

저압 배전선로용 500W급 Virtual Power Line 장치의 모델링 및 구현에 관한 연구

강동구*, 신하은*, 유현상***, 이승호*, 노대석*
*한국기술교육대학교 전기공학과, ** (주)시스피아
e-mail:ehdrn3743@koreatech.ac.kr

A Study on the Modeling and Implementation of a 500W Virtual Power Line Device in Secondary Feeder

Dong-Gu Kang*, Ha-Eun Shin*, Hyun-Sang You***,
Seung-Ho Lee*, Dae-Seok Rho*

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

요약

최근, 정부의 에너지 전환 정책에 따라 태양광 전원 보급이 확대되어 저압 배전선로에 연계되는 태양광 전원 설비의 용량이 지속적으로 증가하고 있다. 하지만, 태양광 전원의 용량의 증가로 인하여, 수용가의 전압이 크게 변동하는 현상이 발생하고 있으며, 제주도의 출력 제한과 같은 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력 설비 인프라의 추가적인 증설이 요구되지만, 이는 시간적, 비용적으로 많은 자원이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 태양광 전원의 연계로 인한 수용가의 과전압과 피크부하에 의한 저전압 현상으로부터 수용가의 전압을 규정 전압 범위 이내(207~233[V])로 유지 시킬 수 있는 저압 배전선로용 VPL 장치를 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼부 등으로 구성된 저압 배전선로용 VPL 장치의 모델링을 수행하고, 모의 배전계통부, 모의 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼부로 구성된 500[W]급 VPL 시험장치를 구현한다. 상기에서 제안한 모델링과 시험장치를 바탕으로 저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성을 종합적으로 평가한 결과, 수용가의 전압이 규정 전압 범위를 벗어나는 경우, 저압 배전선로용 VPL 장치가 VPL용 ESS의 충·방전 및 DR 수용가의 협조를 통해, 수용가의 전압을 규정 전압 범위 이내로 유지시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 상기의 모델링과 시험장치의 운용 특성이 매우 유사하여, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서론

최근, 정부의 에너지 전환 정책에 따라 태양광 전원의 보급이 확대되면서, 저압 배전선로에 연계되는 태양광 전원 설비의 용량이 지속적으로 증가하고, 특정 시간대에 다수의 수용가에서 많은 전력을 사용하여 피크부하가 발생하는 경우, 수용가 전압이 규정 전압 범위(207~233[V])를 벗어날 가능성이 있다.[1] 이러한 문제를 해결하기 위하여, 송·변전설비와 같은 전력 설비 인프라의 추가적인 증설이 요구되지만, 이는 시간적, 비용적으로 많은 자원이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전력 설비 인프라를 증설하지 않고 태양광 전원의 연계지점이나, 배전선로의 말단에 설치하여, 수용가 전압을 규정 전압 범위 이내로 유지시킬 수 있는 저압 배전선로용 VPL 장치를 제안한다.[2] 상기의 내용을 바탕으로, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼부 등으로 구성된 VPL 장치의 모델링을 수행하고, 모의 배전계통부, 모의 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼

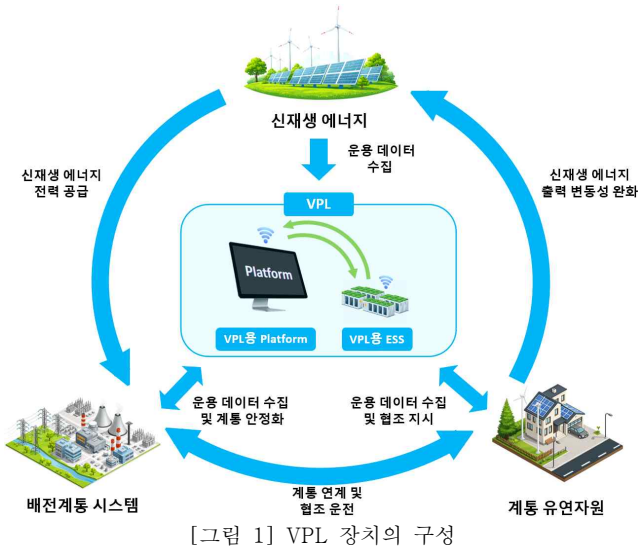
부로 구성된 저압 배전선로용 500[W]급 VPL 시험장치를 구현한다. 상기에서 제안한 VPL 시험장치와 모델링의 운용 특성을 종합적으로 평가한 결과, 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, VPL용 ESS를 충전하고, 저전압 현상의 경우, DR 수용가의 협조와 VPL용 ESS의 방전을 통해, 수용가의 전압을 규정 전압 범위 이내로 유지시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 상기의 VPL 시험장치와 모델링의 운용 특성이 매우 유사하여, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

