

대규모 태양광전원 발전단지용 MVDC 배전망의 경제성 평가 모델링

이후동*, 한병길*, 권순환*, 김기영*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:lh714@koreatech.ac.kr

Economic Evaluation Modeling of MVDC Distribution System for Large-scale PV Plants

Hu-Dong Lee*, Byeong-Gill Han*, Soon-Hwan Kwon*, Gi-Young Kim*, Dae-Seok Rho*

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

요 약

MVDC 배전기술은 현재 급격하게 도입되고 있는 태양광전원의 접속지연 문제를 해결하기 위한 효과적인 대안으로 평가되고 있지만, DC 배전망용 기기들을 개발해야 하므로 DC 배전망의 구축비용은 경제적인 측면에서의 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 수용을 위한 MVDC 배전망의 도입 타당성을 평가하기 위하여, 대규모 태양광전원 단지를 수용하기 위한 배전망을 건설하는 경우에 대한 경제성평가 모델링을 제시한다. 이 모델링은 크게 비용요소와 편익요소로 구성되며, 비용요소로는 AC 및 DC 배전망의 건설비, 전력변환설비의 교체비 등이 포함되고, 편익요소로는 태양광전원의 발전수익에 따른 전력량 요금 및 REC 요금이 고려된다. 이를 바탕으로 현재까지 환산법과 원금균등상환 방식을 이용하여 MVDC 배전망의 경제성을 평가한 결과, 일정 연계거리 이후에서는 DC 배전망의 구축비용이 기존의 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있었다.

1. 서 론

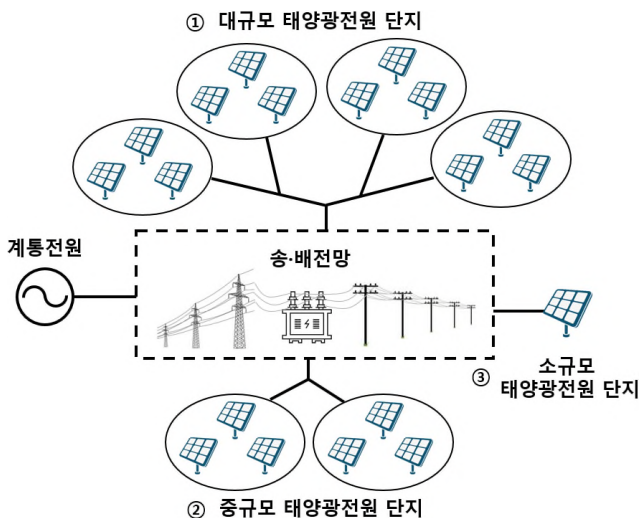
MVDC 배전기술은 현재 급격하게 도입되고 있는 태양광전원의 접속지연 문제를 해결하기 위한 효과적인 대안으로 평가되고 있지만[1], DC 배전망용 기기들을 개발해야 하므로 DC 배전망의 구축비용은 경제적인 측면에서의 문제점을 가지고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 수용을 위한 MVDC 배전망의 도입 타당성을 평가하기 위하여, 대규모 태양광전원 단지 수용하기 위한 배전망을 건설하는 경우에 대하여 수용 모델을 제시한다. 이 모델은 배전망의 전원공급 방식에 따라 AC 및 DC 배전망으로 구분될 수 있으며, 수백 MW급을 대규모로 정의한다. 또한, 본 논문에서는 AC 및 DC 배전망의 건설비, 전력변환설비의 교체비로 구성된 비용요소와 태양광전원의 발전수익에 따른 전력량 요금 및 REC 요금으로 구성된 편익요소를 고려하여 MVDC 배전망의 경제성평가 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로 현재까지 환산법과 원금균등상환 방식을 이용하여 MVDC 배전망의 경제성을 평가한 결과, 태양광전원의 수용 규모에 따라 일정 연계거리 이후에서는 DC 배전망의 구축비용이 기존의 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 경제성평가 모델링의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원 단지의 규모별 정의

