

# 신재생에너지의 출력제한 완화를 위한 VPL의 경제성평가 모델링에 관한 연구

노성은\*, 이나경\*, 이예빈\*, 김응상\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, \*\*한국전기연구원

e-mail:eununny0513@koreatech.ac.kr

## A Study on Economic Evaluation of VPL to Improve Power Curtailment of Renewable Energy Sources

Seong-Eun Rho\*, Na-Kyung Lee\*, Ye-bin Lee\*, Eung-Sang Kim\*\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education,

\*\*Korea Electrotechnology Research Institute

### 요약

최근, 제주도의 신재생에너지 전원이 제주도 발전용량의 약 20%까지 증가하여, 신재생에너지의 출력제한이 빈번하게 발생하고 있다. 그리고, 신재생에너지를 연계하기 위한 전력설비 인프라의 부족으로 인하여 신재생에너지가 접속 대기 중에 있어, 신재생에너지의 접속지연 문제를 해결하기 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설 및 신설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되므로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비를 추가로 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 운용하여, 전력계통을 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술인 VPL(virtual power line) 운용모델을 제시하고, 이를 도입하기 위한 타당성을 평가하기 위하여 VPL의 경제성평가 방안을 제시한다. 여기서, 경제성평가 모델링은 크게 비용요소와 편익요소로 구성되며, 비용요소는 설치비용과 운용비용, 편익요소는 신재생에너지의 출력제한 완화와 전력설비 투자지연에 의한 편익으로 구성된다. 이를 바탕으로, 규모별 VPL의 도입 모델에 대하여, 현재 가치 환산법을 이용하여 경제성평가를 수행한 결과, VPL의 적절한 용량을 선정하면 기존의 인프라 투자보다 효과적임을 알 수 있다.

## 1. 서론

최근, RE3020 정책에 따라 신재생에너지 전원의 도입이 매년 급격하게 증가되고 있다. 그러나 제주도의 경우, 급속도로 도입된 신재생에너지 전원에 의하여 출력제한 사례가 빈번하게 보고되고 있어, 경제적으로 막대한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비의 인프라를 추가적으로 설치하는 방안이 제시되고 있지만, 경제적으로 높은 건설비용이 발생함으로 전력설비 인프라의 투자비용을 경감시킬 수 있는 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 운용하여, 송·배전계통을 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술인 VPL 운용모델을 제시한다. 또한, VPL 도입의 타당성을 평가하기 위하여, 비용요소와 편익요소로 구성된 VPL의 경제성평가 모델링을 제시한다. 상기에서 제시한 VPL의 도입 모델 및 경제성평가 모델링을 바탕으로, VPL의 경제성을 평가한 결과, 최적 용량의 VPL 모델을 선정하면 기존의 전력설비 인프라에 대한 투자보다 효과적임을 알 수 있

었다.

## 2. 태양광전원이 연계된 ±35kV급 MVDC 배전망의 도입 모델

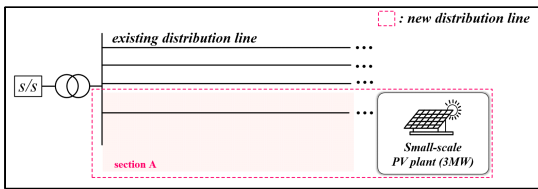
### 2.1 신재생에너지 전원의 규모별 정의

일반적으로, 신재생에너지 전원은 일사량 및 주변 온도와 같은 환경자원이 풍부한 지역에 주로 설치되며, 설립 가능한 지역의 면적에 따라 신재생에너지 단지의 규모가 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 신재생에너지 전원들은 발전된 에너지를 부하에 공급하기 위하여, 송·배전망에 연계되어야 한다. 그러나, 송·배전망을 구성하는 설비들은 일정한 정격용량을 가지므로, 신재생에너지 전원의 연계되는 규모가 일정 용량을 초과하면, 배전선로의 공급 허용용량을 벗어날 수 있으므로 안정적인 전력공급을 위해 신재생에너지 전원의 출력을 제한하는 경우가 발생하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지 전원의 발전 단지는 소규모, 중규모, 대규모로 분류한다. 먼저, 소규모 모델은 수 MW 이하의 소규모 신재생에너지가 배전선로를 통하여 연계되는 경우이며, 중규모 모델은

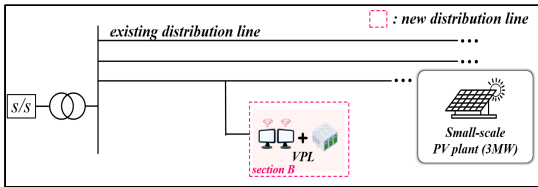
수 MW부터 수십 MW 정도의 신재생에너지 전원, 대규모 모델은 수십 MW부터 수백 MW 규모의 신재생에너지 전원을 수용하는 경우를 나타낸다.

