

신재생에너지 수용성 향상을 위한 고압 배전선로용 VPL 시스템의 최적 용량 산정 방안

최성문*, 김춘성*, 박병우*, 박찬욱**, 노대석**
 녹색에너지연구원, 한국기술교육대학교,
 e-mail:moon9507@gei.re.kr

Estimation Method of Optimal Capacity of VPL System in Primary Feeders to Improve Hosting Capacity for Renewable Energy Sources

Sung-Moon Choi, Chun-Sung Kim, Byung-Woo Park, Chan-Wook Park Dae-Seok Rho*
 *Green Energy Institute, **Korean University of Technology and Education

요약

최근, 2030 탄소중립 선언 및 제10차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 도입이 급속도로 증가하고 있다. 특히, 태양광전원은 일사량이 높은 주간 시간대에 출력이 집중되는 특성을 가지고 있는데, 부하의 사용량이 태양광전원의 발전량보다 작은 경우 수용가의 전압이 규정범위를 초과하는 문제점이 빈번하게 발생하여, 신재생에너지의 수용성이 감소하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비의 인프라를 증설하지 않고 신재생에너지의 수용성을 개선시킬 수 있는 고압선로용 VPL 시스템의 최적 용량 산정 알고리즘을 제안한다. 또한, PCSAD/EMTDC를 이용하여 VPL 시스템, 고압 배전계통 등으로 구성된 VPL 시스템이 연계된 고압 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 VPL 시스템의 운용특성을 평가한 결과, 5MW 태양광전원의 고압 배전선로에 연계되면 고압 배전선로용 VPL 시스템의 최적 kW/kWh 용량은 각각 5MW, 28MWh로 산정되고, 이를 통해 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시킬 수 있어, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

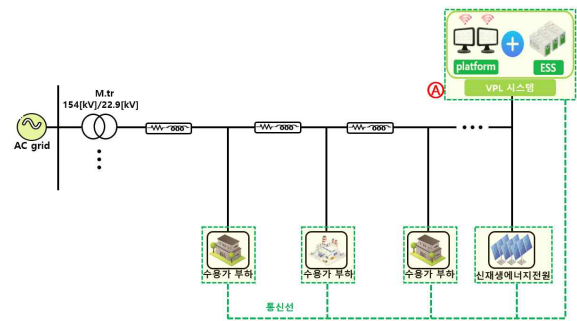
1. 서론

2050 탄소중립 선언과 제10차 전력수급기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가되고 있지만, 전력 공급과 수요의 불균형에 의해 신재생에너지의 수용성이 감소하고 있는 사례가 다수 발생하고 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하지 않고 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 송·배전계통을 관리하는 VPL 운용기술을 제시한다. 여기서, VPL은 운용 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, 플랫폼은 배전계통 운용 및 계통 유연자원 정보를 수집하고 VPL용 ESS를 제어하며, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다.

또한, VPL을 경제적으로 도입하기 위한 고압선로용 VPL용 ESS의 최적용량 산정 알고리즘을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VPL 시스템이 연계된 고압 배전계통의 모델링을 수행한다. 상기의 내용을 바탕으로, VPL 시스템의 운용특성을 평가한 결과, 5MW 태양광전원의 고압 배전선로에 연계되면 고압 배전선로용 VPL 시스템의 최적 kW/kWh 용량은 각각 5MW, 28MWh로 산정되고, 이를 통해 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시킬 수 있어, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 고압선로용 VPL 시스템의 최적 용량 산정 알고리즘

신재생에너지가 연계된 고압 배전계통은 그림 1과 같이 주변 압기, 고압 배전선로, 수용가 부하, 신재생에너지 등으로 구성된다. 여기서, 그림 1의 ㉠와 같이 VPL 시스템을 고압선로 말단 또는 신재생에너지의 연계구간에 설치하여, 배전용변압기 1차측 전압을 적정하게 유지할 수 있다.