일반적으로, 태양광전원은 일사량이 및 주변온도와 같은 환경자원이 풍부한 지역에 주로 설치되며, 설립가능한 지역의 면적에 따라 태양광전원 단지의 규모가 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 태양광전원 단지들은 태양광 패널에서 발전된 에너지를 부하에 공급하기 위하여, 송·배전망에 연계 및 운용된다. 그러나, 송·배전망을 구성하는 주요설비들은 일정한 규격과 정격용량을 가지는 표준품으로 구성되므로, 태양광전원 단지의 규모가 어느 용량 수준을 초과할 경우, 해당 단지를 수용하기 위한 송·배전망의 구성요소들은 달라지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원을 수용하기 위한 송·배전망의 모델을 단지의 용량에 따라 그림 1과 같이 규모별로 정의하고자 한다.

여기서, 그림 1의 ①은 수백 MW 이상의 대규모 태양광전원 단지를 송·배전망을 통해 수용하는 경우이고, ②는 수십 MW부터 수백 MW이하의 중규모 태양광전원 단지, ③은 수 MW이하의 소규모 태양광전원 단지에 대하여 수용하는 경우를 나타낸 것이다. 먼저, 대규모 및 중규모 태양광전원 단지의 경우, 배전용 변전소의 주 변압기 1bank의 용량(60MVA)을

초과하기 때문에 변전소의 신설이 불가피하고, 태양광전원의 연계거리가 멀어지게 되면, AC 배전선로의 공급전압 제약으로 인하여 송전선로의 신설이 요구된다. 이에 따라, 그림 1의 ①과 ②의 경우, 송전선로와 AC배전선로를 이용하여 태양광전원을 연계하는 방안과 컨버터 스테이션을 활용하여 DC배전망으로 연계하는 방안이 고려될 수 있다. 한편, 그림 1의 ③의 경우에는 태양광전원 단지의 용량이 배전선로의 1회선 용량(10MVA) 보다 작으므로, 송전선로와 변전소의 신설 없이 AC배전선로로 연계하는 방안과 컨버터 스테이션을 통해 DC 배전망으로 연계하는 방안을 고려할 수 있다.



