C_{I/S}$: 인버터 스테이션 공사비용(원/MW), $Q_{I/S}$: 인버터 스테이션 용량(MW), $C_{C/S}$: 컨버터 스테이션 공사비용(원/MW), $Q_{C/S}$: 컨버터 스테이션 용량(MW), C_{fdr} : DC 배전선로의 건설비용(원), $C_{D/L}$: 배전선로 공사비용(원/km), $L_{D/L}$: 배전선로 공장(km), $N_{D/L}$: 배전선로의 회선 수, $C_{U/P}$: 전주 공사비용(원/km), P_{span} : 전주경간(m), C_{CB} : DC 차단기 건설비용(원/대), k : DC 차

단기의 개수

한편, 운용비용은 AC 또는 DC 배전망을 운용할 때 발생하는 비용으로서, 식 (5)와 같이 AC 또는 DC 배전망의 건설비용에 대하여 일정 값을 곱하여 산정한다.

$$C_{op}(y) = \begin{cases} C_{AC} \cdot R_{op} & \text{in AC system} \\ C_{DC} \cdot R_{op} & \text{in DC system} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, $C_{op}(y)$: 해당연도의 운용비용(원), y : 해당연도, R_{op} : 운용비에 대한 비율(%)

3.2 편익요소 모델링

3.2.1 AC/DC 배전망 손실비용

본 논문에서 AC/DC 배전망의 손실비용은 AC 선로를 사용하는 기존 배전망과 DC 선로를 사용하는 DC 배전망 간에 발생하는 선로손실비용의 차이를 고려하여 식 (6)과 같이 산정한다. 여기서, 선로손실비용은 식 (7)과 같이 태양광전원의 용량을 기준으로 연간 발전량과 선로손실률, 선로공장을 곱하여 총 손실량을 계산하고, 해당 연도의 SMP(system marginal price)를 고려하여 총 연간 선로 손실비용을 산정한다.

$$B_{loss} = C_{loss,AC}(y) - C_{loss,m}(y) \quad (6)$$

$$C_{loss}(y) = t_{year} \cdot SMP(y) \cdot Q_{PV} \cdot U_{PV} \cdot R_{loss} \cdot L_{D/L} \quad (7)$$

여기서, B_{loss} : DC 선로의 전력손실 저감효과에 따른 편익(원), $C_{loss,AC}(y)$: 기존 AC 배전망의 선로 손실비용, m : 서로 다른 종류의 배전망, $C_{loss,m}(y)$: 서로 다른 종류의 배전망의 선로 손실비용, $C_{loss}(y)$: 해당연도의 선로손실비용(원), R_{op} : 운용비에 대한 비율(%), $SMP(y)$: 해당연도의 태양광전원의 전력거래단가(원/kWh), Q_{PV} : 태양광전원의 용량(MW), U_{PV} : 태양광전원 설비의 이용률(%), R_{loss} : 선로손실률(%), t_{year} : 연간 발전시간(8,760시간)

3.2.2 태양광전원의 연계용량에 따른 편익

태양광전원의 연계용량에 따른 편익은 전력량요금, 신재생에너지의 REC(renewable energy certificate)요금으로 구성된다. 먼저, 전력량요금은 태양광전원의 발전량에 대한 전력판매 요금으로서, 식 (8)과 같이 전력거래량과 전력거래단가에 선로손실률[%]를 고려하여 산정한다. 또한, 태양광전원의 REC 요금은 태양광전원의 발전량과 REC 가격, REC 가중치를 고려하여 식 (9)와 같이 산정한다. 단, 본 논문에서는 상기의 2장에서 제시한 AC 배전망, AC/DC 하이브리드 배전망, MVDC 배전망 모델에 대하여, 태양광전원의 연계용량에 따른 편익이 모두 동일한 경우로 적용한다.

$$B_{kWh} = P_{kWh} \cdot U_{SMP} \cdot R_{loss} \quad (8)$$

$$B_{REC} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot k_i \cdot U_{REC,i} \quad (9)$$

여기서, B_{kWh} : 태양광전원의 발전량에 대한 전력량요금(원), P_{kWh} : 전력거래량(kWh), U_{SMP} : 전력거래단가(원/kWh), R_{loss} : 선로손실률(%), B_{REC} : REC 요금(원), P_i : i 전원의 발전량(KWh), m : 신재생에너지 전원의 종류, k_i : 신재생에너지의 REC 가중치, $U_{REC,i}$: 신재생에너지의 REC 단가(원/MWh)

