

# 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용알고리즘에 관한 연구

최성문\*, 유현상\*, 노성은\*, 김미영\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, \*\*호원대학교

e-mail:moon9507@koreatech.ac.kr

## Operation Algorithm of VPL to Improve Power Curtailment in Renewable Energy Sources

Sung-Moon Choi\*, Hyun-Sang You\*, Seong-Eun Rho\*, Mi-Young Kim\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education, \*\*Howon University

### 요약

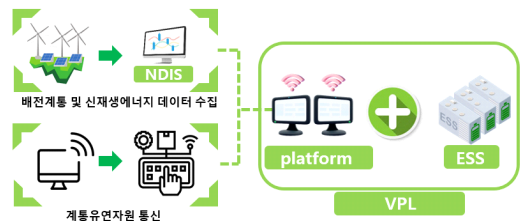
최근, 2030 탄소중립 선언 및 제10차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가하고 있지만, 전력공급과 수요의 불균형에 의해 신재생에너지 출력제한이 빈번하게 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 추가적으로 선로를 증설하지 않고 출력제한을 개선시킬 수 있는 가상 전력선로 운영 기술(VPL)의 도입 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단 등에 VPL을 설치하여, 신재생에너지 출력제한을 개선시키는 운용알고리즘을 제안한다. 또한, AC 전원부, VPL부, 모의 태양광전원부, 모의 배전선로부, 모의 부하부, 등으로 구성된 30[kW]급 VPL 시험장치를 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 수용가측에 과전압 및 저전압 문제가 발생하면, VPL의 운용알고리즘에 의해 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시킬 수 있어, 신재생에너지의 출력제한을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서론

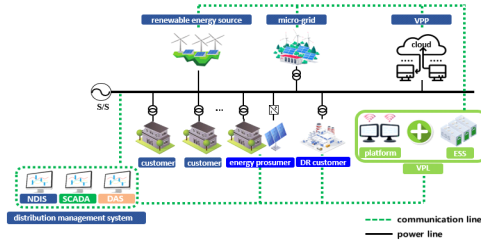
2030 탄소중립 선언과 제10차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가되고 있지만, 전력 공급과 수요의 불균형에 의해 신재생에너지의 출력을 제한시키고 있는 사례가 다수 발생하고 있다. 특히, 제주도의 경우 carbon-free 정책에 의해 신재생에너지 점유율이 전력공급 설비용량의 40[%]까지 증가하여, 출력제한 사례가 2022년 상반기 동안 총 80건이 보고되고 있어, 경제적으로 막대한 손실이 발생하고 있는 실정이다[1,2]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설 기간이 소요되어 이를 대응할 수 있는 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하지 않고 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 설치 및 운용하여 송·배전계를 관리하는 VPL(virtual power line) 운용특성과 최적운용 방안을 제시하고, VPL의 출력제한 개선을 위한 30[kW]급 VPL용 시험장치를 구현한다. 상기의 VPL 시험장치와 본 논문에서 제안한 운용알고리즘을 바탕으로 시험장치의 운용특성을 평가한 결과, VPL이 신재생에너지 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 2. 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용특성

VPL은 그림 1과 같이 VPL 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL 플랫폼은 기존의 배전계통 운용시스템으로부터 배전계통 각 지점의 전압 및 전류 등의 배전계통 운용정보를 실시간으로 수집하고, 신재생에너지의 출력과 계통 유연 자원의 운용상황을 모니터링하며, VPL용 ESS는 배전계통 수용가에 전압 문제가 발생할 경우, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다. 또한, VPL이 연계된 배전계통은 그림 2와 같이 기존의 배전계통을 비롯하여 VPL(VPL용 ESS 및 플랫폼), 배전계통 운용시스템(NDIS, DAS, SCADA 등), 신재생에너지 및 계통 유연 자원(VPP, DR, 에너지 프로슈머) 등으로 구성된다.

