

신재생에너지 수용성 향상을 위한 저압선로용 VPL 장치의 모델링에 관한 연구

최성문, 노성은, 이중선, 유현상, 노대석*

한국기술교육대학교

e-mail: moon9507@koreatech.ac.kr

Modeling of VPL Device to Improve Hosting Capacity for Renewable Energy Source in Secondary Feeder

Sung-Moon Choi, Seong-Eun Rho, Joong-Seon Lee,

Hyun-Sang You, Dae-Seok Rho*

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 개선 시킬 수 있는 저압선로용 VPL 장치를 제시하고, 이 장치를 경제적으로 도입하기 위한 최적 용량 산정 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VPL 장치부, VPL 평가시험장치부 등으로 구성된 저압선로용 VPL 장치의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로 VPL 장치의 운용특성을 평가한 결과, 수용가의 전압이 규정범위를 벗어나는 경우, 저압선로용 VPL 장치의 운용에 따라 수용가의 전압을 적정하게 유지시켜, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

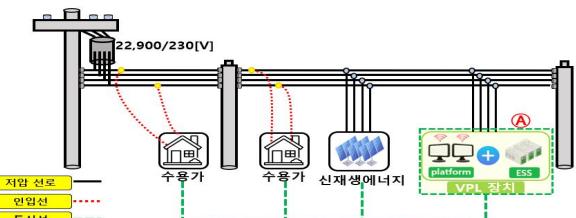
1. 서 론

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[1-2]. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 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·배전계통을 관리하는 VPL(virtual power line) 운용기술을 제시한다. 여기서, VPL은 VPL 플랫폼과 VPL용 ESS(energy storage system)로 구성되는데, VPL 플랫폼은 배전계통 운용 및 계통 유연지원 정보를 수집하고 VPL용 ESS를 제어하며, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다. 또한, 본 논문에서는 VPL을 경제적으로 도입하기 위한 VPL용 ESS의 최적용량 산정방안을 제안하고, 이를 기반으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VPL 장치가 연계된 저압 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 시뮬레이션을 수행한 결과, 태양광 역조류에 의하여 수용가에 과전압이 발생할 경우, VPL은 배전계통과 태양광전원

의 운용정보를 바탕으로, 수용가의 전압을 적정하게 유지시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 저압선로용 VPL 장치의 최적 용량 산정 알고리즘

신재생에너지가 연계된 저압 배전계통은 그림 1과 같이 주상변압기, 저압선로, 인입선, 수용가 부하, 신재생에너지 등으로 구성된다. 여기서, 저압선로에 연계된 신재생에너지에 의하여 수용가에 과전압이 발생하는 경우, 그림 1의 Ⓐ와 같이 VPL 장치를 저압선로 말단 또는 신재생에너지의 연계구간에 설치하여, 수용가의 전압을 적정하게 유지할 수 있다.