3.3 현재가치 환산법

경제성평가를 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생할 가치로서, 식 (12)와 같이 미래의 가치에 할인율을 적용한 현재가치 환산법을 이용하여 비용 및 편익요소를 동일한 시점의 가치로 산정하여 경제성을 평가한다.

$$PW = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+d)^t} \quad (12)$$

여기서, PW : 현재가치(원), CF : 현금흐름(원), n : 기간(years), d : 할인율(%)

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

상기에서 제시한 ±35kV급 MVDC 실증배전망을 바탕으로 태양광전원의 연계용량 및 선로 공장에 따른 시나리오별 배전망 모델의 타당성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 또한, 고압 배전선로, 1도체 추가비용, 지중 배전선로, 전주, 인버터 및 컨버터 스테이션, DC 차단기와 같은 전력설비 구성요소에 따른 설치비용 단가는 표 2와 같이 상정한다.

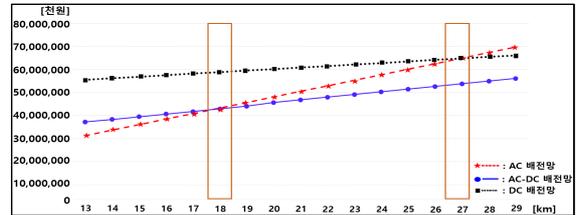
[표 1] 경제성 평가조건

내역	파라메타	내역	파라메타	
경제성 평가기간[year]	20	선로손실률 [%/km]	AC	0.31
			DC	0.065
물가 상승률[%]	3	SMP 가격 [원/kWh]	196.65	
할인율[%]	5.5	REC 요금 [원/kWh]	56.48	
운용비율[%]	2.5			
시나리오 구성	case 1	AC 배전망		
	case 2	AC/DC 배전망		
	case 3	DC 배전망		
태양광전원의 추가 연계용량[MW] : 30, 60				
선로 공장[km] : 13~29				

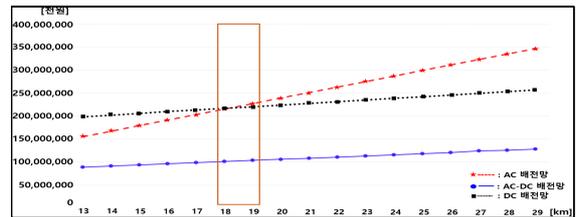
[표 2] 전력설비 구성요소에 따른 설치비용 단가

내역	단가	내역	단가
고압 배전선로 [thousand won/km] (ACSR 240 mm ²)	148,200	배전선로 1 도체 [thousand won/km] (ACSR 240 mm ²)	38,000
지중 배전선로 [thousand won/km] (CNCV-W-600 mm ²)	3,281,382	컨버터 및 인버터 스테이션 [thousand won /MW]	200,000
전주(경간 40m) [thousand won/km]	97,500	DC 차단기 [thousand won/EA]	228,000

4.2 ±35kV급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 상에서 제시한 배전망의 시나리오별 도입 타당성을 평가하기 위하여, 태양광전원이 30[MW]와 60[MW] 증설된 경우, 선로 공장에 따른 시나리오별 비용 및 편익특성을 비교하여 나타내면 그림 5와 같다.



(a) 태양광전원이 30[MW] 증설된 경우



(b) 태양광전원이 60[MW] 증설된 경우

[그림 5] 선로 공장에 따른 시나리오별 비용 및 편익특성 비교

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

5. 결 론

본 논문에서는 MVDC 배전망의 도입에 대한 타당성을 평가하기 위하여, MVDC 실증배전망을 바탕으로 태양광전원의 연계용량 및 선로 공장을 고려한 시나리오 별 MVDC 도입 모델을 제시하고, 이를 기반으로 경제성평가 모델링을 수행한다. 제시한 모델링을 바탕으로 현재가치환산법을 이용하여 경제성을 평가한 결과, 태양광전원의 규모에 따라 일정 선로공장 이후에서 MVDC 배전망이 기존의 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 이후동, 김기영, 김미성, 노대석, “태양광전원 수용을 위한 MVDC 배전망의 경제성평가 모델링에 관한 연구”, 산학기술학회논문지, 22(3), 1-12