

신재생에너지 출력제한 개선을 위한 30kW급 VPL 시험장치 모델링에 관한 연구

노성은*, 최성문*, 이중선*, 이나경*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:eunnny0513@koreatech.ac.kr

Modeling of 30kW VPL Test Device to Improve Power Curtailment in Renewable Energy Sources

Seong-Eun Rho*, Sung-Moon Choi*, Joong-Seon Lee*, Na-Kyung Lee*, Dae-Seok Rho*

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

요약

최근, 제주도의 신재생에너지 전원이 제주도 발전용량의 약 20%까지 증가하여, 신재생에너지 전원의 출력제한이 빈번하게 발생하고 있는데, 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력설비 인프라의 증설 및 신설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되므로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비를 추가로 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 VPL을 설치하여, 신재생에너지전원의 출력제한을 개선시킬 수 있는 VPL의 운용방안을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, AC 모의 선로장치부, 수용가 부하부, 태양광전원부, VPL부, 등으로 구성된 30kW급 VPL에 대한 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 수용가에 과전압 및 저전압이 발생하면 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 적절하게 유지시킬 수 있어, 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

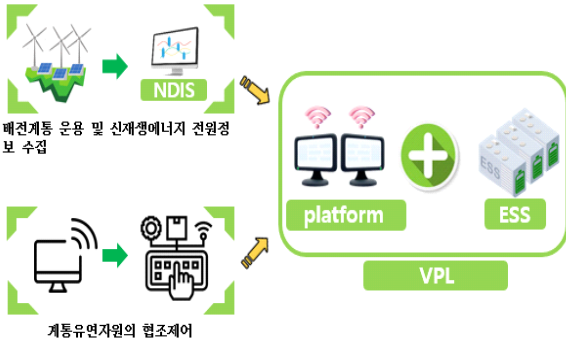
전 세계적인 그린뉴딜 및 RE3020 정책에 따라 신재생에너지 전원의 도입이 매년 급격하게 증가되고 있다. 그러나 제주도의 경우, 급속도로 도입된 신재생에너지 전원에 의하여 출력제한 사례가 빈번하게 보고되고 있어, 경제적으로 막대한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라를 추가적으로 설치하는 방안이 제시되고 있지만, 경제적으로 높은 건설비용이 발생함으로, 전력설비 인프라의 투자비용을 경감시킬 수 있는 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지 전원의 연계지점이나 수용가 말단 등에 ESS를 운용하여, 송·배전계통을 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술인 VPL(virtual power line)의 운용특성을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, AC 모의 선로장치부, 수용가 부하부, 태양광전원부, VPL부, 등으로 구성된 30[kW]급 VPL 시험장치에 대한 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 태양광 역조류에 의해 수용가에 과전압이 발생하면 VPL은 충전 동작을 수행하고, 피크 부하시 수용가에 저전압이 발생하면, VPL은 방전 동작

을 수행하여 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시킬 수 있다. 따라서, VPL은 전력설비 인프라를 투자하지 않고 수용가의 전압 문제를 해결하여, 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 신재생에너지 출력제한을 위한 VPL의 운용특성

신재생에너지의 용량이 급속도로 증가함에 따라 연계된 배전선로의 공급 허용용량(10[MVA])을 초과하거나 수용가의 전압이 규정전압 범위(207[V]~233[V])를 벗어날 가능성이 있다. 이로 인하여 배전계통에 접속된 신재생에너지의 출력제한이 빈번하게 일어나, 경제적으로 막대한 손실을 유발하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되어, 이를 대체할 수 있는 VPL 운용기술이 주목받고 있다. 여기서, VPL은 그림 1과 같이 VPL 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL 플랫폼은 기존의 배전계통 운용시스템으로부터 배전계통 각 지점의 전압 및 전류, 등의 배전계통 운용정보를 실시간으로 수집하고, 신재생에너지의 출력과 계통 유연자원의 운용상황을 모니터링하며, VPL용 ESS는

배전계통 수용가에 전압 문제가 발생할 경우, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다. 즉, VPL은 충·배전설비를 추가로 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 충·배전계통을 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술이다.

