

DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘에 관한 연구

이수용*, 김윤호*, 장형안*, 황소연*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:lsy4570@kopo.ac.kr

An Estimation Method of Minimum Capacity for Virtual Power Line Device Considering Demand Response

Soo-Yong Lee*, Yun-Ho Kim*, Hyeong-An Jang*,

So-Yeon Hwang*, Dae-Seok Rho*

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

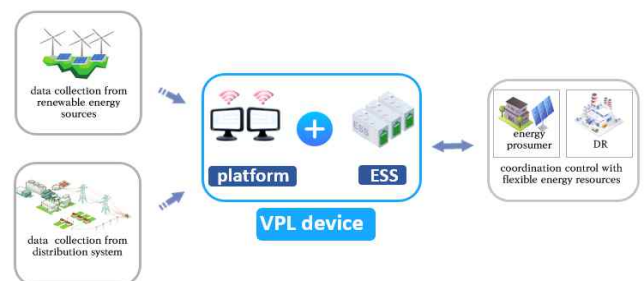
요약

최근, 전 세계적인 탄소중립 및 RE3020 정책에 따라 신재생에너지의 도입이 급속도로 증가하고 있어, 수용가의 전압이 규정전압 범위를 벗어나는 사례가 지속적으로 나타나고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설 및 신설이 요구되지만, 이는 막대한 비용과 시간이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상시키기 위한 VPL(virtual power line) 장치를 제시하고, DR(demand response)을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘을 제안한다. 구체적으로, 수용가의 전압이 규정전압 범위를 초과할 경우, DR의 운용 상태를 바탕으로 전압 및 전류 조정치를 산정하여 과전압 및 저전압 현상을 해소할 수 있는 VPL 장치의 kW 및 kWh 용량을 산정한다. 상기의 최소용량 산정 알고리즘을 바탕으로 수용가의 전압 특성을 분석한 결과, DR을 고려한 VPL 장치는 수용가의 과전압 및 저전압 현상을 효과적으로 해결할 수 있어, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서론

최근, 전 세계적인 탄소중립 및 RE3020 정책에 따라 신재생에너지의 도입이 급속도로 증가하고 있는 실정이다[1]. 특히, 주간 시간대에 신재생에너지의 발전량이 급증하여 전력 공급과 수요의 불균형이 발생하는 경우, 역조류로 인해 수용가의 과전압 현상을 초래하여 규정전압 범위를 벗어날 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전력설비의 인프라를 추가적으로 설치하는 방안이 제시되고 있지만, 막대한 건설 비용과 시간이 소요되어, 이를 대체할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상시키기 위한 VPL 장치를 제안하고, DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로 수용가의 전압 특성을 분석한 결과, DR을 고려한 VPL 장치는 수용가에서 발생하는 과전압 및 저전압 현상을 효과적으로 해결할 수 있어, 본 연구에서 제안한 최소용량 산정 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

신재생에너지의 용량이 급속도로 증가함에 따라 연계된 배전선로의 수용가 전압이 규정 범위를 초과할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설 기간이 소요되어, 이를 대체할 수 있는 VPL 장치 운용 기술이 주목받고 있다. 여기서, VPL 장치는 그림 1과 같이 VPL용 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL용 플랫폼은 기존의 배전계통 운용시스템으로부터 배전계통 운용 정보를 수집하고, 신재생에너지의 출력과 계통 유연자원의 운용 상황을 실시간으로 모니터링한다. 또한, VPL용 ESS는 배전계통 수용가에 전압 문제가 발생할 경우, VPL용 플랫폼 제어신호에 따라 충·방전 동작하여 수용가 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키는 역할을 수행한다.



[그림 1] VPL 장치의 구성

2. 신재생에너지 수용성 향상을 위한 VPL 장치의 운용 특성

3. DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘

본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상하기 위하여, DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘을 제안한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 배전계통의 선로 임피던스, 태양광전원의 용량, 부하 용량, DR 발령 시간대(t_{DR}) 등의 조건을 상정한다.

[Step 2] 수용가의 전압이 규정전압 하한치보다 낮아지면 [Step 3], 규정전압 상한치를 초과하면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 운용모드(δ)를 0으로 산정하고 [Step 7]로 진행한다.