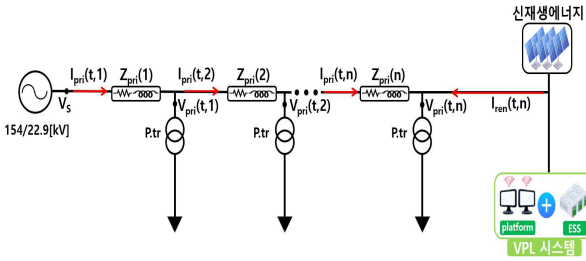
[그림 1] 신재생에너지가 연계된 저압 배전계통

먼저, 신재생에너지와 VPL 시스템이 연계된 고압 배전계통을 동기화하여 나타내면 그림 2와 같다. 고압 배전선로 n번 구간에 연계된 신재생에너지 역조류로 인하여 가장 큰 과전압이 발생한 배전용변압기의 1차측 전압($V_{pri}(t, n)$)은 배전용 변전소 송

출전압(V_S)에서 고압선의 전압강하를 차감하여 식 (1)과 같이 정식화될 수 있다. 즉, k 번 구간의 고압 배전선로 전류($I_{pri}(t, k)$)와 신재생에너지 출력전류($I_{ren}(t, n)$)의 차를 고압선 임피던스($Z_{pri}(k)$)에 곱하고, 이 값을 n 번 구간까지 누적한 전압강하분을 송출전압에서 차감하여 산정한다.

$$V_{pri}(t, n) = V_S(t) - \left[\sum_{k=1}^n ((I_{pri}(t, k) - I_{ren}(t, n)) \cdot Z_{pri}(k)) \right] \quad (1)$$

여기서, $V_{pri}(t, n)$: t 시간대 고압 배전선로 n 번 구간의 배전용변압기의 1차측 전압[V], V_S : 배전용 변전소 송출전압[V], $I_{pri}(t, k)$: t 시간대 k 번 구간의 고압선로 전류[A], $I_{ren}(t, n)$: n 번 구간에 연계된 신재생에너지 출력전류[A], $Z_{pri}(k)$: k 번 구간의 고압선 임피던스[Ω]

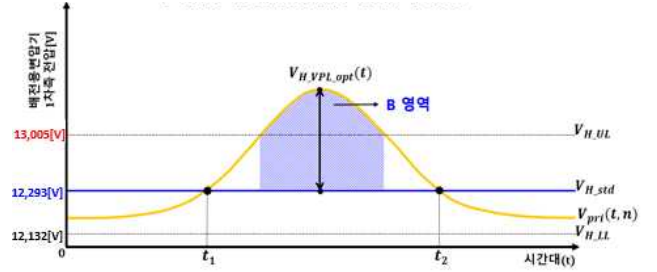


[그림 2] VPL 시스템과 신재생에너지가 연계된 고압 배전선로

또한, 배전용변압기 1차측 전압을 규정전압 상한치 (V_{H_std} , 12,293[V]) 이내로 유지하기 위한 전압조정 개념도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3의 B 영역은 수용가의 전압이 규정범위를 벗어난 시간대를 나타내며, 이를 해소시키기 위한 VPL 시스템의 최적 전압 조정치 ($V_{con_opt}(t)$)는 과전압이 발생한 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시키기 위한 값으로, 식 (2)와 같이 과전압이 가장 크게 발생한 수용가의 전압 ($V_{pri}(t, n)$)에서 표준 전압 (V_{H_std})을 차감한 값으로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{H_VPL_opt}(t) &= V_{pri}(t, n) - V_{H_std}, \text{ if } V_{pri}(t, n) > V_{H_std} \\ V_{H_VPL_opt}(t) &= 0, \text{ otherwise} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $V_{H_VPL_opt}(t)$: t 시간대 VPL 시스템의 최적 전압 조정치[V], V_{H_std} : 고압으로 환산한 표준전압(12,293[V])