### 2.2 소규모 신재생에너지 전원 수용 모델

상기에서 제시한 신재생에너지 전원의 규모별 정의를 바탕으로, 수 MW 이하의 소규모 신재생에너지 전원을 수용하기 위한 배전계통의 구성모델을 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2(a)는 기존 전력설비에 소규모 신재생에너지 전원이 연계된 경우, 기존 전력설비에 가공선로 1회선 및 전주를 신설하는 모델을 나타내는데, 전력회사는 신재생에너지 전원의 연계를 위하여 이용률이 낮은 설비에 투자를 감수해야 한다. 그러나 그림 2(b)와 같이 VPL을 배전계통에 도입하게 되면, 전력설비 인프라의 추가적인 투자 없이 기존의 배전선로에 VPL을 연계하여 VPL용 ESS의 충·방전 동작에 의하여 효율적으로 배전계통을 운용할 수 있다.



(a) 전력설비가 추가된 배전계통 모델

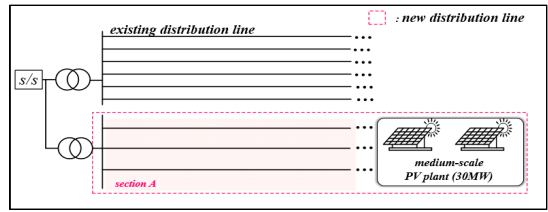


(b) VPL이 설치된 배전계통 모델

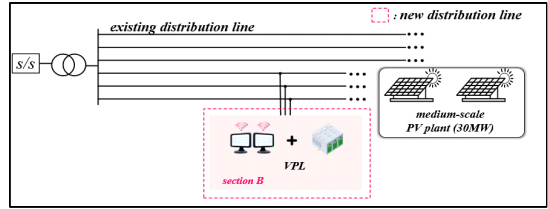
[그림 2] 소규모 신재생에너지 전원의 수용을 위한 배전망 모델

### 2.3 중규모 신재생에너지 전원 수용 모델

수 MW 부터 수십 MW 정도의 중규모 신재생에너지 전원을 수용하기 위한 배전계통의 구성모델을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3(a)는 기존 전력설비에 중규모 신재생에너지 전원이 연계된 경우, 기존 전력설비에 배전용 변전소의 주변압기 1대와 가공선로 3회선 및 전주를 신설하는 모델을 나타내는데, 전력회사는 신재생에너지 전원의 연계를 위하여 이용률이 낮은 설비에 투자를 감수해야 한다. 그러나 그림 3(b)와 같이 VPL을 배전계통에 도입하면, 상기와 같은 전력설비 인프라의 추가적인 투자 없이 기존의 배전선로에 VPL을 연계하여 VPL용 ESS의 충·방전 동작에 의하여 효율적으로 배전계통을 운용할 수 있다.