2. 저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성

최근, 저압 배전선로에 연계되는 태양광 전원의 용량이 지속적으로 증가하고, 특정 시간대에 다수의 수용가에서 많은 전력을 사용함에 따라 피크부하에 의하여, 수용가의 전압 규정 전압 범위를 벗어날 가능성이 있다. 이러한 현상을 해결하기 위하여, 전력 설비 인프라의 추가적인 증설이 필요하지만, 이는 시간적, 비용적으로 많은 자원이 요구되는 실정이다. 따라서, 다양한 기술

적 해결 방안이 제시되고 있으며, 해결 방안 중의 하나인 VPL 장치의 운용 기술이 주목받고 있다.

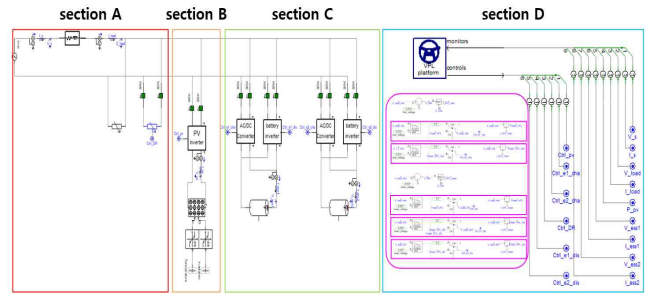
여기서, VPL 장치는 그림 1과 같이 VPL용 플랫폼과 VPL용 ESS부로 구성된다. 먼저, VPL용 플랫폼은 배전계통 운용시스템을 통해 각 지점의 전압 및 전류 등의 데이터를 실시간으로 측정하고, 태양광 전원 및 계통 유연자원의 운용 상태 등을 실시간으로 감시한다. 또한, 수집된 운용 데이터를 바탕으로, VPL용 플랫폼부는 계통 유연자원과 협조 및 VPL용 ESS의 충·방전 동작을 수행하여, 수용가의 전압을 규정 전압 범위 이내로 유지한다. 즉, VPL 장치는 전력 설비 인프라를 증설하거나 신설하지 않고, 태양광 전원의 연계 지점이나 수용가 말단 등에 VPL 장치를 설치하여, 배전계통에 연계된 수용가의 전압을 규정 전압 범위 이내로 유지하는 운용 기술이다.



[그림 1] VPL 장치의 구성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 저압 배전선로용 VPL 장치의 모델링

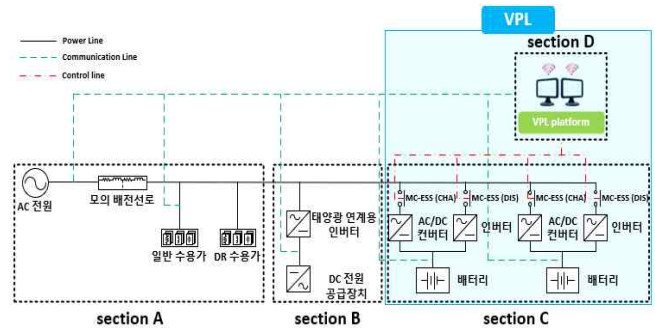
상기의 내용을 바탕으로, VPL 장치가 연계된 저압 배전선로의 전체 시스템의 모델링은 그림 2와 같다. 여기서, section A는 AC 전원, 배전선로, 수용가 부하로 구성된 배전계통부이고, section B는 태양광 연계용 인버터와 태양광 스트링으로 구성된 태양광 전원부를 나타낸다. section C는 AC/DC 컨버터, 인버터, 배터리로 구성된 VPL용 ESS부이고, section D는 감시장치와 제어장치로 VPL용 플랫폼부를 나타낸다.