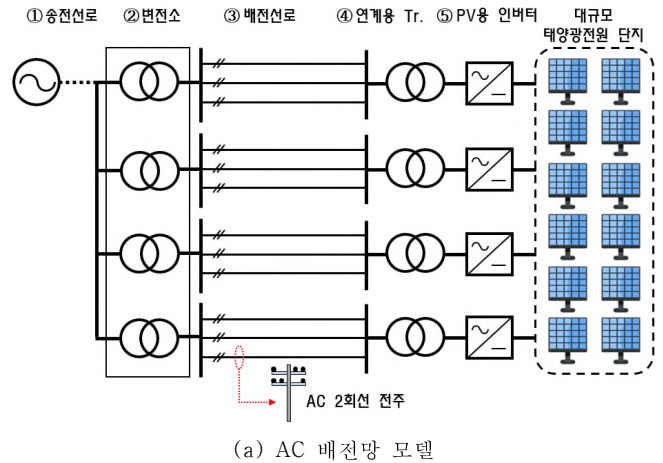
[그림 1] 태양광전원 단지의 규모별 정의

3. 태양광전원 단지용 MVDC 배전망의 경제성평가 모델링

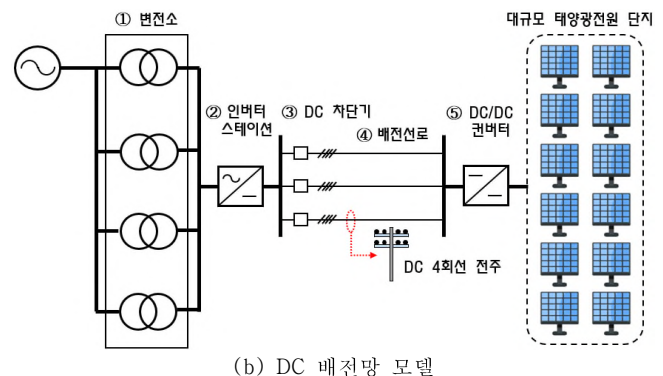
3.1 태양광전원 수용 모델

일반적으로, 태양광전원은 일사량이 및 주변온도와 같은 환경자원이 풍부한 지역에 주로 설치되며, 설립가능한 지역의 면적에 따라 태양광전원 단지의 규모가 다양하게 나타날 수 있다. 그러나, 송·배전망을 구성하는 주요설비들은 일정한 규격과 정격용량을 가지는 표준품으로 구성되므로, 태양광전원 단지의 규모가 어느 용량 수준을 초과할 경우, 해당 단지를 수용하기 위한 송·배전망의 구성요소들은 달라질 수 있다. 본 논문에서는 특정 지역에 집중된 태양광전원의 접속지연 문제를 해결하기 위하여, 대규모 태양광전원 단지를 수용하기 위한 AC 및 DC 배전망의 구성 모델을 제시하면 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2의 (a)는 기존의 AC 배전망을 활용한 수용 모델로, 154KV 송전선로, 배전용변전소, 22.9KV 배전선로와 전주 그리고 계통연계용 변압기와 인버터로 구성된다. 한편, 그림 2의 (b)는 DC 배전망에 의한 수용 모델을 나타낸 것으로, 배전용변전소, 컨버터 스테이션, DC 차단기, 22.9KV 배

전선로와 전주 그리고 DC/DC 컨버터로 구성된다. 여기서, DC 배전망에 사용된 배전선로는 기존의 AC 배전선로와 동일한 것으로 상정하며, 회선 당 공급용량은 기존 AC 배전선로의 전기적인 성능을 고려하여 DC $\pm 35KV$ 공급 시 최대 24MW로 증가하게 된다. 또한, AC 2회선(6도체)을 기준으로 하나의 전주에 두 가닥의 선로를 추가하면, 총 DC 4회선(8도체)으로 전주 당 96MW의 태양광전원이 연계될 수 있다.



(a) AC 배전망 모델



(b) DC 배전망 모델

[그림 2] 대규모 태양광전원의 수용을 위한 배전망 모델

3.2 비용요소 모델링

(1) AC 및 DC 배전망 건설비용

AC 배전망 건설비용은 태양광전원을 수용하기 위하여 AC 배전망을 건설하는데 지출되는 총 비용으로서, 비용요소는 식 (1)과 같이 송전선로, 변전소, 배전선로, 연계용변압기 및 인버터 신설비로 구성된다.

$$C_{AC} = C_{T/L} \cdot l_{T/L} + C_{S/S} + N_{D/L} \cdot C_{D/L} \cdot l_{D/L} + Q_{PV} \cdot (C_{tr} + C_{inv}) \quad (1)$$

여기서, C_{AC} : AC 배전망 건설비용(원), $C_{T/L}$: 송전선로 공사비용(원/Km), $l_{T/L}$: 송전선로 공장(Km), $C_{S/S}$: 변전소 공사비용(원), $N_{D/L}$: 배전선로의 회선 수, $C_{D/L}$: 배전선로 공사비용(원/Km), $l_{D/L}$: 배전선로 공장(Km), Q_{PV} : 태양광전원의 용

량(MW), C_{tr} : 연계용변압기 설비비용(원/MW), C_{inv} :인버터 설비비용(원/MW)

한편, DC 배전망 건설비용은 태양광전원을 수용하기 위하여 DC 배전망을 건설하는데 지출되는 총 비용으로서, 비용요소는 식 (2)와 같이 변전소, 컨버터 스테이션, DC/DC 컨버터, 배전선로 및 DC 차단기로 구성된다.

$$C_{DC} = C_{S/S} + Q_{C/S} \cdot C_{C/S} + Q_{PV} \cdot C_{conv} + N_{D/L} \cdot (\alpha \cdot C_{DCCB} + C_{D/L} \cdot L_{D/L}) \quad (2)$$