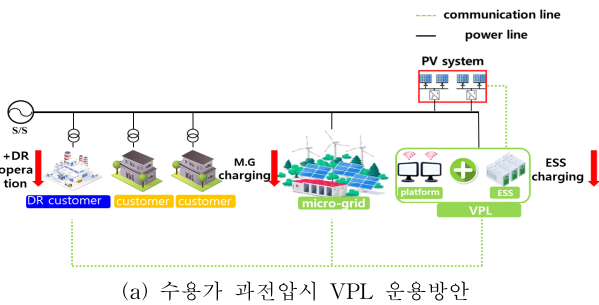


[그림 1] VPL의 구성

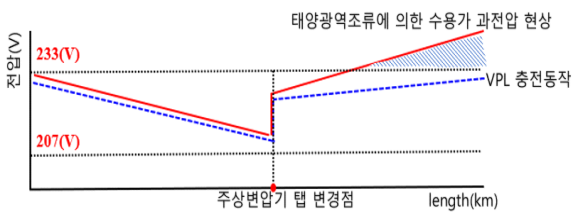


[그림 2] VPL이 연계된 배전계통

한편, 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어난 경우, 이를 해결하기 위한 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 3과 그림 4와 같다. 여기서, 그림 3(a)와 같이 배전선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류에 의하여 수용가의 과전압 현상이 발생할 경우, VPL은 배전계통과 태양광전원의 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS와 계통에 연계된 마이크로그리드의 ESS를 충전시키고, DR 수용가에게 (+)DR을 요청하여 그림 3(b)와 같이 수용가의 전압을 적정하게 유지시킬 수 있다. 또한, 그림 4(a)와 같이 피크부하시 선로 임피던스에 의한 전압강하로 인하여 배전선로 말단에 연계된 수용가에 저전압 현상이 발생할 경우, VPL은 VPL용 ESS와 계통에 연계된 마이크로그리드 및 에너지 프로슈머의 ESS를 방전시키거나, DR 수용가에게 (-)DR을 요청하여 그림 4(b)와 같이 수용가 전압을 적정하게 유지시킬 수 있다.

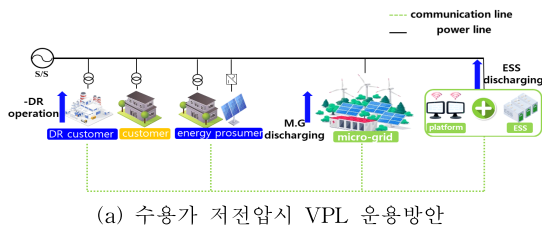


(a) 수용가 과전압시 VPL 운용방안

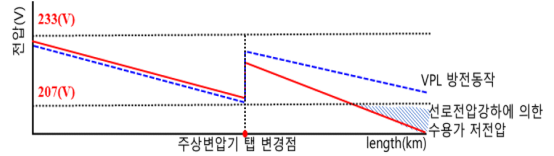


(b) VPL 운용에 따른 수용가 전압 특성

[그림 3] 수용가 과전압시 VPL이 연계된 배전계통의 운용특성



(a) 수용가 저전압시 VPL 운용방안



(b) VPL 운용에 따른 수용가 전압 특성

[그림 4] 수용가 저전압시 VPL이 연계된 배전계통의 운용특성

한편, 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 용량은 다음과 같이 산정할 수 있다. 먼저, 식 (1)과 같이 VPL의 충전 및 방전전류를 구하기 위하여, VPL 시험장치 수용가 전압 가운데 가장 큰 값에서 수용가 규정전압의 상한 및 하한치의 차로 목표전압( $V_{ref}$ )를 산정한다. 이후, 목표전압을 AC전원 송출단에서 VPL이 연계된 지점까지의 임피던스로 나누면 VPL의 충전 및 방전전류를 구할 수 있다. 또한, 식 (2)와 같이 VPL의 충전 및 방전동작에 의해 공급 또는 소비되는 유효전력은 허용전압 범위를 벗어난 최대 수용가 전압을 VPL의 전류값을 곱하여 산정할 수 있다.