[그림 3] VPL 시스템의 최적 전압 조정치 개념도

한편, VPL 시스템의 최적 전류 조정치는 과전압이 발생된 고압 배전선로의 역조류를 흡수하여, 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시킨다. 즉, 상기의 식 (2)를 바탕으로, 수용가의 전압을 표준전압으로 유지하기 위한 최적 전류 조정치 ($I_{H_VPL_opt}(t)$)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서, VPL 시스템의 최적 전력 조정치는 상기에서 제시한 식 (3)과 규정전압 범위를 벗어난 수용가의 전압 ($V_{pri}(t, n)$)을 곱하여, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{H_VPL_opt}(t) = \frac{V_{H_VPL_opt}(t)}{\sum_{k=1}^n Z_{pri}(k)} \quad (3)$$

$$P_{H_VPL_opt}(t) = 3 \cdot V_{pri}(t, n) \cdot I_{H_VPL_opt}(t) \quad (4)$$

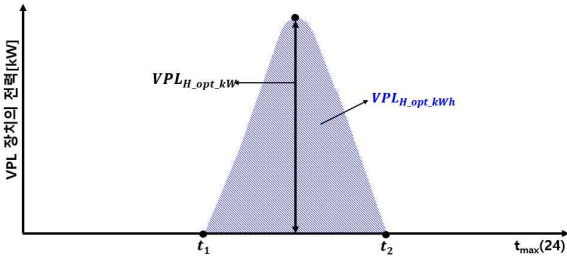
여기서, $I_{H_VPL_opt}(t)$: t 시간대 VPL 시스템의 최적 전류 조정치[A], $P_{H_VPL_opt}(t)$: t 시간대 VPL 시스템의 최적 전력 조정치[kW]

따라서, 상기의 VPL 시스템의 최적 전력 조정치를 바탕으로, 규정전압을 벗어난 시간대($t_1 \sim t_2$)에 수용가의 전압을 표준전압으로 유지하기 위한 VPL 시스템의 최적 kW 및 kWh 도입용량은 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 최적 kW 도입용량 ($VPL_{H_opt_kW}$)은 $t_1 \sim t_2$ 시간대의 VPL 시스템의 가장 큰 전력 조정치 값으로 결정하고, 최적 kWh 도입용량 ($VPL_{H_opt_kWh}$)은 최적 전력 조정치를 $t_1 \sim t_2$ 시간대에 대하여 적산한 값으로 나타낼 수 있다.

$$VPL_{H_opt_kW} = \max_{t \in [1, 24]} [P_{H_VPL_opt}(t)] \quad (5)$$

$$VPL_{H_opt_kWh} = \sum_{t=1}^{24} P_{H_VPL_opt}(t) \quad (6)$$

여기서, $VPL_{H_opt_kW}$: VPL 시스템의 최적 kW 도입용량 [kW], $VPL_{H_opt_kWh}$: VPL 시스템의 최적 kWh 도입용량 [kWh]

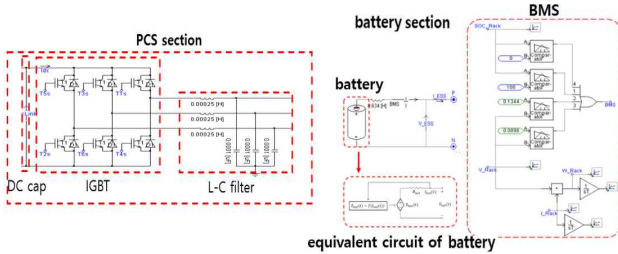


[그림 4] VPL 시스템의 최적 전력 조정치 개념도

3. 고압 배전선로용 VPL 시스템의 모델링

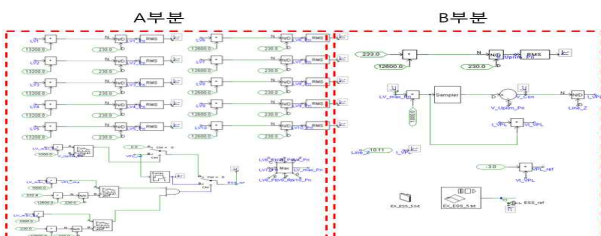
3.1 VPL 시스템의 모델링

VPL용 ESS는 그림 5와 같이, PCS부와 배터리부로 구성한다. 여기서, PCS부는 IGBT 모듈, L-C 필터, DC link 커패시터 등으로 구성되는데, IGBT 모듈은 스위칭을 통해 DC 전력을 120 [°] 위상차를 갖는 3상 AC로 변환시켜, 배터리의 충·방전 동작을 수행한다. 또한, L-C 필터는 전력변환 시 발생하는 고조파와 노이즈를 저감시키고, DC link 커패시터는 DC 전압을 안정적으로 유지시키는 역할을 수행한다. 또한, 배터리부는 배터리와 BMS로 구성된다.