여기서, C_{DC} : DC 배전망 건설비용(원), $Q_{C/S}$: 컨버터 스테이션 용량(MW) $C_{C/S}$: 컨버터 스테이션 건설비용(원/MW), C_{conv} : DC/DC 컨버터 설비비용(원/MW), α : DC 배전의 공급 방식(mono-pole: 1, bi-pole: 2), C_{DCCB} : DC 차단기(원/대)

(2) 전력변환설비의 교체비용

교체비용은 인버터 및 컨버터의 내용연수로 인하여 교체함에 따라 추가로 발생하는 비용으로서, 설치연도를 기준으로 전력변환설비의 초기설치 비용에 가격 할인율을 고려하여 식 (3)과 같이 산정한다.

$$C_{ch}(x) = \begin{cases} Q_{PV} \cdot C_{inv} \cdot (1-d)^x & \text{in } AC \text{ system} \\ (Q_{D/L} \cdot C_{C/S} + Q_{PV} \cdot C_{conv}) \cdot (1-d)^x & \text{in } DC \text{ system} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $C_{ch}(x)$: 내용연수에 의한 전력변환설비의 교체비용(원), x : 전력변환설비의 내용연수(년), d : 할인율(%)

3.3 편익요소 모델링

전력판매요금은 식 (4)와 같이 발전사업자가 태양광전원의 발전량에 대해 전기판매사업자에게 받는 전력량 요금과 발전량에 비례하여 발전사업자가 받는 REC 요금으로 구성되며, 태양광전원의 용량과 이용률을 곱하여 구한다.

$$B_{PV}(y) = t_{year} \cdot (SMP(y) + REC(y) \cdot WF_{REC}) \cdot Q_{PV} \cdot U_{PV} \quad (4)$$

여기서, $B_{SMP}(y)$: 해당연도의 전력량요금(원), t_{year} : 연간 발전시간(8,760 시간), 여기서, $B_{REC}(y)$: 해당연도의 REC 요금(원), $REC(y)$: 해당연도의 태양광전원의 REC 단가(원/KWh), WF_{REC} : 태양광전원의 REC 가중치

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 경제성평가 조건

3장의 AC 및 DC 배전망 모델을 바탕으로 MVDC 배전망의 경제성평가를 위한 파라미터 조건을 나타내면 표 1과 같다. 이 표에서와 같이, 경제성평가 조건은 대출받은 원금을 30년간 매년 동일하게 지불하는 원금균등 상환방식을 적용하고, 은행의 이자율과 미래의 가치에 대한 할인율은 각각 3.46%와 7%로 상정한다. 또한, AC 및 DC 배전망의 각 구성요소별 건설비용 조건은 송전선로, 배전선로, 변전소, 컨버터 스테이션 등에 대한 설비 및 공사비용 등을 표 1과 같이 상정하여 경제성 분석을 수행한다.

[표 1] 경제성평가 조건

항목	내용	구성요소	비용
평가기간[년]	30	송전선로 공사비용[천원/km] (XLPE 2,000mm ² , 지중)	4,523,260
운용비용율[%]	10	AC 선로 1회선[천원/km] (ACSR 160mm ²)	98,000
배전선로 손실율 [%/km]	AC 0.313	AC 선로 1도체 추가비용 [천원/km]	25,000
	DC 0.0647	변전소 신설[천원]	2bank 17,700,000 4bank 23,000,000
태양광전원 이용률[%]	14.6	전주 공사비용 [천원/km](경간 40m)	97,500
할인율[%]	7	PV 연계용변압기 [천원/MVA]	100,000
이자율[%]	3.46	PV용 인버터[천원/MW]	40,000
SMP 가격[원/kWh]	90.74	컨버터 스테이션[천원/MW]	200,000
REC 요금[원/kWh]	63.57	DC/DC 컨버터[천원/MW]	101,010
송전선로 단위 공장[km]	20		
내용연수 [년]	AC 설비 30 전력변환설비 15	DC 차단기[천원/EA]	228,000
상환방식	원금균등 상환방식		

