

신재생에너지 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 시험장치의 구현에 관한 연구

이수용*, 전진택*, 노성은*, 정재범*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:lsy4570@kopo.ac.kr

Implementation of 30kW VPL Test Device to Improve Hosting Capacity in Renewable Energy Sources

Soo-Yong Lee*, Jin-Taek Jeon*, Seong-Eun Rho*, Jae-Beom Jung*, Dae-Seok Rho*

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

요약

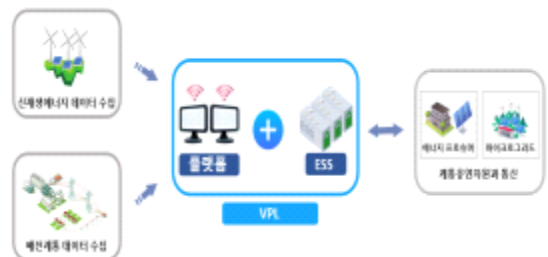
최근, 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제10차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 용량이 급속도로 증가하여, 배전선로에 연계된 신재생에너지의 역조류에 의하여 수용가의 전압이 규정전압 범위(207V~233V)를 벗어날 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 신재생에너지의 수용성을 향상시키는 VPL(virtual power line) 장치를 제안한다. 여기서, VPL 장치는 VPL용 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, 플랫폼은 배전계통, 신재생에너지, 계통유연자원의 운용정보를 실시간으로 모니터링하며, ESS는 운용 플랫폼의 제어신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다. 상기의 내용을 바탕으로, 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL부 등으로 구성된 30kW급 VPL 시험장치를 구현하여, VPL 장치의 운용특성을 평가한 결과, 신재생에너지의 역조류에 의하여 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, VPL이 배전계통, 신재생에너지, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, ESS를 충전시켜 신재생에너지의 수용성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

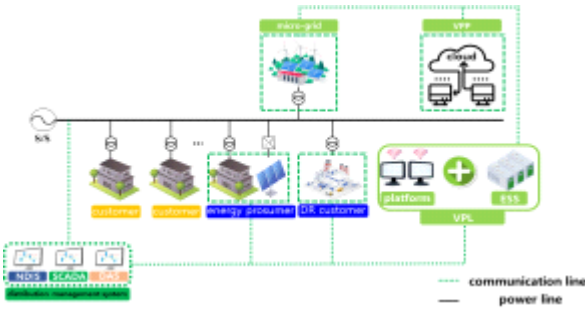
최근, 전 세계적인 그린뉴딜 및 RE3020 정책에 따라 배전선로에 연계된 신재생에너지 용량이 급격하게 증가하고 있다. 특히, 태양광전원은 낮 시간대에 발전량이 급증하여 수용가의 전압이 규정전압 범위(207[V]~233[V])를 초과하는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전력설비의 인프라를 추가적으로 설치하는 방안이 제시되고 있지만, 경제적으로 높은 건설비용이 발생함으로 전력설비 인프라의 투자비용을 경감시킬 수 있는 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 신재생에너지의 수용성을 향상시키는 가상적인 전력선로 운용기술인 VPL(virtual power line) 장치의 운용특성을 제안한다. 상기의 내용을 바탕으로, 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL부 등으로 구성된 30kW급 VPL 시험장치를 구현하여, VPL 장치의 운용특성을 평가한 결과, 신재생에너지의 역조류에 의하여 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, VPL이 배전계통, 신재생에너지, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, ESS를 충전시켜 신재생에너지의 수용성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 신재생에너지의 수용성 향상을 위한 VPL의 운용특성

VPL은 그림 1과 같이 VPL용 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL용 플랫폼은 기존의 배전계통 운용시스템으로부터 배전계통 각 지점의 전압 및 전류, 등의 배전계통 운용정보를 실시간으로 수집하고, 신재생에너지의 출력과 계통유연자원의 운용상황을 모니터링하며, VPL용 ESS는 배전계통 수용가에 전압 문제가 발생할 경우, VPL용 플랫폼 제어신호에 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 계통유연자원(VPP, DR, 에너지 프로슈머) 등으로 구성된다.