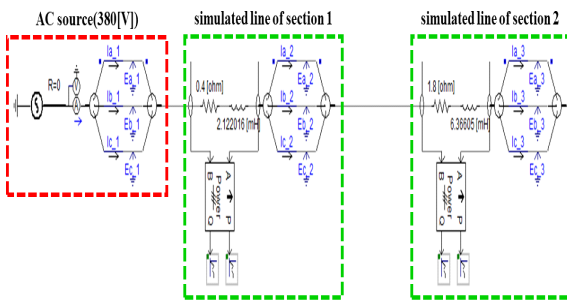


[그림 1] VPL의 구성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 30kW급 VPL의 모델링

3.1 AC 모의 선로장치부

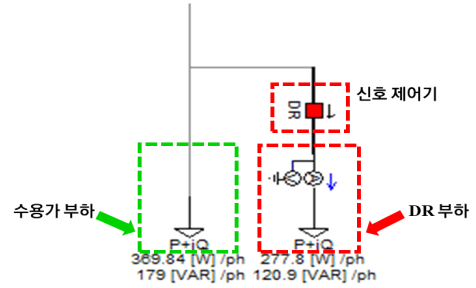
AC 모의 선로장치부는 그림 2와 같이 AC 모의 선로장치부, 모의 선로부로 구성된다. 여기서, AC 전원은 상용전원으로부터 AC 전압 380[V]를 공급하며, 모의 선로부는 저항과 인덕터로 구성되고, 1번 구간의 선로 임피던스는 $0.4+j0.8[\Omega]$, 2번 구간은 $1.8+j2.4[\Omega]$ 로 상정한다.



[그림 2] AC 모의 선로장치부 모델링

3.2 수용가 부하부

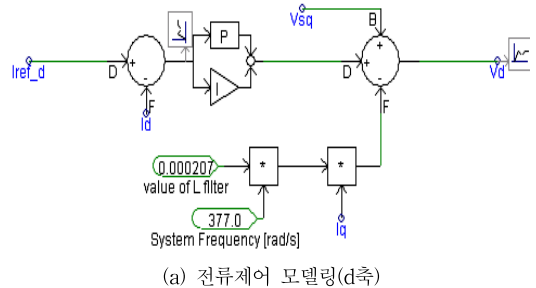
수용가 부하는 정임피던스 특성을 고려하여 저항과 리액터 부하로 구성되며, DR 수용가는 3상 부하와 신호 제어기를 사용하여 그림 3과 같이 모델링 한다. 여기서, DR 수용가는 DR에 참여하는 시간 동안에 VPL의 제어신호에 의해 협조운용을 수행한다.



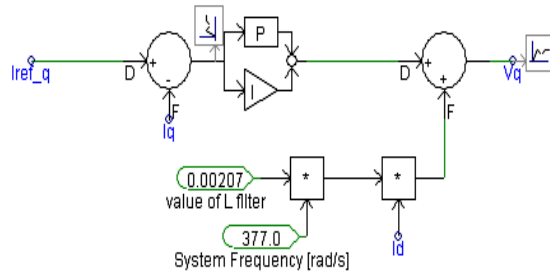
[그림 3] 수용가 및 DR 수용가 부하 모델링

3.3 태양광전원부

태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용하여 전류제어 알고리즘을 모델링하면 그림 4와 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



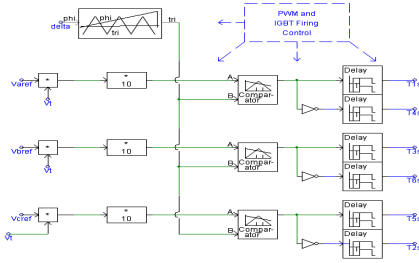
(a) 전류제어 모델링(d축)



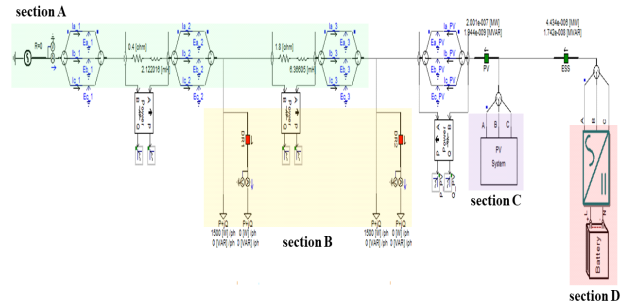
(b) 전류제어 모델링(q축)