[그림 5] VPL 시스템의 모델링

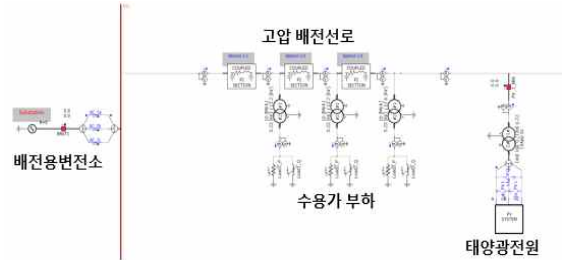
한편, ESS 동작모드 결정부와 최적용량 산정부로 구성된 VPL 운용 플랫폼을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 A 부분은 ESS 동작모드 결정부로, 운용 플랫폼을 통해 고압 배전선로 구간별로 수집된 배전용변압기의 1차측 전압이 규정범위를 벗어 나면 VPL 시스템을 충전 또는 방전시키는 모델링을 나타낸 것이다. 그리고, B 부분은 VPL 시스템용 ESS의 최적용량 산정부로, 배전용변압기의 1차측 전압을 규정범위 이내로 유지시키는 ESS의 용량을 산정한다.



[그림 6] VPL 시스템용 플랫폼의 구성

3.2 고압 배전계통의 모델링

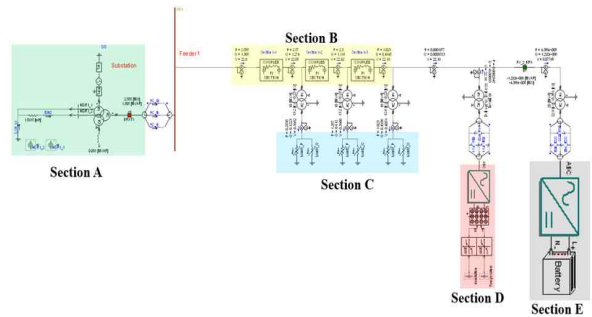
고압 배전계통은 그림 7과 같이, 배전용 변전소, 고압선로, 수용가 부하, 태양광전원 등으로 구성된다. 여기서, 배전용 변전소는 전압원, 주변압기, 차단기 및 계측기, NGR(neutral ground resistor) 등으로 나타낼 수 있다. 또한, 0.9의 역률을 가지는 수용가 부하의 유효전력은 저항 성분, 무효전력은 리액턴스 성분으로 환산하고, 태양광 모듈과 연계용 인버터로 구성된 태양광전원은 배전선로 말단에 연계된다.



[그림 7] 고압 배전계통의 모델링

3.3 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 신재생에너지의 수용성 향상을 위한 고압 배전선로용 VPL 시스템이 연계된 배전계통의 모델링은 그림 8과 같다. 여기서, section A는 배전용 변전소, section B는 고압선로, section C는 수용가 부하, section D는 태양광전원, section E는 VPL 시스템을 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

고압 배전선로용 VPL 시스템의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 고압 배전선로는 5[km], 8[km], 12[km]의 총 3개 구간으로 구성하고, 1번과 2번 구간의 선종은 ACSR-160[mm²], 3번 구간의 선종은 ACSR-95[mm²]로 상정한다. 또한, 배전용 변압기 탭 비율은 1번과 2번 구간 및 3번 구간에 대해서, 각각 13,200[V]/230[V],

12,600[V]/230[V]를 적용한다. 그리고, 고압 배전선로의 피크 부하는 8[MW]이고, 3번 구간에 연계된 태양광전원의 최대출력은 5[MW]로 상정한다.