(a) 전력설비가 추가된 배전계통 모델

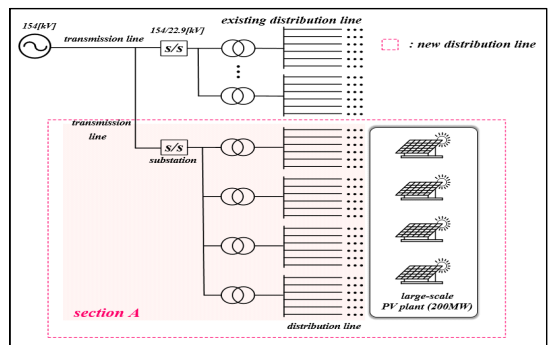


(b) VPL이 설치된 배전계통 모델

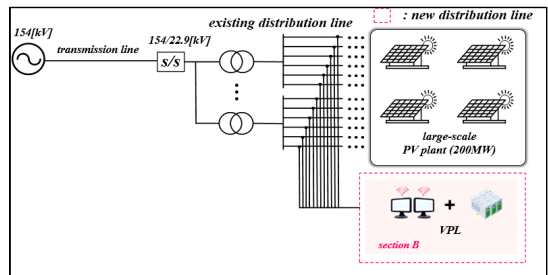
[그림 3] 중규모 신재생에너지 전원의 수용을 위한 배전망 모델

### 2.4 대규모 신재생에너지 전원 수용 모델

수십 MW 이상의 대규모 신재생에너지 전원을 수용하기 위한 배전계통의 구성모델을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4(a)는 기존 전력설비에 대규모 신재생에너지 전원이 연계된 경우, 기존 전력설비에 지중 송전선로, 배전용 변전소, 가공선로 20회선 및 전주를 신설하는 모델을 나타내는데, 전력회사는 신재생에너지 전원의 연계를 위하여 이용률이 낮은 설비에 막대한 투자를 감수해야 한다. 그러나, 그림 4(b)와 같이 VPL을 배전계통에 도입하게 되면 전력설비 인프라의 추가적인 투자 없이 기존의 배전선로에 VPL을 연계하여 VPL용 ESS의 충·방전 동작에 의하여 효율적으로 배전계통을 운용할 수 있다.



(a) 전력설비가 추가된 배전계통 모델



(b) VPL이 설치된 배전계통 모델

[그림 4] 대규모 신재생에너지 전원의 수용을 위한 배전망 모델

### 3. 출력제한 완화를 위한 VPL의 경제성평가 모델링

#### 3.1 비용요소 모델링

VPL의 도입에 대한 비용요소는 설치비용과 운용비용으로 구성된다. 여기서, 설치비용은 VPL을 설치하는데 소요되는 총 비용으로서, 식 (1)과 같이 산정한다. 또한, 운영비용은 VPL을 운용할 때 발생하는 유지보수 비용으로서, 식 (2)와 같다.

$$C_{VPL} = [(C_{PCS} \cdot Q_{PCS}) + (C_{bat} \cdot Q_{bat})] \cdot (1 + \alpha) + \beta \quad (1)$$

$$C_{op} = \sum_{i=1}^n [C_{ESS} \cdot r_{op} \cdot (1 + r_{i.n.f}(i))^{i-1}] \quad (2)$$

여기서,  $C_{VPL}$ :ESS의 총 건설비용(원),  $C_{PCS}$ :PCS의 도입비용(원/kW),  $Q_{PCS}$ :PCS의 설치용량(kW),  $C_{bat}$ :배터리 시스템의 도입비용(원/kWh),  $Q_{bat}$ :배터리 시스템의 설치용량(kWh),  $\alpha$ :VPL 플랫폼 비율(%),  $\beta$ :배터리 교체비용(원/kWh),  $C_{op}$ :총 운영비용(원),  $r_{op}$ :운영비 적용비율(%),  $r_{i.n.f}(i)$ :물가상승률(%),  $i$ :경제성 평가년도,  $n$ :최종 평가년도

#### 3.2 편익요소 모델링

##### 3.2.1 신재생에너지의 출력제한 완화 편익

신재생에너지의 출력제한 완화에 관한 편익은 전력량요금, 신재생에너지의 REC요금, 탄소배출권 요금으로 구성된다. 여기서, 전력량요금은 VPL의 도입으로 인해 출력제한이 완화되어 발생하는 전력 판매 요금으로서, 식 (3)과 같이 산정하며, 신재생에너지의 REC요금은 식 (4)와 같다. 또한, 탄소 배출량은 식 (5)와 같이 산정하고, 탄소배출권 요금은 온실가스양에 따라 정부가 기업에게 제공하는 인센티브 요금이며, 식 (6)과 같이 산정한다.

$$B_{kWh} = P_{kWh} \cdot U_{SMP} \cdot P_{loss} \quad (3)$$

$$B_{REC} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot k_i \cdot U_{REC,i} \quad (4)$$

$$B_{\omega_2} = \sum_{t=1}^T E_{\omega_2}(t) \cdot CER \quad (5)$$

$$E_{\omega_2}(t) = R_{kWh} \cdot C_{fu} \cdot F_{CO_2} \cdot F_{oil} \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{A_C}\right) \quad (6)$$