$$V_{ref}(t) = \begin{cases} V_{load\_max}(t) - V_{uplim}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{load\_min}(t) - V_{lowlim}(t)|, & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $V_{ref}(t)$  : VPL의 전압 제어값[V]

$$I_{VPL}(t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{n=1}^{n_\alpha} (R(n) \cdot L(n))} \quad (2)$$

여기서,  $I_{VPL}(t)$  : VPL용 ESS의 전류[A],  $R(n)$  : n번째 구간 선로 저항[Ω/km],  $L(n)$  : n번째 구간의 선로 공장[km],  $n_\alpha$  : n번째까지의 VPL 연계구간

### 3. 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용알고리즘

#### 3.1 수용가 과전압시 VPL의 운용알고리즘

상기에서 제시한 수용가 과전압시 VPL의 운용특성을 바탕으로 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 수용가 구간 수, VPL의 SOC, 수용가의 전압, 신재생에너지전원, DR 운용 시간대, 전체 운용시간, 등 배전계통 시스템의 데이터를 입력한다.

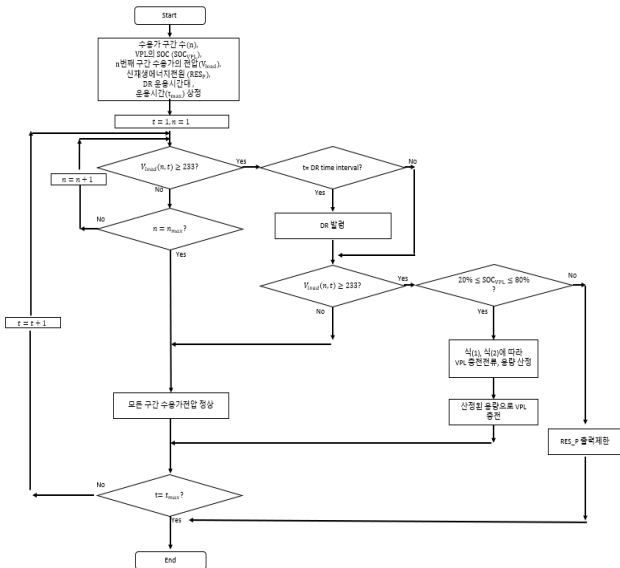
[Step 2] n번째 수용가의 전압( $V_{load}(n,t)$ )이 수용가 규정 전압 상한치보다 크면 step 3으로 이동하고 아니면, n을 1증가시켜, 최대 수용가 구간 수까지 해당과정을 반복한다.

[Step 3] DR이 운용가능한 시간대인 경우, (+)DR을 발령시키고, 아니면 Step 4로 이동한다.

[Step 4] 수용가 전압이 규정전압 상한치보다 크면 step 5로 진행하고 작으면 모든 구간의 수용가 전압을 정상으로 판단하고 최대 운용시간까지 해당과정을 반복한다.

[Step 5] 수용가 전압이 규정전압 상한치보다 크면, VPL의 SOC가 운용가능한 범위인지 판단하고, 가능한 범위이면 상기에서 제시한 식 (1), 식 (2)에 따라 VPL의 용량을 산정한 뒤 충전을 수행하며, 아니라면 신재생에너지전원의 출력제한을 수행하고 모든 알고리즘을 종료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 5와 같다.



[그림 5] 수용가 과전압시 VPL의 운용알고리즘

3.2 수용가 저전압시 VPL의 운용알고리즘

상기에서 제시한 수용가 저전압시 VPL의 운용특성을 바탕으로 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 수용가 구간 수, VPL의 SOC, 수용가의 전압, 신재생에너지전원, DR 운용 시간대, 전체 운용시간, 등 배전계통 시스템의 데이터를 입력한다.