[그림 1] VPL의 구성

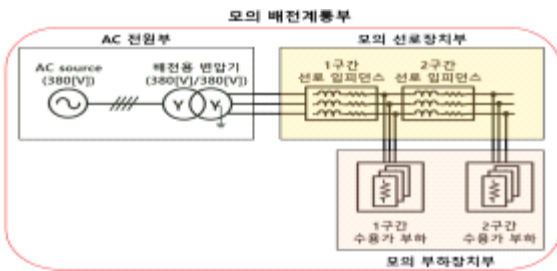


[그림 2] VPL이 연계된 배전계통 구성도

3. 신재생에너지 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 시험장치의 구현

3.1 모의 배전계통부

모의 배전계통부는 그림 3과 같이 AC 전원, 모의 선로장치, 모의 부하장치, 등으로 구성된다. 여기서, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식이고, 배전용 변압기는 30[kVA]의 정격용량을 가지며, Y-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 모의 선로장치는 실 계통의 저압 배전선로를 전압강하 20[%]의 lab-scale로 축약하고, 저항과 리액턴스 성분으로 구성한다. 또한, 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 선로 임피던스에 따른 수용가 과전압 특성을 모의하기 위하여 모의 배전선로는 2개의 구간으로 구성한다. 한편, 모의 부하장치는 저항과 리액터 부하로 구성되는데, 1구간의 저항 부하는 상당 200[W], 300[W], 2,000[W], 3,000[W]이고, 리액터 부하는 200[Var], 300[Var], 2,000[Var], 3,000[Var]로 MC 제어에 따라 조정된다. 또한, 2구간의 저항 부하는 상당 100[W], 400[W], 1,000[W], 4,000[W]이고, 리액터 부하는 100[Var], 400[Var], 1,000[Var], 4,000[Var]로 구성된다.



[그림 3] 모의 배전계통부의 구성도

3.2 모의 태양광전원부

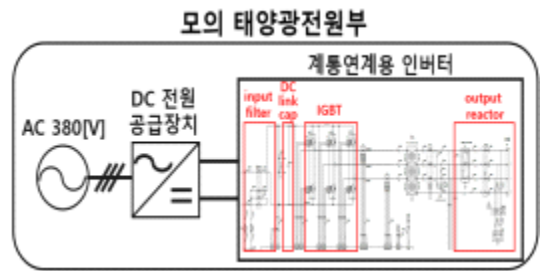
모의 태양광전원부는 그림 4와 같이 DC 전원공급장치와 계통연계형 인버터 등으로 구성된다. 여기서, DC 전원공급장치는 IGBT의 스위칭을 통해 AC 전력을 DC로 변환하여 계통연계용 인버터에 공급하는 역할을 수행한다. 또한, 입력 Filter, DC link 커패시터, IGBT, 출력 Reactor 등으로 구성된 계통연계용 인버터는 PLL 제어를 바탕으로 계통의 위상을

추종하여 전력을 공급한다. 여기서, 계통연계용 인버터의 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 디커플링 회로에 의하여 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (K_p + \frac{K_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (1)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (2)$$

여기서, V_d , V_q : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_q , I_d : d-q동기 좌표계에 의한 계통 전류(직류), V_{sq} : 계통의 순시전압

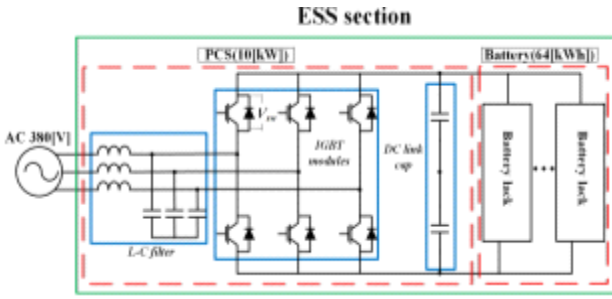


[그림 4] 모의 태양광전원부의 구성도

3.3 VPL부

3.3.1 VPL용 ESS

VPL부는 VPL용 ESS와 VPL용 플랫폼으로 구성되는데, 그림 5와 같이 VPL용 ESS는 배터리 및 PCS로 나타낼 수 있다. 여기서, PCS의 정격용량은 10[kW], 효율은 97.5%, 스위칭 주파수는 4[kHz]이고, L-C 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터, 등으로 구성된다. 또한, L-C 필터는 전력변환 시 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감시킨다. 또한, IGBT는 스위칭을 통해 DC 전력을 120° 위상차를 갖는 3상 AC 전력으로 변환시키며, DC-Link 커패시터는 DC 전압을 안정적으로 유지시키는 역할을 수행한다. 한편, VPL용 ESS의 PCS는 유효전력과 무효전력의 제어를 수행하기 위하여 PI 제어 알고리즘을 바탕으로, ESS의 출력을 결정하는 d축과 q축의 기준전류($I_{d,ess}^*$, $I_{q,ess}^*$)를 산정한다. 여기서, d축과 q축의 기준전류는 각각 식 (3), 식 (4)에 따라 산정되며, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전된다. 또한, VPL용 ESS의 배터리의 정격용량은 64[kWh], 정격전압은 260[V], 6S1P의 배터리팩으로 구성되며, 상세한 사양은 표 1과 같다.