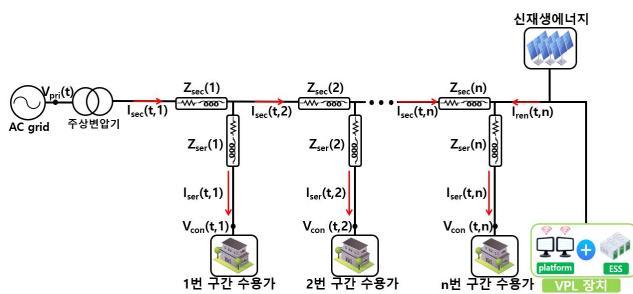
[그림 1] 신재생에너지가 연계된 저압 배전계통

먼저, 신재생에너지와 VPL 장치가 연계된 저압 배전계통을 등

가화하여 나타내면 그림 2와 같다. 즉, 신재생에너지 역조류로 인하여 가장 큰 과전압이 발생한 k번 구간의 수용가 전압($V_{con}(t, k)$)은 주상변압기 2차측 직하 전압과 저압선로, 인입선의 전압강하를 고려하여 식 (1)과 같이 정식화할 수 있다. 여기서, 식 (1)의 첫 번째 항은 주상변압기 2차측의 직하 전압으로, 주상변압기 텁에 의해 환산된 2차측 전압에서 내부 전압 강하($V_{ptr_drop}(t)$)를 고려하여 산정한다. 또한, 식 (1)의 두 번째 항은 저압선로에 의한 전압강하를 나타내며, k번 구간의 부하전류($I_{sec}(t, k)$)와 신재생에너지의 역조류($I_{ren}(t, k)$)의 차를 저압선로 임피던스($Z_{sec}(k)$)에 곱하고, 이 값을 n번 구간까지 누적하여 산정한다. 한편, 식 (1)의 세 번째 항은 수용가의 인입선 전압강하로, k번 구간의 인입선 부하전류($I_{ser}(t, k)$)와 인입선 임피던스($Z_{ser}(k)$)를 곱하여 산정한다.

$$\begin{aligned} V_{con}(t, k) = & [(V_{ptr,pri}(t) \cdot \frac{V_{tap,sec}}{V_{ptr,pri}}) - (V_{ptr_drop} \cdot \alpha(t))] \quad (1) \\ & - [\sum_{k=1}^n (I_{sec}(t, k) - I_{ren}(t, k)) \cdot Z_{sec}(k)] \\ & - [(I_{ser}(t, k) \cdot Z_{ser}(k))] \end{aligned}$$

여기서, $V_{con}(t, k)$: 과전압이 가장 크게 발생한 k번 구간의 수용가 전압[V], $V_{ptr,pri}(t)$: 주상변압기의 1차측 전압[V], $V_{tap,pri}$: 주상변압기의 1차측 텁 전압[V], $V_{tap,sec}$: 주상변압기의 2차측 텁 전압[V], V_{ptr_drop} : 주상변압기의 내부 전압강하[V], $\alpha(t)$: 수용가의 부하율[%], $I_{sec}(t, k)$: k번 구간의 부하전류[A], $I_{ren}(t, k)$: k번 구간의 신재생에너지 역조류[A], $Z_{sec}(k)$: k번 구간 저압선로 임피던스[Ω/km], $I_{ser}(t, k)$: k번 구간의 인입선 부하전류[A], $Z_{ser}(k)$: k번 구간의 인입선 임피던스[Ω/km], k: 구간, n: 전체구간, t: 시간대



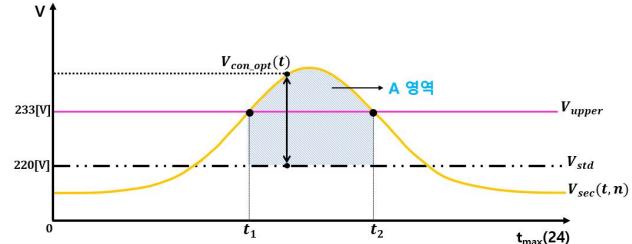
[그림 2] VPL 장치와 신재생에너지가 연계된 저압선로

따라서, 식 (1)의 수용가 전압을 규정전압 상한치(V_{upper} , 233[V]) 이내로 유지하기 위한 전압조정 개념도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3의 A 영역은 수용가의 전압이 규정범위를 벗어난 시간대를 나타내며, 이를 해소시키기 위한 VPL 장치의 최적 전압 조정치($V_{con_min}(t)$)는 과전압이 발생한 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시키기 위한

값으로, 식 (2)와 같이 과전압이 가장 크게 발생한 수용가의 전압($V_{con}(t, n)$)에서 표준 전압(V_{std})을 차감한 값으로 산정할 수 있다.

$$V_{con_opt}(t) = V_{con}(t, n) - V_{std} \quad (2)$$

여기서, $V_{con_min}(t)$: VPL 장치의 최소 전압 조정치[V], $V_{con_opt}(t)$: VPL 장치의 최적 전압 조정치[V], V_{std} : 표준전압(220[V])