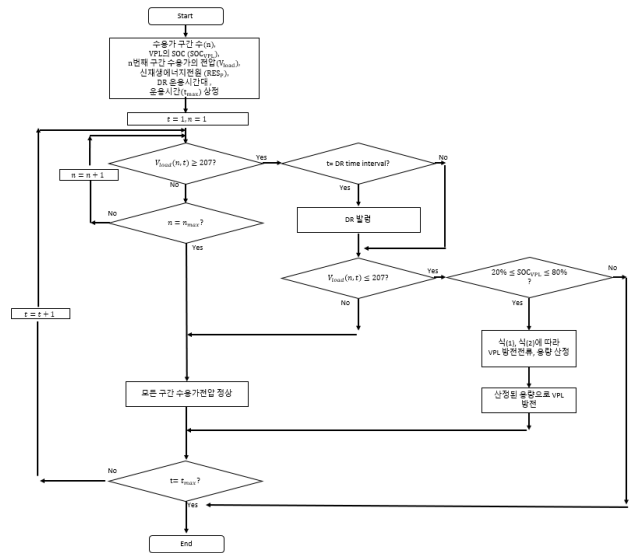
[Step 2] n번째 수용가의 전압( $V_{load}(n,t)$ )이 수용가 규정전압 하한치보다 작으면 Step 3으로 이동하고 아니면, n을 1 증가 시켜, 최대 수용가 구간 수까지 해당과정을 반복한다.

[Step 3] DR이 운용가능한 시간대인 경우, (-)DR을 발령시키고, 아니면 Step 4로 이동한다.

[Step 4] 수용가 전압이 규정전압 하한치보다 작으면 Step 5로 진행하고 작으면 모든 구간의 수용가 전압을 정상으로 판단하고 최대 운용시간까지 해당과정을 반복한다.

[Step 5] 수용가 전압이 규정전압 하한치보다 작으면, VPL의 SOC가 운용가능한 범위인지 판단하고, 가능한 범위이면 상기에서 제시한 식 (1), 식 (2)에 따라 VPL의 용량을 산정한 뒤 방전을 수행하며, 아니라면 모든 알고리즘을 종료한다.

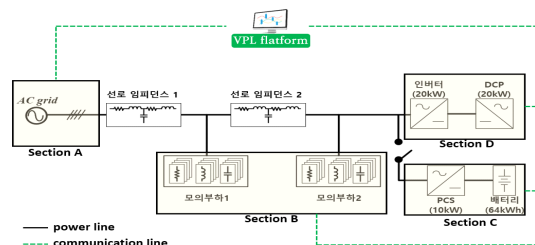
상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 6과 같다.



[그림 6] 수용가 저전압시 VPL의 운용알고리즘

4. 신재생에너지 출력개선을 위한 30kW급 VPL 시험장치 구현

본 논문에서 구현한 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 30kW급 VPL 시험장치를 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, Section A는 AC 전원부, Section B는 모의부하부, Section C는 VPL부, Section D는 신재생에너지 전원부를 나타낸다.

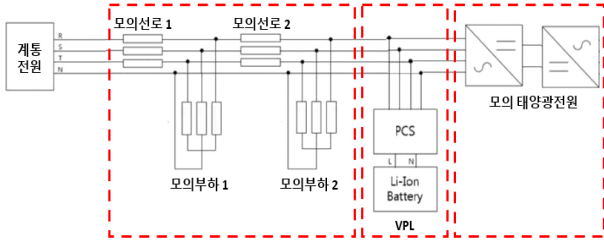


[그림 7] 전체 시스템 구성도

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험조건

VPL에 의한 신재생에너지 출력제한 개선을 평가하기 위한 시험조건은 표 1과 같다. 또한, 그림 8은 VPL이 연계된 모의 배전계통을 나타내는데, 모의 선로 2개의 구간과 2개의 모의 부하 그리고 말단에 모의 태양광전원, VPL이 연계된다.



