

# 신재생에너지 수용성 향상을 위한 VPL 최적용량 산정방안에 관한 연구

최성문\*, 이명근\*, 이후동\*, 김미영\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, \*\*호원대학교

e-mail:moon9507@koreatech.ac.kr

## Optimal Capacity of VPL for Hosting Capacity with Renewable Energy Sources in Distribution System

Sung-Moon Choi\*, Myung-geun Lee\*, Hu-Dong Lee\*, Mi-Young Kim\*\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

\*\*Howon university

### 요약

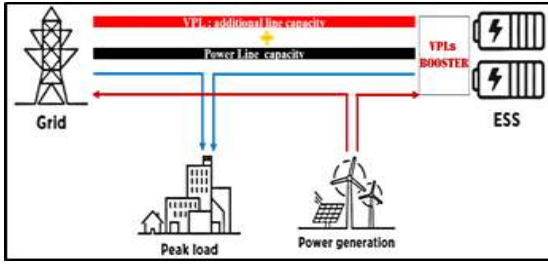
최근, 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제9차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가 되고 있지만, 신재생에너지를 연계하기 위한 전력설비 인프라의 부족으로 인하여 신재생에너지 3.7 GW가 접속 대기 중에 있어, 신재생에너지의 접속지연을 문제를 해결하기 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 추가적인 선로 증설 없이 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있는 방안 중 하나인 VPL(virtual power line)의 운용특성을 제시하고, VPL의 최적용량 산정방안을 제안한다. 구체적으로, 수용가전압을 허용전압 범위 이내로 유지시킬 수 있는 각 시간대별 VPL의 유효전력을 바탕으로, VPL의 최소 kW 및 kWh 도입 용량을 산정한다. 또한, 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소, 배전선로, 부하, 태양광전원, VPL 등으로 구성된 신재생 에너지 수용성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 방식에 따라 VPL의 최소 도입용량을 산정하면 수용가의 과전압 현상을 해결하여 신재생에너지의 수용성이 향상될 수 있음을 알 수 있었다.

### 1. 서론

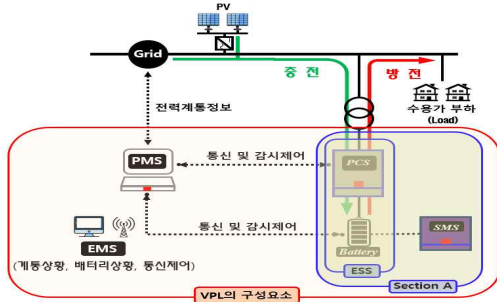
2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제 9차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가 되고 있다. 하지만 제주도와 같은 일부 지역은 전력설비 인프라의 부족으로 신재생에너지의 출력을 제한시키고 있는 사례가 다수 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 추가적으로 선로를 증설하는 방안이 제시되고 있지만, 경제적으로 높은 건설비용이 발생함으로 전력설비 인프라 증설에 대한 투자비를 경감시킬 수 있는 연구의 필요성이 증가하고 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 해결할 수 있는 방안 중 하나인 VPL의 운용특성을 제시하고 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소, 배전선로, 태양광전원, VPL, 부하 등으로 구성된 신재생에너지 수용성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 제주도의 산업용, 농업용의 2가지의 부하를 대상으로 VPL에 의한 신재생에너지 수용성을 평가한 결과, VPL에 의해 수용가의 과전압이 해소됨을 확인할 수 있고 추가적인 설비 인프라 확장 시기를 늦출 수 있음을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 VPL의 유효성을 알 수 있었다.