[그림 3] VPL 장치의 최적 전압 조정치 개념도

또한, VPL 장치의 최적 전류 조정치는 과전압이 발생된 저압선로의 역조류를 흡수하여, 수용가의 전압을 표준전압으로 유지시킨다. 즉, 상기의 식 (2)를 바탕으로, 수용가의 전압을 표준전압으로 유지하기 위한 최적 전류 조정치($I_{VPL_opt}(t)$)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 선로 임피던스는 VPL 장치의 운전 역률(1.0)을 기준으로 산정한다. 따라서, VPL 장치의 최적 전력 조정치는 상기에서 제시한 식 (3)과 규정전압 범위를 벗어난 수용가의 전압($V_{cus_vio}(t, n)$)을 곱하여, 식 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{VPL_opt}(t) = \frac{V_{con_opt}(t)}{\sum_{k=1}^n Z_{sec}(k)} \quad (3)$$

$$P_{VPL_opt}(t) = 3 \cdot V_{con}(t, k) \cdot I_{VPL_opt}(t) \quad (4)$$

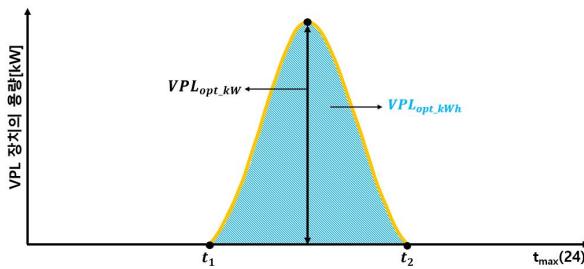
여기서, $I_{VPL_opt}(t)$: VPL 장치의 최적 전류 조정치[A], $Z_{sec}(n)$: k번 구간 저압선로의 임피던스[Ω/km], $P_{VPL_opt}(t)$: VPL 장치의 최적 전력 조정치[kW]

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

$$VPL_{opt_kW} = \max[P_{opt}(t_1) \cdot \cdot \cdot P_{opt}(t_2)] \quad (5)$$

$$VPL_{opt_kWh} = \int_{t_1}^{t_2} [P_{opt}(t)] dt \quad (6)$$

여기서, VPL_{opt_kW} : VPL 장치의 최적 kW 도입용량[kW], VPL_{opt_kWh} : VPL 장치의 최적 kWh 도입용량[kWh], $t_1 \sim t_2$: 규정전압 범위를 벗어난 시간대

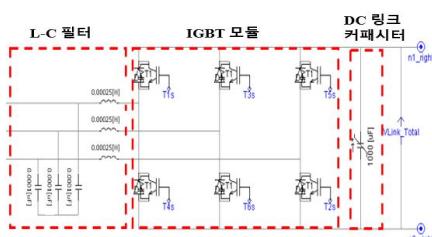


[그림 4] VPL 장치의 최소 전력 조정치 개념도

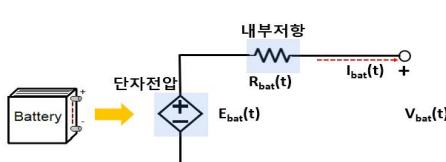
3. PSCAD/EMTDC를 이용한 저압선로용 VPL 장치의 모델링

3.1 VPL 장치의 모델링

VPL 장치는 VPL용 ESS와 플랫폼으로 구성되는데, ESS는 그림 5와 같이 PCS와 배터리로 나타낼 수 있다. 여기서, PCS는 그림 5 (a)와 같이 L-C 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커퍼시터 등으로 구성된다. L-C 필터는 전력변환 시 발생하는 고조파와 노이즈를 저감시키고, IGBT는 스위칭을 통해 DC 전력을 120° 위상차를 갖는 3상 AC 전력으로 변환시키며, DC 링크 커퍼시터는 DC 전압을 안정적으로 유지시키는 역할을 수행한다. 또한, 배터리는 그림 5 (b)와 같이 단자전압, 내부저항 등으로 구성되며, 다수의 배터리 모듈을 하나의 배터리 랙으로 등가화하여 나타낸다.