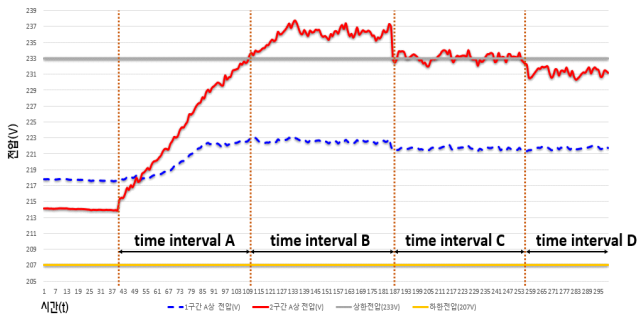
[그림 8] VPL 특성시험 계통도

[표 1] 시험조건

구분	내역			
시나리오	1번 수용가 부하 [W]	2번 수용가 부하 [W]	PV/ESS [kW]	DR[W] (1번 구간)
과전압	500	500	2,500/500	(+)1,000
저전압	3,000	1,500	0/500	(-)500

5.2 수용가 과전압 시 VPL의 운용특성

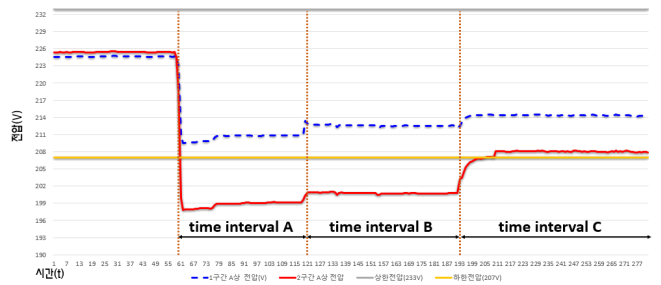
상기에서 제시한 시험조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9의 A 시간대는 2.5[kW]의 태양광전원이 연계되는 구간으로 2구간의 전압이 급격하게 증가하고, B 시간대 태양광전원의 역조류로 인하여 1번 구간 수용가는 최대 223[V], 2번 구간 수용가는 최대 237[V]로 산정되므로, 2번 구간 수용가에게 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 9의 C 시간대와 같이 VPL이 수용가와 협조하여 (+)DR을 1[kW]로 운용하면, 1번 수용가의 전압은 221[V], 2번 수용가의 전압은 234[V]로 산정됨을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 9의 D 시간대와 같이 운용알고리즘으로 산정된 0.5[kW]로 VPL이 충전 동작을 수행하면 태양광 전원의 역조류를 흡수하여 2번 수용가의 전압이 232[V]로 산정되어, 과전압 현상이 해소됨을 알 수 있다.



[그림 9] 수용가 과전압 시 VPL의 적정운용 특성

5.3 수용가 저전압 시 VPL의 운용특성

상기에서 제시한 시험조건을 바탕으로, 수용가 저전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10의 A 시간대와 같이 피크 부하시 큰 전압강하로 인하여 1번 구간 수용가의 전압은 211[V], 2번 구간 수용가의 전압은 199[V]로 산정되어, 저전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 10의 B 시간대와 같이 VPL이 수용가와 협조하여 (-)DR을 0.5[kW]로 운용하면, 1번 수용가의 전압은 213[V], 2번 수용가는 201[V]로 산정됨을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 10의 C 시간대와 같이 운용 알고리즘으로 인해 산정된 0.7[kW]로 VPL이 방전동작을 수행하면 2번 수용가의 전압이 208[V]로 산정되어, 수용가의 저전압 현상을 해결할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 10] 수용가 저전압 시 VPL의 운용특성

6. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단에 ESS를 설치 및 운용하여 배전계통을 관리하는 VPL의 운용 특성 및 알고리즘을 제안한다. 또한, AC 전원부, VPL부, 모의 태양광전원부, 모의 배전선로부, 모의 부하부, 등으로 구성된 30[kW]급 VPL 시험장치를 구현한다. 상기의 VPL 운용 알고리즘과 시험장치를 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 수용가측에 과전압 및 저전압 문제가 발생할 경우 VPL이 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시킬 수 있어, 신재생에너지의 출력제한을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

[1] S. Y. Lim, S. Y Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector", Journal of Energy Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.

[2] Hun Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple\_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28