### 2. VPL의 운용특성

기존의 배전계통은 수용가에게 전력을 공급하기 위하여 가공 및 지중선로를 이용하고 있지만, 급속도로 증가하고 있는 신재생에너지에 의하여 배전선로의 허용용량(10MVA)을 초과하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력회사는 추가적으로 가공 및 지중 선로를 증설해야 하지만 높은 건설비용이 발생하여 현실적으로 어려운 실정이다. 상기에서 언급한 문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나로 VPL 기술이 주목을 받고 있는데, 상세한 개념도를 나타내면 그림 1과 같다. 이 그림에서와 같이 VPL은 충방전 동작으로 계통의 조류를 제어하므로 추가적인 전력설비 인프라를 구축하지 않아 선로를 추가로 증설한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 또한, VPL의 구성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있는데, 부하의 패턴에 따라 충전 및 방전 동작을 수행하고, SMS(safety management system)을 설치하여 VPL의 안전성을 확보한다. 한편, PMS, EMS는 VPL 계통의 실시간 정보를 수집할 수 있게 설치되어 계통 상황에 맞게 투입할 수 있다.



[그림 1] VPL 개념도



[그림 2] VPL의 구성

### 3. VPL의 최적용량 산정방안

주상변압기 2차측의 직하 및 말단 수용가전압은 식 (1)과 식 (2)와 같이 산정된다. 여기서, 직하 및 말단 수용가전압은 주상변압기 1차측 전압을 탭 전압에 의해 저압측으로 환산한 값과 저압선로의 전압강하 및 수용가 부하율을 고려하여 산정할 수 있다.

$$V1(n, t) = (V_{pri}(n, t) \times \frac{V_s}{V_{tap}}) - V_f \times f_c(t) \quad (1)$$

$$V2(n, t) = (V_{pri}(n, t) \times \frac{V_s}{V_{tap}}) - V_l \times f_c(t) \quad (2)$$

여기서,  $V1(n, t)$  : n번째 구간에서의 직하 수용가전압[V],  $V2(n, t)$  : n번째 구간에서의 말단 수용가전압[V],  $V_{pri}(n, t)$  : n번째 구간에서의 주상변압기 1차측 전압[V]

또한, 허용전압(220±13V) 범위를 벗어난 수용가전압을 고압측으로 환산하면 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max}(t) = (V1_{max}(t) + V_f \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (3)$$

$$V_{min}(t) = (V2_{min}(t) + V_l \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (4)$$

여기서,  $V_{max}(t)$  : 허용전압 범위를 벗어난 최대 직하 수용가전압을 고압측으로 환산한 값[V],  $V_{min}(t)$  : 허용전압 범위를 벗어난 최소 말단 수용가전압을 고압측으로 환산한 값

[V],  $V1_{max}(t)$  : 최대 직하 수용가전압[V],  $V2_{min}(t)$  : 최소 말단 수용가전압[V]

한편, VPL의 충전 및 방전을 결정하는 충전 동작전압 및 방전 동작전압은 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ch}(t) = \{V_{limit} + V_f \times f_c(t)\} \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (5)$$

$$V_{dis}(t) = \{V_{limit} + V_l \times f_c(t)\} \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (6)$$

여기서,  $V_{ch}(t)$  : VPL의 충전 동작전압[V],  $V_{dis}(t)$  : VPL의 방전 동작전압[V]

또한, VPL의 충전 및 방전 동작 모드는 식 (7)의 조건에 따라 결정된다. 즉, 허용전압 범위를 벗어난 최대 직하 수용가전압을 고압측으로 환산한 값이 VPL의 충전 동작전압보다 크면 VPL는 충전 동작( $\delta(t) = -1$ )을 수행하고, 최소 말단 수용가전압을 고압측으로 환산한 값이 VPL의 방전 동작전압보다 작을 경우에는 방전 동작( $\delta(t) = 1$ )을 수행한다.

$$\delta(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } V_{max}(t) > V_{ch}(t) \\ 1 & \text{if } V_{min}(t) < V_{dis}(t) \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $\delta(t)$  : VPL의 충전 및 방전 동작 모드

한편, VPL의 충전 및 방전 동작으로 보상할 수 있는 전압 제어값은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{con}(t) = \begin{cases} V_{max}(t) - V_{ch}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{min}(t) - V_{dis}(t)|, & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $V_{con}(t)$  : VPL의 전압 제어값[V]