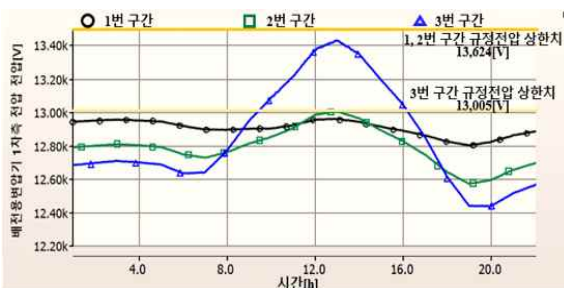
[표 1] 시뮬레이션 조건

구간	선종[mm ²]	부하비율 [%]	선로길이 [km]	선로임피던스 [Ω/km]		배전용 변압기 탭전압 [V]
				R	X	
1	ACSR-160	10	5	0.18	0.39	13,200/230
2	ACSR-160	50	8	0.18	0.39	13,200/230
3	ACSR-95	40	12	0.3	0.44	12,600/230

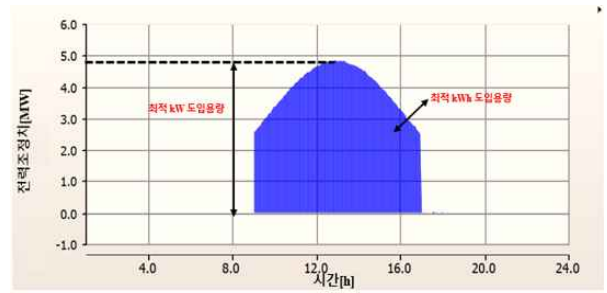
4.2 VPL 시스템의 최적용량 산정

고압 배전선로에서 태양광전원의 연계에 따른 배전용변압기 1차측 전압을 나타내면 그림 9와 같으며, 1~3 번 구간은 각각 배전용변압기 1차측 전압을 나타낸다. 즉, 3번 구간의 배전용변압기 1차측 전압은 태양광전원의 역조류에 의하여 9시~16시까지 규정전압 상한치(13,005[V])를 초과하여, 최대 13,918[V]의 과전압이 발생함을 알 수 있다. 이러한 전압문제를 해결하기 위한 VPL 시스템의 최적 도입용량은 그림 10과 같이, 최적 kW 도입용량은 배전용변압기 1차측 전압이 규정전압 범위를 벗어난 시간대에서 최대 전력 조정치인 5[MW]으로 결정되고, 최적 kWh 도입용량은 전력 조정치를 적산한 28[MWh]로 산정된다.

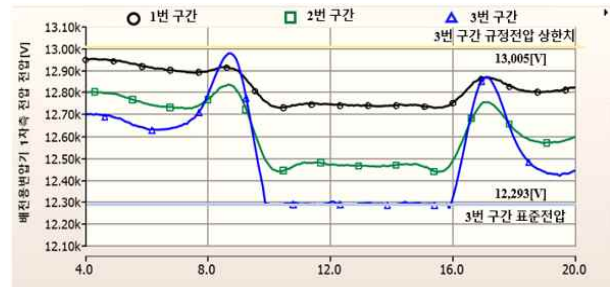
즉, VPL 시스템의 최적 도입용량에 의한 배전용변압기 1차측 전압의 특성을 나타내면 그림 11과 같으며, 규정전압을 벗어난 시간대에서 3번 구간의 배전용변압기 1차측 전압이 12,293[V] 이하로 유지됨을 알 수 있다. 따라서, VPL 시스템의 운용에 따라 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시켜, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 9] 태양광전원의 역조류에 의한 배전용변압기의 전압



[그림 10] VPL 시스템의 kW/kWh 최적 도입용량



[그림 11] 최적 도입용량 VPL 시스템에 의한 배전용변압기 1차측의 전압

5. 결 론

따라서, 본 논문에서는 전력설비의 인프라를 증설하지 않고 신재생에너지의 수용성을 개선시킬 수 있는 고압선로용 VPL 시스템의 최적 용량 산정 알고리즘을 제안한다. 또한, PCSAD/EMTDC를 이용하여 VPL 시스템, 고압 배전계통 등으로 구성된 VPL 시스템이 연계된 고압 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 VPL 시스템의 운용특성을 평가한 결과, 5MW 태양광전원의 고압 배전선로에 연계되면 고압 배전선로용 VPL 시스템의 최적 kW/kWh 용량은 각각 5MW, 28MWh로 산정되고, VPL 시스템의 운용에 따라 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시켜, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기후환경에너지부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(RS-2025-02318111, 에너지수요관리핵심기술개발)로서, 관계부처에 감사드립니다.

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.