[그림 2] 전체 시스템의 모델링

4. 저압 배전선로용 500W급 VPL 시험장치의 구현

상기의 내용을 바탕으로, VPL 장치가 연계된 저압 배전계통의 전체 시스템 구성도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, section A는 모의 배전계통부를 나타내고, section B는 모의 태양광 전원이며, section C는 VPL용 ESS부, section D는 VPL용 플랫폼부를 나타낸다.



[그림 3] 전체 시스템의 구성도

5. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 및 시험 조건은 표 1과 같다. 여기서, AC 전원은 단상 220[V], 선로 임피던스는 $6+j3[\Omega]$ 로 적용한다. 또한, 과전압 현상의 경우, 수용가 부하의 용량은 440[VA], 역률은 0.9이며, 태양광 전원부의 출력은 1,300[W], VPL용 ESS의 충전용량은 416/364[W/Wh]로 상정한다. 한편, 저전압 현상의 경우, 수용가 부하의 용량은 540[VA], 역률은 0.94, DR 수용가의 용량은 수용가 부하의 20[%]인 100[W]로 상정하며, VPL용 ESS의 정격 전압은 26[V]이고, 방전용량은 200/364[W/Wh]로 적용한다.

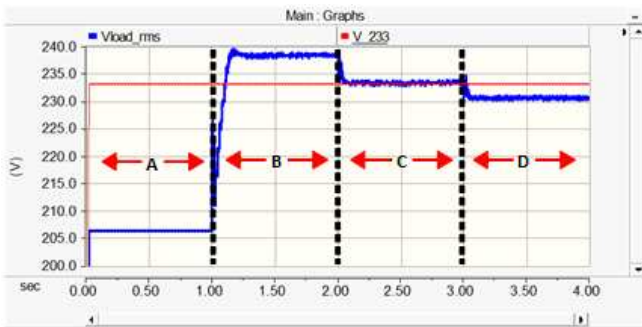
[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

구분		수용가의 과전압 현상 모의	수용가의 저전압 현상 모의
배전계통부	AC 전원[V]	220	
	선로 임피던스[Ω]	6+j3	
	수용가 부하 용량[VA]	440	530
	역률	0.9	0.94
	DR 수용가 용량[W]	-	100
태양광 전원부[W]		1,300	-
VPL용 ESS부	정격 전압[V]	26	
	ESS의 용량 [W/Wh]	416/364	200/364

5.2 PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 VPL 장치의 운용 특성

5.2.1 과전압 발생 시 VPL 장치의 운용 특성

상기에서 제시한 5.1절의 과전압 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 저압 배전선로에 연계된 VPL 장치의 운용 특성을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, A 영역은 태양광 전원이 연계되기 이전의 정상상태 특성을 나타내며, 수용가 전압이 206[V]로 산정된다. 또한, B 영역은 1,300[W]의 태양광 전원이 연계된 구간으로, 수용가 전압이 238.5[V]로 나타나며, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 한편, C 영역은 VPL용 플랫폼의 제어장치에 의하여, VPL용 ESS부의 1번 ESS의 배터리가 208[W] 충전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가 전압이 233.5[V]로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, D 영역은 VPL용 ESS부의 2번 ESS의 배터리가 추가로 208[W] 충전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가 전압이 230[V]로 유지되어 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.