또한, 식 (9)는 VPL의 충전 및 방전동작에 의하여 공급 또는 소비되는 전류값으로서, 식 (8)의 전압 제어값을 송출단에서 VPL의 연계구간까지의 선로 저항으로 나눈 값이다.

$$I_{ESS}(t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{n=1}^{n_a} (R(n) \cdot L(n))} \quad (9)$$

여기서,  $I_{ESS}(t)$  : VPL의 전류[A],  $R(n)$  : n번째 구간의 선로 저항[Ω/km],  $L(n)$  : n번째 구간의 선로 공장[km],  $n_a$  : VPL의 연계구간

또한, VPL의 충전 및 방전동작에 의해 공급 또는 소비되는 유효전력은 허용전압 범위를 벗어난 최대 및 최소 수용가전압을 고압측으로 환산한 값과 VPL의 전류값을 곱하여, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = \begin{cases} 3 \cdot V_{\max}(t) \cdot I_{ESS}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ 3 \cdot V_{\min}(t) \cdot I_{ESS}(t), & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $P(t)$  : VPL의 유효전력[W]

따라서, VPL의 최소 kW 도입용량( $P_{VPL}$ )은 VPL의 시간대별 유효전력의 크기 중에서 가장 큰 값을 고려하여, 식 (11)과 같이 산정할 수 있으며, VPL의 최소 kWh 도입용량( $W_{VPL}$ )은 전체 시간대에 대한 VPL의 유효전력을 적산하여, 식 (12)와 같이 산정할 수 있다.

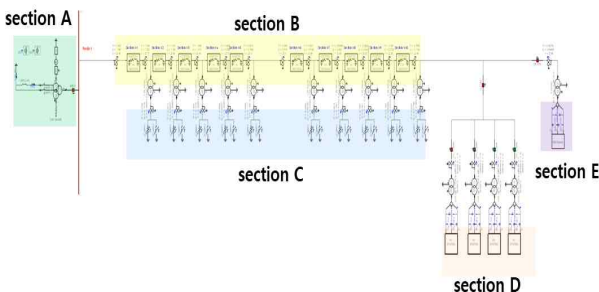
$$P_{VPL} = \max [ |P(t)| ]_{t=0}^{t=t_{\max}} \quad (11)$$

$$W_{VPL} = \int_0^{t_{\max}} P(t) dt \quad (12)$$

여기서,  $P_{VPL}$  : VPL의 최소 kW 도입용량[W],  $W_{VPL}$  : VPL의 최소 kWh 도입용량[Wh]

#### 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 VPL 모델링

상기에서 제시한 VPL의 구성을 바탕으로 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소, AC 배전선로, 부하, 태양광전원, VPL로 구성된 수용성 평가 모델링을 수행하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-D 결선방식이며, 3차 권선은 제3 고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, AC 배전선로는 ACSR 160, 95mm<sup>2</sup>, 선로 공장은 20km의 가공선로 구성되며, 태양광전원은 과전압 현상이 가장 큰 배전선로 말단에 연계된다. 한편, VPL은 태양광전원과 동일하게 선로 말단에 연계되어 충방전 동작을 수행한다.

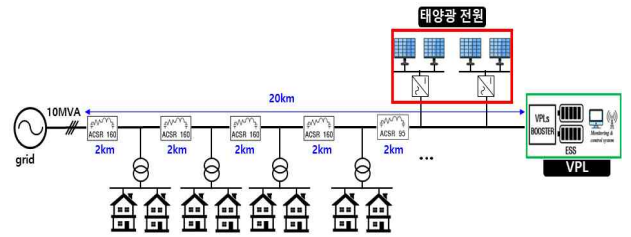


[그림 3] VPL 모델링

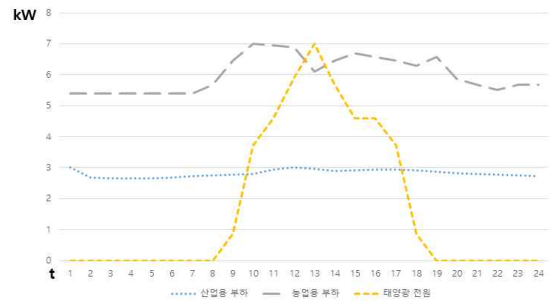
#### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