여기서,  $B_{kWh}$ :출력제한을 완화하여 발생한 전력량 요금(원),  $P_{kWh}$ :전력거래량(kWh),  $U_{SMP}$ :전력거래단가 (원/kWh),  $P_{loss}$ :선로손실률(%),  $B_{REC}$ :REC 요금(원),  $P_i$ : $i$ 전원의 발전량(MWh),  $B_{REC}$ :REC요금(원),  $P_i$ : $i$ 전원의 발전량(kWh),  $k_i$ :신재생에너지의 REC 가중치,  $U_{REC,i}$ :신재생에너지의 REC단가

(원/kWh),  $B_{CO_2}$ :해당연도 탄소배출권 요금(원),  $E_{CO_2}(t)$ :시간대별 탄소배출량(ton), CER:시간대별 온실가스 감축분(CER) 단가(원/ton),  $R_{kWh}$ :신재생에너지의 발전량(ton),  $C_{fu}$ :연료소비율(L/kWh),  $F_{CO_2}$ :탄소배출계수(0.837),  $F_{oil}$ :석유환산계수(0.842),  $M_{CO_2}$ :이산화탄소 분자량(44),  $A_C$ :탄소 원자량(12)

##### 3.2.2 전력설비 투자지연 편익

전력설비 투자지연에 의한 편익은 VPL 도입 시 신재생에너지를 수용하기 위한 기존 전력설비의 구축에 대한 설치비용과 운용비용을 대체하는 것으로, 식 (7)과 같다.

$$B_{def}(i) = \sum_{i=1}^m X_i \quad (7)$$

$$X_1 = C_{D/L} \times L_{D/L} \times N_{D/L} + C_{U/P} \times \frac{L_{D/L}}{P_{span}} \quad (8)$$

$$X_2 = C_{bank} \times k \quad (9)$$

$$X_3 = C_{T/L} \times L_{T/L} + C_{S/S} \times S_{type} \quad (10)$$

여기서,  $B_{def}(i)$ :시나리오( $i$ )별 전력설비 투자지연 편익(원),  $i$ : 시나리오,  $m$ : 시나리오 개수,  $X_1$ :배전선로와 전주 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),  $P_{span}$ :전주 경간(m),  $X_2$ :변전소의 주변압기 건설비용(원/kW),  $C_{bank}$ :주변압기의 건설단가(원/kW),  $k$ :주변압기 개수,  $X_3$ :지중 송전선로와 배전용 변전소 건설비용(원),  $C_{T/L}$ :지중 송전선로 공사비용(원/km),  $L_{T/L}$ :지중 송전선로 공장(km),  $C_{S/S}$ :배전용 변전소의 공사비용(원/kW),  $S_{type}$ :배전용 변전소의 형태

#### 3.3 현재가치 환산법

경제성평가를 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생할 가치로서, 식 (12)와 같이 비용 및 편익요소를 동일한 시점의 가치로 산정하여 경제성을 평가한다.

$$PW = \sum_{1}^n \frac{CF}{(1+d)^n} \quad (11)$$

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

### 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 4.1 비용요소 모델링

##### 4.1 시뮬레이션 조건

출력제한 완화를 위한 VPL의 경제성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 표 1과 같이 시뮬레이션 조건

을 상정한다. 또한, 전력설비 구성요소에 따른 설치비용 단가는 표 2와 같고, VPL용 ESS의 도입용량은 태양광 전원의 이용률에 근거하여, 소규모는 3[MW]/12[MWh], 중규모는 30[MW]/120[MWh], 대규모는 200[MW]/800[MWh] 용량으로 상정한다.