[그림 5] VPL용 ESS의 구성도

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (3)$$

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (4)$$

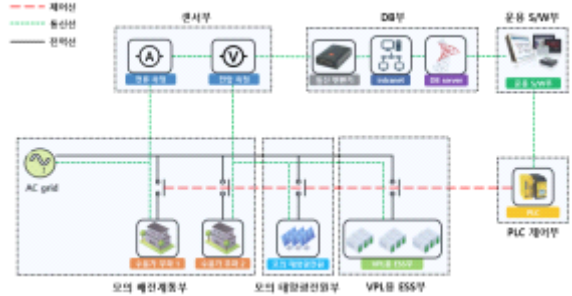
여기서, $I_{d,ess}^*$: ESS 출력을 위한 d축 기준전류, P_d^* : d축 유효전력 기준값, $P_d(t)$: d축 유효전력 출력값, $I_{q,ess}^*$: ESS 출력을 위한 q축 기준전류, Q_q^* : q축 무효전력 기준값, $Q_q(t)$: q축 무효전력 출력값

[표 1] VPL용 ESS의 배터리 사양

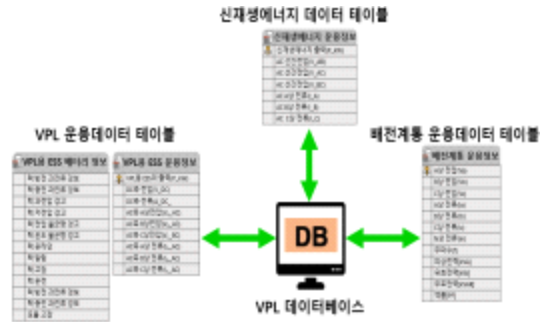
항 목	내 역
정격전압[V]	260
정격용량[kWh]	64
운용전압[V]	230.4 ~ 293.4
구성	6S1P
충전전류[A]	81.18
방전전류[A]	81.18

3.3.2 VPL용 플랫폼

VPL용 플랫폼은 그림 6과 같이 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL용 ESS부, 운용 S/W부, 통신변환부, 데이터베이스(DB)부 등으로 구성된다. 여기서, VPL용 플랫폼의 통신방식은 시리얼 포트와 이더넷을 사용하고, 통신 변환장치(RS-485 to Ethernet)를 통해 인트라넷에 연결하여 통신 네트워크를 구축한다. 또한, AutoBase S/W를 이용하여 배전계통, 모의 태양광전원, VPL용 ESS의 운용데이터를 그림 7과 같이 실시간으로 수집한다. 이를 바탕으로, VPL용 플랫폼은 DB에 실시간으로 저장되고 있는 배전계통, 신재생에너지, VPL용 ESS의 운용데이터 및 계통의 상황을 모니터링하여, 수용가의 전압이 규정전압 범위를 벗어난 경우, ESS의 충·방전 동작 및 계통유연자원과 협조 운용하여, 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있다.



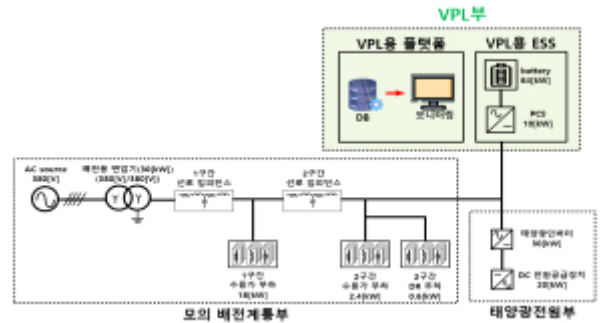
[그림 6] VPL용 플랫폼의 모델링



[그림 7] VPL용 플랫폼의 DB 테이블 구성

3.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 신재생에너지의 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL용 시험장치의 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, part A는 모의 배전계통부, part B는 모의 태양광전원부, part C는 ESS와 플랫폼으로 구성된 VPL부를 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템 모델링

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

신재생에너지의 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 시험장치의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 모의 배전계통은 모의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 선로 임피던스에 따른 수용가 과전압 특성을 모의하기 위하여 2개의 구간으로 구성한다. 즉, 1번 구간(공장)은 선로의 중간지점을 모의하기 위하여 0.4+j0.8[Ω]으로 설정하고, 2번 구간(공장)은 선로 말단지점을 모의하기 위하여 1+j2[Ω] 또는 2+j4[Ω]으로

상정한다. 한편, 태양광 역조류에 의하여 수용가의 과전압을 모의하기 위하여, 1번과 2번 구간 부하의 용량은 각각 5.4[kW], 2.2[kW]로 설정하며, 모의 태양광전원의 용량은 15[kW]로 상정한다. 단, 수용가의 역률은 0.9로 가정한다.