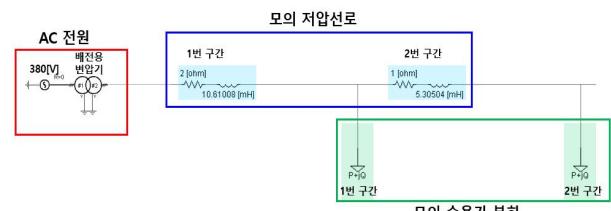


(a) VPL용 ESS의 PCS

(b) VPL용 ESS의 배터리
[그림 5] VPL용 ESS의 모델링

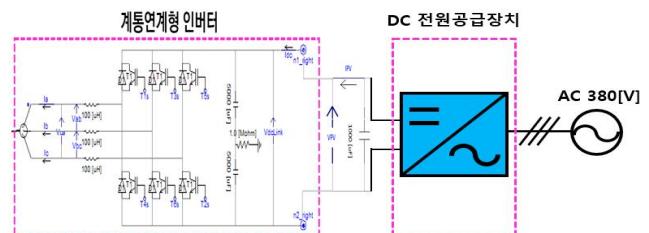
3.2 VPL 평가시험장치의 모델링

VPL 평가시험장치는 모의 배전계통부와 태양광전원부로 구성되는데, 배전계통부는 그림 6과 같이 AC 전원, 모의 저압선로, 모의 수용가 부하, 등으로 모델링 할 수 있다. 여기서, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식이고, 배전용 변압기는 30[kVA]의 정격 용량을 가지며, Y-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 모의 저압선로는 최대 전압강하 20%를 고려하여 저항과 리액턴스 성분으로 모델링을 수행하며, 선로 임피던스에 따른 수용가 과전압 특성을 모의하기 위하여 2개의 구간으로 구성한다.



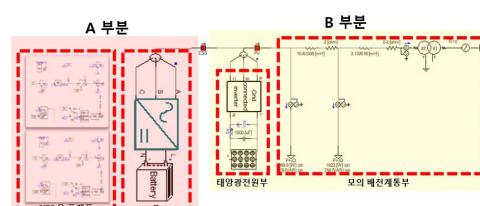
[그림 6] 모의 배전계통부 모델링

한편, 모의 태양광전원부는 그림 7과 같이 DC 전원공급장치와 계통연계형 인버터 등으로 구성된다. 여기서, DC 전원공급장치는 IGBT의 스위칭을 통해 AC 전력을 DC로 변환하여 계통연계형 인버터에 공급하는 역할을 수행한다.



[그림 7] 모의 태양광전원부의 모델링

신재생에너지의 수용성 향상을 위한 저압선로용 VPL 장치의 전체 시스템은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A 부분은 VPL용 ESS와 플랫폼으로 구성된 VPL 장치, B 부분은 모의 배전계통부, 태양광전원부, 등으로 구성된 VPL 평가시험장치를 나타낸다.



[그림 8] VPL 시험장치의 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

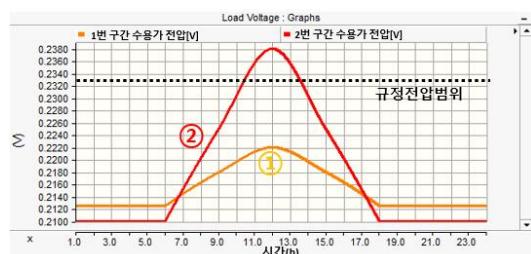
신재생에너지의 수용성 향상을 위한 저압선로용 VPL 시험장치의 시뮬레이션은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, AC 전원은 380[V]의 3상 4선식이며, 모의 저압선로의 1번 구간(공장) 선로 임피던스는 선로의 중간지점을 모의하기 위하여 $0.4+j0.8$ [Ω]으로 설정하고, 2번 구간은 선로 말단지점을 모의하기 위하여 $1+j2$ [Ω]으로 상정한다. 또한, 태양광전원의 역조류에 의하여 수용가의 과전압을 모의하기 위하여, 1번과 2번 구간 부하의 용량은 각각 4.5[kW], 1.5[kW]로 설정하며, 태양광전원의 용량은 11[kW]로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