[Step 3] 저전압 현상을 해소하기 위한 VPL 장치의 전압 기준값을 식 (1)과 같이 산정하고, 운용모드(δ)를 1로 설정한 후 [Step 5]로 이동한다.

$$V_{ref}(t) = \begin{cases} V_{min}^{DR}(t) & \text{if } t = t_{DR} \\ V_{min}(t) & \text{if } t \neq t_{DR} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $V_{ref}(t)$: t 시간대의 전압기준값, $V_{min}^{DR}(t)$: DR을 고려한 t 시간대의 최소전압, $V_{min}(t)$: t 시간대 수용가의 최소전압, t_{DR} : DR 발령 시간대

[Step 4] 과전압 현상을 해소하기 위한 VPL 장치의 전압 기준값을 식 (2)와 같이 산정하고, 운용모드(δ)를 -1로 설정한 후 [Step 5]로 이동한다.

$$V_{ref}(t) = V_{max}(t) \quad (2)$$

여기서, $V_{ref}(t)$: t 시간대의 전압기준값, $V_{max}(t)$: t 시간대 수용가의 최대전압

[Step 5] VPL 장치의 기준전압 조정치를 식 (3)과 같이 산정하고, [Step 6]으로 이동한다.

$$V_{con}(t, \delta) = |V_{ref}(t) - V_{limit}(\delta)| \quad (3)$$

여기서, $V_{con}(t, \delta)$: t 시간대에서 운용모드(δ)에 의한 기준전압 조정치, $V_{ref}(t)$: t 시간대의 전압기준값, $V_{limit}(\delta)$: 운용모드(δ)의 규정전압

[Step 6] VPL 장치의 기준전류 조정치를 식 (4)와 같이 산정

하고, 이를 고려하여 VPL 장치의 기준전력 조정치를 식 (5)와 같이 산정하며, [Step 7]로 이동한다.

$$I_{con}(t, \delta) = \frac{V_{con}(t, \delta)}{\sum_{k=1}^n Z_{sec}(k)} \quad (4)$$

$$P_{con}(t, \delta) = 3 \cdot V_{con}(t, \delta) \cdot I_{con}(t, \delta) \quad (5)$$

여기서, $I_{con}(t, \delta)$: t 시간대에서 운용모드(δ)에 의한 기준전류 조정치, $V_{con}(t, \delta)$: t 시간대에서 운용모드(δ)에 의한 기준전압 조정치, $Z_{sec}(k)$: k 번 구간의 선로 임피던스, $P_{con}(t, \delta)$: t 시간대에서 운용모드(δ)에 의한 기준전력 조정치

[Step 7] 현재 시간대(t)와 종료 시간대(t_{max})가 다르면, t 를 1만큼 증가시키고 [Step 2]로 이동하고, 아니면 [Step 8]로 진행한다.

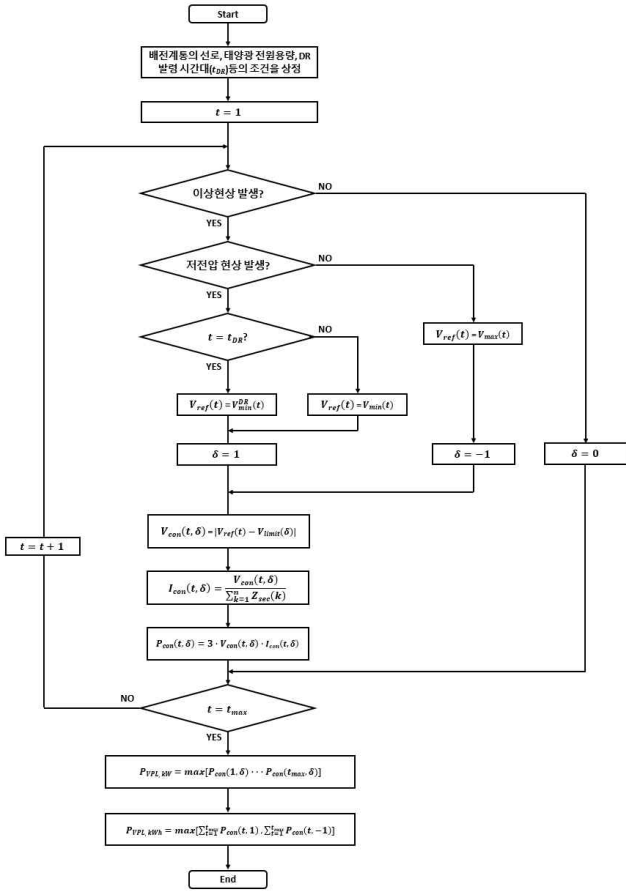
[Step 8] VPL 장치의 kW 용량을 식 (6)과 같이 $t \sim t_{max}$ 시간대의 가장 큰 전력 조정치로 산정하고, VPL 장치의 kWh 용량을 식 (7)과 같이 운용한다.

$$P_{VPL, kW} = \max[P_{con}(1, \delta) \cdot \dots \cdot P_{con}(t_{max}, \delta)] \quad (6)$$

$$P_{VPL, kWh} = \max\left[\sum_{t=1}^{t_{max}} P_{con}(t, 1), \sum_{t=1}^{t_{max}} P_{con}(t, -1)\right] \quad (7)$$

여기서, $V_{VPL, kW}$: VPL 장치의 kW 용량, $V_{VPL, kWh}$: VPL 장치의 kWh 용량

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.