4.2 태양광전원 수용 모델의 경제성평가

상기의 경제성평가 조건을 바탕으로, 240MW의 대규모 태양광전원 단지를 수용하기 위한 AC배전망과 DC배전망에 대한 건설비용을 연계거리별로 평가하면 표 2와 그림 3과 같다. 여기서, 표 2와 그림 3의 (1)은 22.9KV AC배전선로만으로 태양광전원을 연계하는 경우이고, (2)는 AC 배전선로의 전압제약에 의해 154KV 송전선로를 신설하여 22.9KV AC배전선로로 태양광전원을 수용하는 경우이며, (3)은 컨버터 스테이션을 설치하여 ±35KV MVDC 배전선로로 태양광전원을 연계하는 경우이다. 이 그림에서와 같이, 23[Km]의 연계지점까지는 기존의 22.9KV AC배전선로로 수용하는 것이 경제적이지만, 17.5[Km] 이상의 연계거리에서는 전압제약으로 인하여, 기술적으로 태양광전원을 수용할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위하여 154KV 송전선로를 신설하는 경우, 비용의 상승으로 인하여 DC배전망의 건설비용보다 경제성이 감소하게 되며, 수많은 회선(24회선)과 전주(12대씩)를 설치해야하므로 대규모의 태양광전원을 수용하기 위한 모델로는 현실적으로 어려움

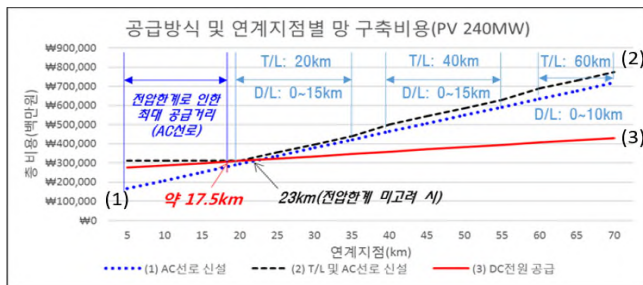
을 알 수 있다. 그러나, $\pm 35\text{KV}$ MVDC 배전선로는 전주 당 약 100MW의 배전용량이 가능하고, 배전 공장도 AC에 비하여 3-4배 정도로 증가할 뿐만 아니라 선로공장이 17.5km 이상이 면 기존의 AC선로에 비하여 경제성이 있음을 알 수 있다.

[표 2] 대규모 수용 모델의 공급방식별 경제성평가

선로공장	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km
(1) AC선로 신설	₩167,419	₩209,844	₩252,269	공급불가	공급불가	공급불가	공급불가
(2) T/L 및 AC선로 신설	-	-	-	₩313,205 (T/L: 20km, D/L: 0km)	₩355,630 (T/L: 20km, D/L: 5km)	₩398,054 (T/L: 20km, D/L: 10km)	₩440,479 (T/L: 20km, D/L: 15km)
(3) DC공급	₩275,925	₩287,841	₩299,757	₩311,673	₩323,589	₩335,505	₩347,421

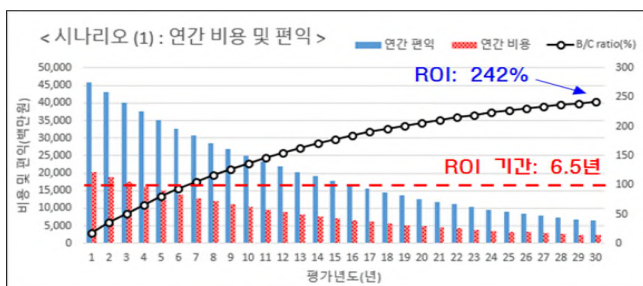
(백만원)

선로공장	40km	45km	50km	55km	60km	65km	70km
(2) T/L 및 AC선로 신설	₩501,415 (T/L: 40km, D/L: 0km)	₩543,840 (T/L: 40km, D/L: 5km)	₩586,265 (T/L: 40km, D/L: 10km)	₩628,690 (T/L: 40km, D/L: 15km)	₩689,626 (T/L: 60km, D/L: 0km)	₩732,051 (T/L: 60km, D/L: 5km)	₩774,476 (T/L: 60km, D/L: 10km)
(3) DC공급	₩359,337	₩371,253	₩383,169	₩395,085	₩407,001	₩418,917	₩430,833