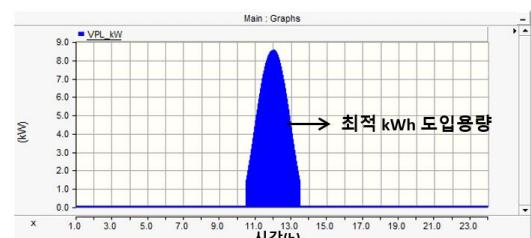
항목	내역	
AC 전원	3상 4선식 380[V]	
저압선로 임피던스 [Ω]	1번 구간	$0.4+j0.8$
	2번 구간	$1+j2$
3Ø 수용가 부하 [kW]	1번 구간	4.5
	2번 구간	1.5
태양광전원 [kW]	11	
VPL 장치 [kW/kWh]	10/64	

4.2 VPL 장치의 최적용량 산정

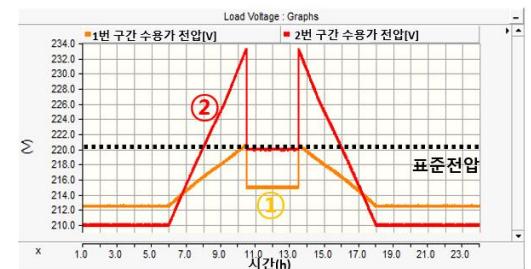
상기의 4.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 태양광전원 연계에 따른 수용가의 과전압 현상을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 1번 그래프는 1번 구간의 수용가 전압이고, 2번 그래프는 2번 구간의 수용가 전압을 나타낸다. 그림 17과 같이 2번 구간의 수용가의 전압은 태양광전원의 역조류에 의하여 11시~15시까지 규정전압($220V \pm 6\%$) 범위를 벗어나고, 최대 237[V]의 과전압이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 수용가 과전압을 해소하기 위한 VPL 장치의 최적 용량은 상기에서 제시한 식 (5)와 식 (6)에 따라 그림 7과 같이 산정된다. 즉, VPL 장치의 최적 kW 도입용량은 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어난 시간대에서 VPL 장치의 최대 전력 조정치인 8.5[kW]으로 결정되고, 최적 kWh 도입용량은 VPL 장치의 전력 조정치를 적산한 22[kWh]로 산정된다. 또한, 최적 도입용량에 의한 수용가의 전압의 특성을 나타내면 그림 8과 같고, 여기서 규정전압을 벗어난 10시 30분 ~ 13시 30분 시간대에 대하여, 2번 구간 수용가의 전압이 표준전압인 220[V] 이내로 유지되어 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 태양광전원의 역조류에 의한 수용가의 과전압 현상



[그림 7] VPL 장치의 kW/kWh 최적 도입용량



[그림 8] 최적 도입용량 VPL 장치에 의한 수용가의 전압

5. 결 론

본 논문에서는 저압 배전선로를 대상으로 VPL 장치를 설치하여, 신재생에너지의 수용성을 개선 시킬 수 있는 저압선로용 최적 용량 VPL 장치를 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VPL 장치부, VPL 평가시험장치부 등으로 구성된 최적 VPL 장치의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 시뮬레이션을 수행한 결과, 수용가의 전압이 규정 범위를 벗어나는 경우, 저압선로용 VPL 장치의 운용에 따라 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시킬 수 있어, 신재생 에너지의 수용성을 개선시킬 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, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25–28