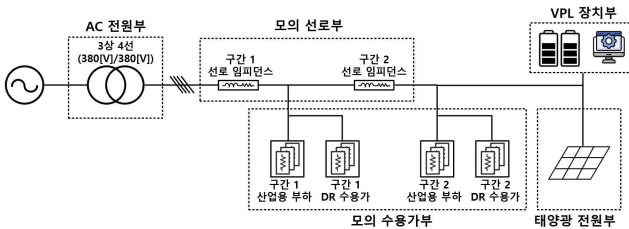


[그림 2] DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

DR을 고려한 VPL 장치의 운용 특성을 평가하기 위한 배전계통은 그림 3과 같다. 먼저, AC 전원부는 380[V], 3상 4선식이고, 모의 부하부와 모의 선로부는 2개의 구간으로 나누어 구성한다. 여기서, 모의 부하부는 10.5[kW]와 15[kW]를 고려하고, 모의 선로부는 말단 구간의 전압강하를 5[%]와 10[%]인 경우로 설정한다. 또한, 태양광전원부는 모의 부하부의 용량을 고려하여 10.5[kW]와 13[kW]로 분류하고, DR은 1.5[kW]의 용량으로 설정하며, VPL 장치부는 말단 구간에 적용한다. 한편, DR과 VPL 장치를 고려한 상정 시나리오는 표 1과 같다.



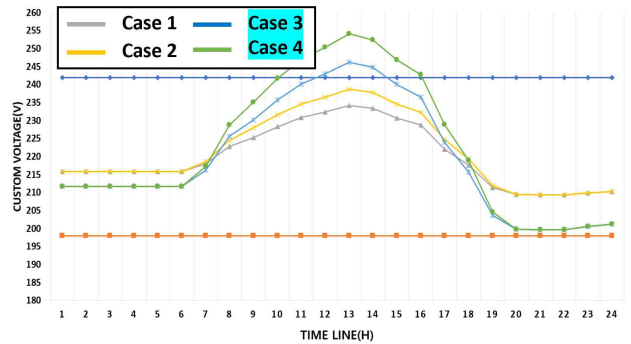
[그림 3] DR과 VPL 장치가 연계된 배전계통의 구성

[표 1] 상정 시나리오 조건

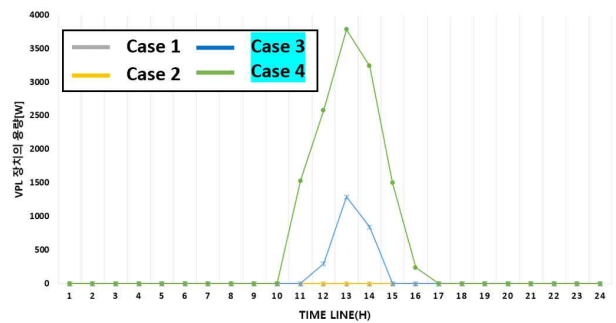
Case	부하 용량[kW]	말단 전압강하[%]	태양광 전원 용량[kW]
1	10.5	5	10.5
2	10.5	5	13
3	10.5	10	10.5
4	10.5	10	13
5	15	5	10.5
6	15	5	13
7	15	10	10.5
8	15	10	13

4.2 수용가 과전압 시 VPL 장치의 운용 특성

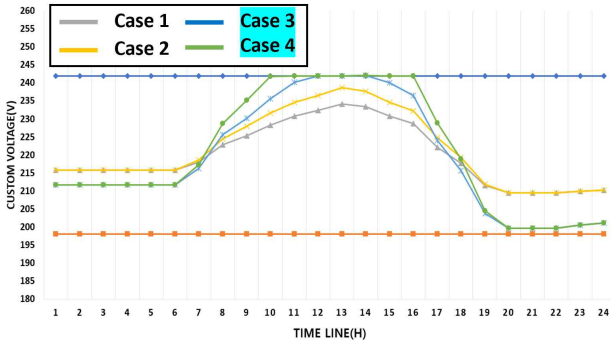
상기의 시뮬레이션 조건과 상정 시나리오를 바탕으로, 과전압 현상에 대한 VPL 장치의 운용 특성을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4 (a)는 태양광 역조류에 의한 수용가의 과전압 특성으로, Case 3과 Case 4에서 과전압의 규정전압 범위인 242[V]를 초과함을 알 수 있다. 또한, 그림 4 (b)는 VPL 장치의 kW 및 kWh 용량을 나타내는데, Case 3의 kW 용량은 1.29[kW], kWh 용량은 2.43[kWh]로 상정되고, Case 4의 kW 용량은 3.78[kW], kWh 용량은 12.87[kWh]로 산정된다. 그리고, 그림 4 (c)는 VPL 장치에 의한 수용가의 전압 특성으로, 모든 Case에 대하여 수용가의 전압을 규정전압 범위인 242[V] 이내로 유지하여, 과전압 현상을 효과적으로 해소할 수 있음을 알 수 있다.