##### 5.1 시뮬레이션 조건

VPL에 의한 신재생에너지 수용성 향상을 평가하기 위하여, 시뮬레이션 조건은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4(a)와 같이, 배전선로는 1~10번의 구간으로 구성되는데, 구간별로 2km이며, 1~6번은 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 7~10번 95mm<sup>2</sup>로 상정한다. 또한, 그림 4(b)와 같이, 부하패턴은 제주도의 부하를 대상으로 경부하인 산업용 부하(3MW)와 중부하인 농업용 부하(7MW), 태양광전원은 7MW로 상정한다.



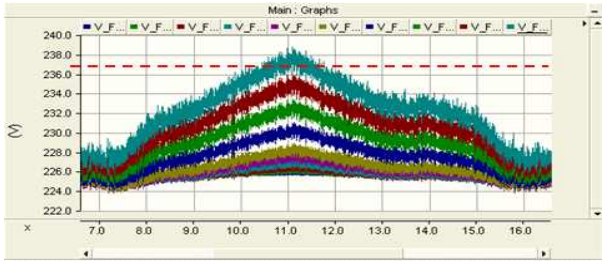
(a) VPL이 연계된 배전계통의 구성  
<모의 계통도>



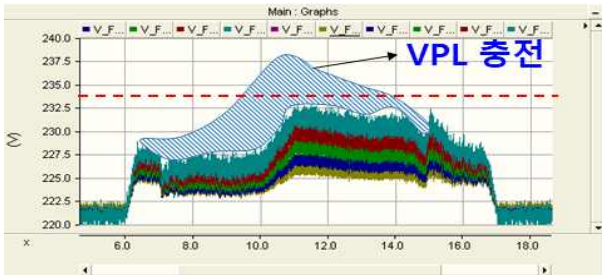
(b) 부하 패턴 및 태양광전원 출력  
[그림 4] 시뮬레이션 조건

##### 5.2 수용성 향상을 위한 VPL의 운용특성

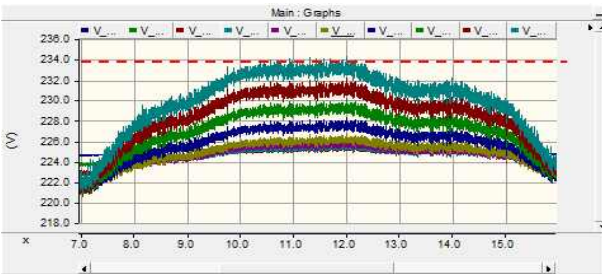
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 경부하 시 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 경부하이기 때문에 말단에 연계된 태양광전원 역조류에 의하여 말단(10번 구간) 수용가의 전압은 239[V]로 산정되어, 허용규정전압 범위(207~233[V])를 벗어나므로 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그러나 VPL이 충전동작을 수행하게 되면 그림 5(b)와 같이 전압이 감소하게 되어 232[V]로 산정된다. 한편, 중부하 시 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)와 같이 말단에 연계된 태양광전원의 역조류에 의하여 말단 수용가의 전압은 239[V]로 산정되어, 허용규정전압 범위를 벗어나므로 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그러나 VPL를 제어하여 충전동작을 수행하게 되면 그림 6(b)와 같이 전압이 감소하게 되어 232[V]로 산정되는데, 수용가의 전압이 허용규정전압 범위를 벗어나지 않아 수용가의 과전압 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있다.