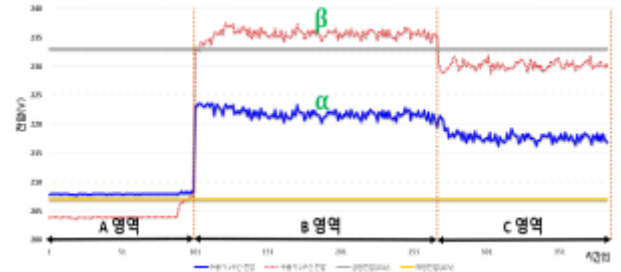
[표 2] 시뮬레이션 조건

구분	내역		
3 ϕ AC 전원[V]	380		
선로 임피던스[Ω]	1번 구간 (선로 중간지점)	0.4+j0.8	
	2번 구간 (선로 말단지점)	1+j2	2+j4
수용가 3 ϕ 부하 [kW]	1번 구간	5.4	
	2번 구간	2.2	
태양광전원[kW]	15		

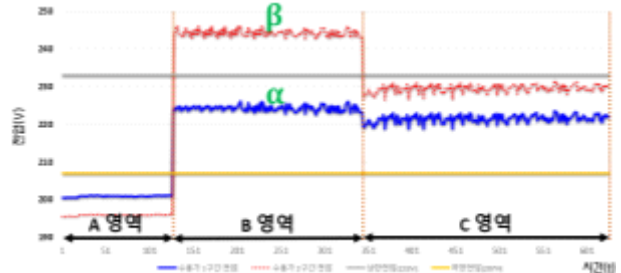
4.2 수용가 과전압 시 VPL 장치의 운용특성

상기의 4.1절에서 제시한 시험조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 30kW급 VPL 시험장치의 운용특성을 나타내면 그림 9와 같으며, α 와 β 그래프는 각각 1번과 2번 구간 수용가의 전압을 나타낸다. 여기서, 그림 9의 A 영역은 태양광전원이 연계되기 전의 정상상태를 나타내고, B 영역은 15[kW]의 태양광전원이 연계된 상태이며, C 영역은 VPL용 플랫폼의 제어신호에 의하여, ESS가 충전 동작을 수행한다. 또한, 그림 9(a)는 1번과 2번 구간 선로 임피던스가 각각 0.4+j0.8 [Ω], 1+j2[Ω]인 경우를 나타내며, A 영역과 같이 1번, 2번 구간의 수용가 전압은 각각 208[V], 204[V]로 산정된다. 한편, 그림 9(a)의 B 영역은 태양광전원의 역조류로 인하여 2번 구간 수용가 전압이 237[V]로 산정되어, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 9(a)의 C 영역에서는 본 논문에서 제안한 VPL 장치의 1.5[kW] 충전 동작에 의하여, 수용가의 전압이 232[V]로 유지되어, 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)는 1번과 2번 구간 선로 임피던스가 각각 0.4+j0.8[Ω], 2+j4[Ω]인 경우를 나타내며, A 영역과 같이 1번, 2번 구간의 수용가 전압은 각각 201[V], 196[V]로 산정된다. 한편, 그림 9(b)의 B 영역은 태양광전원의 역조류로 인하여 2번 구간 수용가 전압이 245[V]로 산정되어, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 9(b)의 C 영역은 본 논문에서 제안한 VPL 장치의 4.5[kW] 충전 동작에 의하여, 수용가의 전압이 232[V]로 유지되어, 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 태양광전원의 역조류에 의하여 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, 본 논문에서 제안한 30kW급 VPL 장치는 배전계통, 태양광전원 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS를 적절한 용량으로 충전시켜 신재생에너지의 수

용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 태양광전원의 연계지점의 공장이 길어질수록, 수용가에 과전압 현상이 크게 발생하여, 더 큰 용량의 VPL 장치가 요구됨을 알 수 있다.



(a) 2번 구간의 선로 임피던스가 1+j2[Ω]인 경우



(b) 2번 구간의 선로 임피던스가 2+j4[Ω]인 경우
[그림 9] 수용가 과전압시 VPL 시험장치의 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있는 방안 중 하나인 VPL 장치의 운용 특성을 제안하고, 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL부, 등으로 구성된 30kW급 VPL 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, 30kW급 VPL 시험장치는 배전계통, 태양광전원, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS를 적절한 용량으로 충·방전시켜 신재생에너지의 수용성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 태양광전원이 배전선로 말단에 연계될수록 수용가의 과전압 현상이 크게 발생하여, 더 큰 용량의 VPL 장치가 요구됨을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 이태의, 이유수, “제주도의 재생에너지 확대와 전력계통의 안정적 운영 방향”, 에너지포커스, pp.48-63, 2021년

[2] 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.