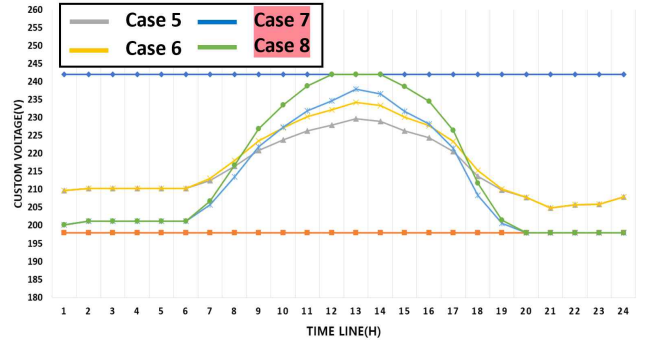
(a) 태양광전원의 역조류에 의한 수용가 과전압 현상



(b) VPL 장치의 용량



(c) VPL 장치에 의한 수용가의 전압
[그림 4] 수용가 과전압 시 VPL 장치의 운용 특성



(c) DR과 VPL 장치에 의한 수용가의 전압
[그림 5] 수용가 저전압 시 VPL 장치의 운용 특성

4.3 수용가 저전압 시 VPL 장치의 운용 특성

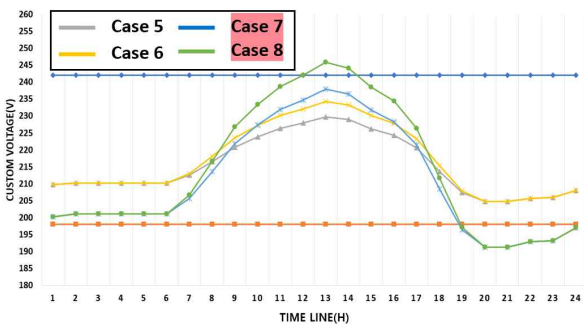
상기의 시뮬레이션 조건과 상정 시나리오를 바탕으로, 저전압 현상에 대한 VPL 장치의 운용 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5 (a)는 수용가의 저전압 특성으로, Case 7과 Case 8에서 저전압의 규정전압 범위인 198[V] 미만으로 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 그림 5 (b)는 DR과 VPL 장치의 kW 및 kWh 용량을 나타내는데, DR은 19시~20시에 1.5[kW]만큼 운용하여, 3[kWh]의 용량을 가지고, Case 7과 Case 8의 kW 용량은 1.59[kW], kWh 용량은 4.45[kWh]로 산정된다. 그리고, 그림 5 (c)는 DR과 VPL 장치에 의한 수용가의 전압 특성으로, 모든 Case에 대하여 수용가의 전압을 규정전압 범위인 198[V] 이내로 유지하여, 저전압 현상을 효과적으로 해소할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

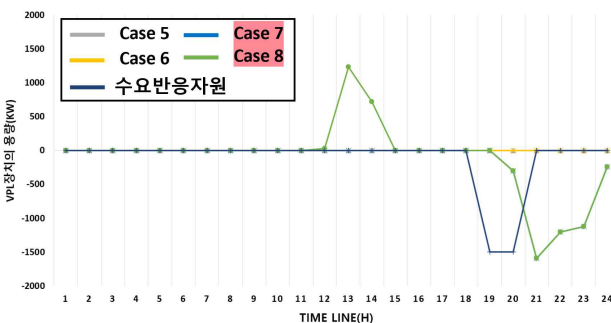
본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상시키기 위한 VPL 장치를 제안하고, DR을 고려한 VPL 장치의 최소용량 산정 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로 VPL 장치의 운용 특성을 평가한 결과, DR을 고려한 VPL 장치는 수용가에서 발생하는 과전압 및 저전압 현상을 효과적으로 해결할 수 있어, 본 연구에서 제안한 최소용량 산정 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] 박성준, “태양광발전 수용성 향상을 위한 배전계통에서의 ESS Aggressive 전압-무효전력 제어 방안 적용”, 전기학회 논문지, 제 72권 12호, pp. 1782-1788, 2023년.
- [2] 이수용, “신재생에너지 수용성 향상을 위한 30kW급 가상전력선로 시험장치의 구현에 관한 연구”, 한국과학기술학회 논문지, 제 26권 5호, pp. 385-393, 2025년.



(a) 수용가 저전압 현상



(b) DR 및 VPL 장치의 용량