[표 1] 경제성 평가조건

항목	내역
경제성 평가기간[년]	20
할인율[%]	5.5
물가 상승률[%]	3
SMP 가격 단가[원/kWh]	250.74
REC 요금[원/kWh]	56.48
VPL 운용비[%]	2.5
PCS 내용연수[년]	20
배터리 내용연수[년]	10
VPL 플랫폼 비용	ESS의 10%

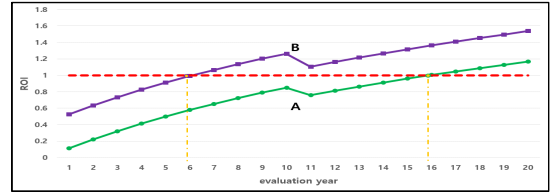
[표 2] 구성요소별 설치비용 단가

항목	비용	
지중 송전선로 1회선 [천원/km] (XLPE 240mm <sup>2</sup> )	4,520,000	
배전용 변전소 [천원] (4bank 기준)	23,000,000	
배전용 변전소의 주변압기[천원] (45/60 MVA)	6,000,000	
고압 배전선로 1회선 [천원/km] (ACSR 160mm <sup>2</sup> )	98,000	
전주[천원/km]	97,500	
ESS	PCS[천원/kW]	90
	배터리[천원/kWh]	500

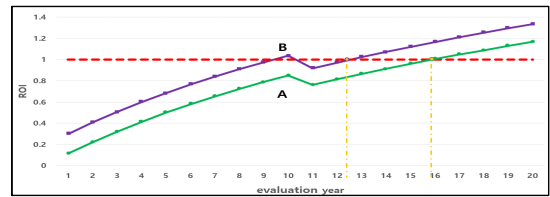
## 4.2 신재생에너지 출력제한 완화에 대한 경제성평가

상기에서 제시한 경제성 평가조건을 바탕으로, 규모별 신재생에너지 전원을 수용하기 위한 VPL의 타당성을 평가하면 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 소규모 신재생에너지 출력제한 완화에 대한 ROI로, VPL의 편익을 전력량요금, 신재생에너지의 REC요금, 탄소배출권 요금으로 구성된 출력제한 완화에 의한 편익만을 고려한 경우 A 그래프와 같이 ROI가 15.9년으로 산정되어 경제성을 확보할 수 없지만, 전력설비 투자지연에 의한 편익(고압 배전선로)까지 고려하면, B 그래프와 같이 ROI는 6.1년으로 평가되어 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)는 중규모 신재생에너지 출력제한 완화에 대한 ROI로, 출력제한 완화에 의한 편익만을 고려한 경우 A 그래프와 같이 ROI가 15.9년으로 산정되지만, 전력설비 투자지연에 의한 편익(배전용 변전소의 주변압기, 고압 배전선로)까지 고려하면, B 그래프와 같이 ROI는 12.6년으로 평가되어 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 5(c)는 대규모 신재생에너지 출력제한 완화에 대한 ROI로, VPL의 편익을 출력제한 완화에 의한 편익만을 고려한 경우 A 그래프와 같이 ROI가 15.9년으로 산정되어 경제성을 확보

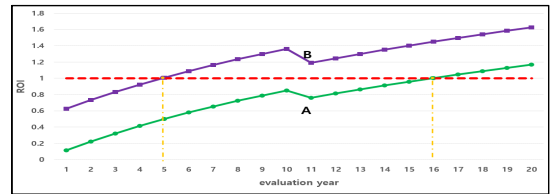
할 수 없지만, 전력설비 투자지연에 의한 편익(지중 송전선로, 배전용 변전소, 배전용 변전소의 주변압기, 고압 배전선로)까지 고려하면, B 그래프와 같이 ROI는 4.6년으로 평가되어 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 소규모 VPL 도입 모델의 ROI 특성



(b) 중규모 VPL 도입 모델의 ROI 특성



(c) 대규모 VPL 도입 모델의 ROI 특성

[그림 5] VPL 도입 모델의 ROI 특성

## 5. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지의 출력제한을 완화시킬 수 있는 방안 중 하나인 VPL 운용모델을 제시하고, 신재생에너지 전원의 수용모델을 규모별로 제시한다. 이를 바탕으로, 경제성평가 모델과 현재가치 환산법을 이용하여 신재생에너지 전원을 수용하기 위한 VPL의 타당성을 평가한 결과, VPL 플랫폼 비용 변동을 고려하여 ROI를 산정하면 플랫폼의 비용에 관계없이 200MW급 대규모 도입 모델이 가장 경제적임을 알 수 있다. 또한, VPL 플랫폼 비용이 증가할수록 경제성이 악화되지만, 최적 용량의 VPL 모델을 선정하면 기존의 전력설비에 대한 투자보다 더 효과적임을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선행 융합연구사업(No. CPS22131-120)과 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

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