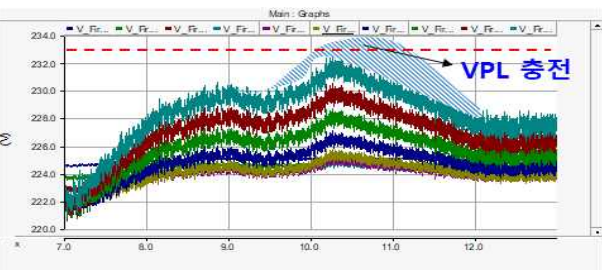
(a) 태양광 역조류에 의한 수용가의 과전압



(b) VPL에 의한 수용가의 전압 특성  
[그림 5] 경부하 시 VPL의 운용특성



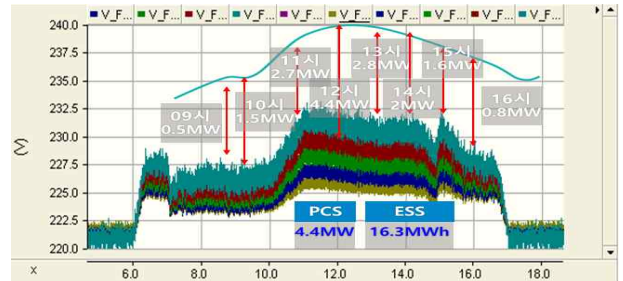
(a) 태양광 역조류에 의한 수용가 과전압



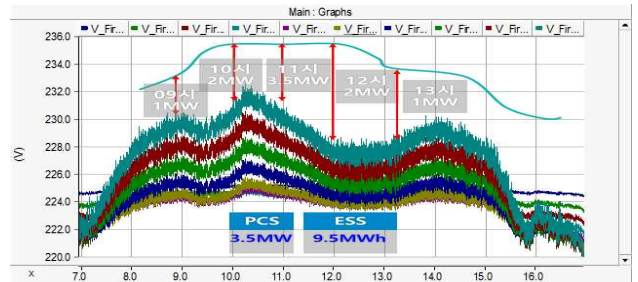
(b) VPL에 의한 수용가의 전압 특성  
[그림 6] 중부하 시 VPL의 운용특성

따라서, 상기의 2장에서 제시한 VPL 최적용량 산정 방안을 바탕으로 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있는 VPL의 최적용량을 산정하면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 경부하 시 VPL의 최적용량 산정을 나타낸 것으로, 유효전력은 최소 0.5[MW]에서 최대 4.4[MW]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, VPL의 최소 [kW] 도입용량은 시간대별 유효전력의 크기 중에서 가장 큰 값인 4.4[MW]로 산정되며, VPL의 최소 [kWh] 도입용량은 전체 시간대에 대한 VPL의 유효전력을 적산하여 16.3[MWh]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 그림 7(b)는 중부하 시 VPL의 최적용량 산정을 나타낸 것으로, 유효전력은 최소 1[MW]에서 최대 3.5[MW]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, VPL의 최소 [kW] 도입용량은 시간대별 유효전력의

크기 중에서 가장 큰 값인 3.5[MW]로 산정되며, VPL의 최소 [kWh] 도입용량은 전체 시간대에 대한 VPL의 유효전력을 적산하여 9.5[MWh]로 산정됨을 알 수 있다.



(a) 경부하 시 VPL 산정용량



(b) 중부하 시 VPL 산정용량

[그림 7] 신재생에너지 수용성 향상을 위한 VPL 운용특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 VPL에 의한 신재생에너지 수용성을 증가시키기 위하여, VPL에 대한 구성을 제시하고 VPL의 최적용량 산정방안을 제안한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소, 배전선로, 태양광전원, 부하, VPL로 구성된 신재생에너지 수용성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, VPL의 운용특성을 분석한 결과, 태양광전원 역조류에 의해 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 과전압이 발생하지만 VPL를 제어하여 수용가의 과전압을 해소할 수 있고 추가적인 선로의 증설 및 전력설비 건설 시기를 늦출 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받아 수행한 연구(No.CPS22131-120)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### [참고문헌]

- [1] 김병기 외 3인, “대용량 태양광발전이 연계된 배전계통의 수용가전압 특성해석에 관한 연구”, 전기학회논문지, 제 62권 제1호, pp. 29-36, 1월, 2013년.