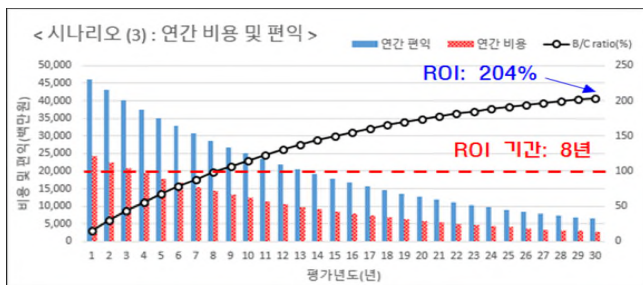


[그림 3] 대규모 수용 모델의 공급방식별 경제성평가

한편, 기존의 22.9KV 배전선로와 $\pm 35\text{KV}$ MVDC 배전선로의 2가지 대안에 대하여 원금균등상환방식(30년 기준)에 의하여, 선로공장 중거리(15km)와 장거리(25km) 연계지점에 대하여 B/C Ratio를 분석하면, 그림 4와 그림 5와 같다. 먼저, 그림 4에서와 같이, 15km의 중거리 배전선로를 건설하는 경우, 기존의 AC방식으로 배전망을 구축하는 것이 DC방식보다 경제적이지만, 그림 5에서와 같이 25km의 중거리 배전선로를 건설하는 경우, DC방식이 기존의 AC 방식보다 17% 정도 경제적으로 유리함을 알 수 있다.

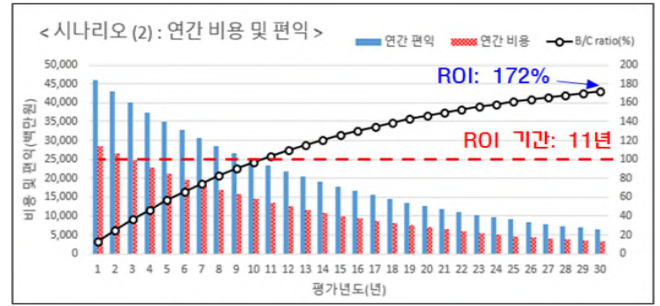


(a) AC 배전망 모델

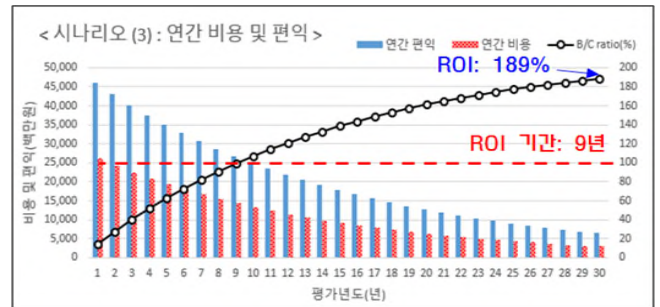


(b) DC 배전망 모델

[그림 4] 대규모 수용 모델의 공급방식별 ROI 특성(15Km)



(a) AC 배전망 모델



(b) DC 배전망 모델

[그림 5] 대규모 수용 모델의 공급방식별 ROI 특성(25Km)

5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원의 수용을 위한 MVDC 배전망의 도입 타당성을 평가하기 위하여, 대규모 태양광전원 단지를 수용하기 위한 AC 및 DC 배전망의 모델과 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성평가 모델링을 제시하였다. 이를 바탕으로 현재가치 환산법과 원금균등상환 방식을 이용하여 MVDC 배전망의 경제성을 평가한 결과, 일정 연계거리 이후에서는 DC 배전망의 구축비용이 AC 배전망보다 경제적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한창희, 장길수, 이한상, “MVDC(Medium-Voltage Direct Current) 기술 동향”, 전기의세계, vol.68, no.1, pp. 17-21, 2019.
- [2] 한국과학기술기획평가원(KISTEP), “Multi-Terminal 직류 송·배전 시스템 개발사업”, 예비타당성 조사 보고서, 2014.