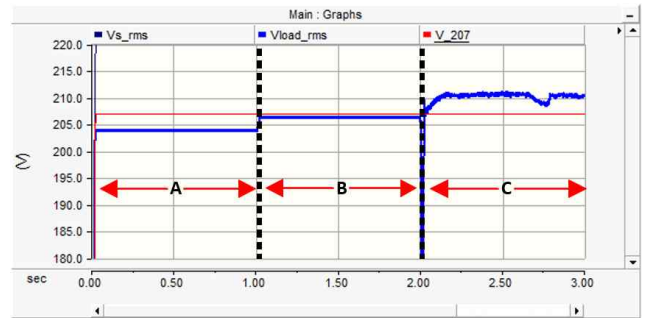


[그림 4] 과전압 발생 시 VPL 장치의 운용 특성

5.2.2 저전압 발생 시 VPL 장치의 운용 특성

상기의 5.1절에서 제시한 저전압 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 저압 배전선로에 연계된 VPL 장치의 운용 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, A 영역은 피크부하 시 수용가 전압 특성을 나타내고, 수용가 전압이 204[V]로 상정되며, 저전압 현상이 발생

함을 알 수 있다. 또한, B 영역은 DR 수용가에 협조를 지시하는 구간으로, 수용가의 전압이 206.3[V]로 상승함을 알 수 있다. 마지막으로, C 영역은 저전압 현상을 해소하기 위하여, VPL용 플랫폼의 제어장치를 통하여, L용 ESS부의 1번과 2번 ESS의 배터리가 200[W] 방전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가의 전압이 210.5[V]로 상승하여, 저전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.

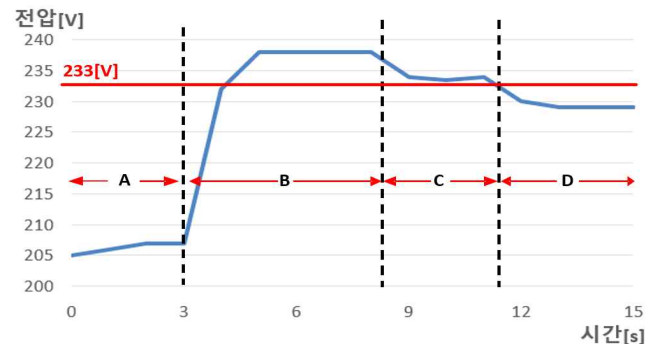


[그림 5] 저전압 현상 발생 시 VPL 장치의 운용 특성

5.3 500W급 VPL 시험장치의 운용 특성

5.3.1 과전압 발생 시 VPL 시험장치의 운용 특성

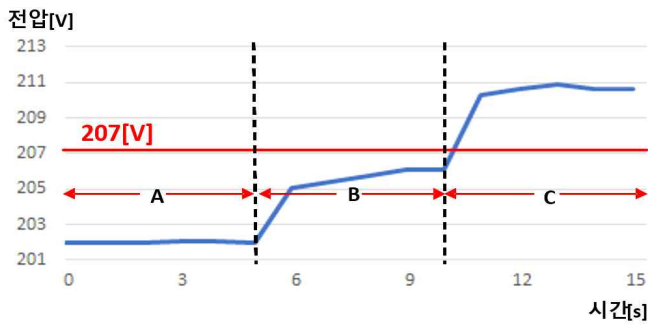
상기의 5.1절에서 제시한 과전압 시험 조건을 바탕으로, 저압 배전선로에 연계된 500[W]급 VPL 시험장치의 운용 특성은 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, A 영역은 모의 태양광 전원이 연계되기 전 정상상태 특성을 나타내며, 수용가 전압이 206[V]로 산정된다. 또한, B 영역은 1,300[W]의 모의 태양광 전원이 연계된 구간으로, 수용가 전압이 238[V]로 나타나며, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 한편, C 영역은 VPL용 플랫폼의 제어신호에 의하여, VPL용 ESS부의 1번 ESS 배터리가 208[W] 충전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가 전압이 234[V]로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, D 영역은 과전압 현상을 해소하기 위하여, VPL용 ESS부의 2번 ESS의 배터리가 추가로 208[W] 충전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가 전압이 229[V]로 유지되어 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 과전압 발생 시 VPL 시험장치의 운용 특성

5.3.2 저전압 발생 시 VPL 시험장치의 운용 특성

상기에서 제시한 5.1절의 저전압 시험 조건을 바탕으로, 저압 배전선로에 연계된 500[W]급 VPL 시험장치의 운용 특성은 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, A영역은 피크부하 시 수용가 전압 특성을 나타내고, 수용가 전압은 202[V]로 산정된다. 또한, B 영역은 DR 수용가에 협조를 지시하는 구간으로, 수용가 전압이 206[V]로 상승함을 알 수 있다. 한편, C 영역은 저전압 현상을 해소하기 위하여, VPL용 플랫폼의 제어신호를 바탕으로, VPL용 ESS부의 1번과 2번 ESS의 배터리가 200[W] 방전 동작을 수행하는 구간으로, 수용가 전압을 211[V]로 상승하여, 저전압 현상을 해소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.



[그림 7] 저전압 발생 시 VPL 시험장치의 운용 특성

5.4 종합분석

상기에서 제시한 PSCAD/EMTDC 모델링과 500[W]급 VPL 시험장치를 바탕으로, 저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성을 종합적으로 나타내면 표 2와 같다. 또한, 각 영역에 따른 과전압 시뮬레이션의 결과는 206[V], 238.5[V], 233.5[V], 230[V]로 산정되고, 시험장치에서 206[V], 238[V], 234[V], 229[V]로 측정되어, 수용가의 과전압 현상이 해소되는 것을 알 수 있다. 상기의 시뮬레이션 및 시험장치의 결과를 바탕으로, 각 영역에 대하여 편차율이 최대 0.44[%] 이하로 발생함을 알 수 있다.

한편, 각 영역에 따른 저전압 현상의 시뮬레이션 결과는 204[V], 206.3[V], 210.5[V]로 산정되고, 시험장치에서 202[V], 206[V], 211[V]로 측정되어, 수용가의 저전압 현상이 해소되는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로, 각 영역에 대하여 편차율이 최대 0.99[%] 이하로 발생함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 모델링과 구현한 시험장치를 바탕으로, 저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성을 종합적으로 평가한 결과, 모델링과 500[W]급 VPL 시험장치의 운용 특성이 거의 유사하여, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

[표 2] 시뮬레이션 및 시험 결과

	과전압			저전압		
	시뮬레이션[V]	시험[V]	편차율[%]	시뮬레이션[V]	시험[V]	편차율[%]
A	206	206	0	204	202	0.99
B	238.5	238	0.21	206.3	206	0.15
C	233.5	234	0.21	210.5	211	0.24
D	230	229	0.44	-	-	-

6. 결 론

본 논문에서는 저압 배전선로용 VPL 장치를 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전계통부, 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼부로 구성된 VPL 장치의 모델링을 수행하고, 모의 배전계통부, 모의 태양광 전원부, VPL용 ESS부, VPL용 플랫폼부로 구성된 저압 배전선로용 500[W]급 VPL 시험장치를 구현한다. 상기에서 제안한 저압 배전선로용 VPL 장치의 운용 특성을 종합적으로 평가한 결과, 태양광 전원에 의하여 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, VPL용 ESS를 충전시켜 수용가 과전압 현상을 해소할 수 있으며, 피크부하에 의하여 저전압 현상이 발생하는 경우, DR 수용가의 협조와 VPL용 ESS를 방전하여 수용가의 저전압 현상을 해소할 수 있다. 상기의 VPL 장치의 모델링과 시험장치의 결과가 매우 유사한 특성을 나타내어, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KE TEP)의 지원(No. RS-2024-00421994)과 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(R S-2024-00409639, 2026년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 한정현, 강태석, 김유섭, 최영준, “2030년 제주계통의 재생에너지 발전량 및 출력제한 전력량 예측”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 247-248, 2023
- [2] 최성문, 노성은, 이중선, 유현상, 노대석, “저압선로용 VPL 장치의 구현에 의한 최적용량 산정 알고리즘에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1184-1185, 2025