[그림 4] 전류제어 모델링

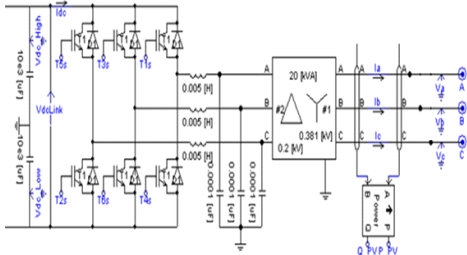
또한, 상기의 모델링에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 한편, 그림 6은 계통연계형 인버터의 모델링을 나타내는데, IGBT는 PWM으로부터 나온 6개의 스위칭신호를 바탕으로 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120° 의 위상차를 갖는 3상의 AC 출력으로 변환시킨다.



[그림 5] IGBT 제어를 위한 PWM 모델링



[그림 8] 전체 시스템 모델링



[그림 6] 계통연계형 인버터부 모델링

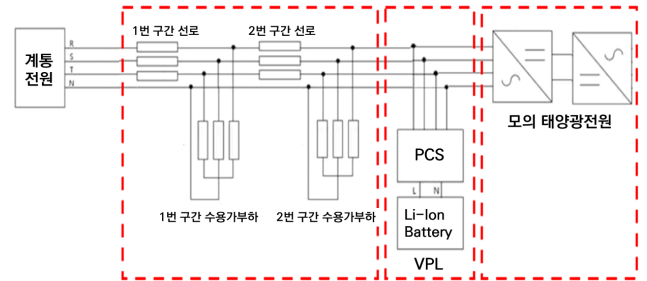
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

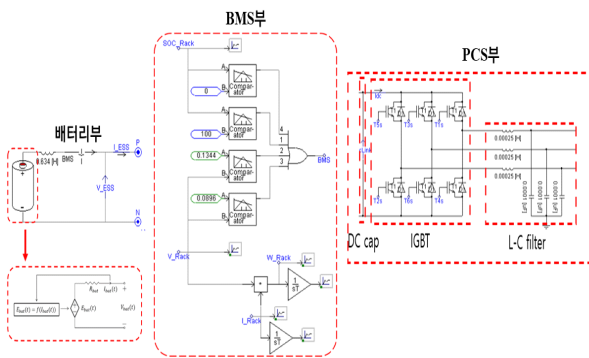
신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용특성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 그림 9와 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 그림 9는 VPL이 연계된 모의 배전계통을 나타내며, 모의 선로 2개의 구간과 2개의 모의 부하, 태양광전원 및 VPL로 구성된다. 또한, 표 1은 시뮬레이션 조건을 나타내는데, 선로 임피던스는 각각 $0.3 + j0.6[\Omega]$, $2.6 + j3.5[\Omega]$ 로, 부하의 역률은 0.9로 상정한다. 이를 바탕으로, 수용가의 과전압 및 저전압 발생 시 VPL의 운용특성을 평가한다.

3.4 VPL부

VPL부는 그림 7과 같이 배터리 및 BMS부, PCS부로 모델링 할 수 있다. 여기서, 배터리는 내부저항, 내부 인덕턴스 및 내부전압으로 구성된 등가회로로 나타낼 수 있으며, BMS부는 과충전, 과방전, 과전압, 저전압, 과전류, 등의 이상상태에 대해서 배터리를 안정적으로 보호하기 위해 회로를 차단하도록 제어한다. 한편, PCS는 비례적분제어 알고리즘을 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어를 수행한다. 이때, 목표로 하는 VPL의 전력을 제어하기 위하여, VPL의 출력을 결정하는 dq축의 기준전류($I_{d,css}^*$, $I_{q,css}^*$)를 산정한다.



[그림 9] 시뮬레이션 계통도



[그림 7] VPL부 모델링

3.5 전체 시스템

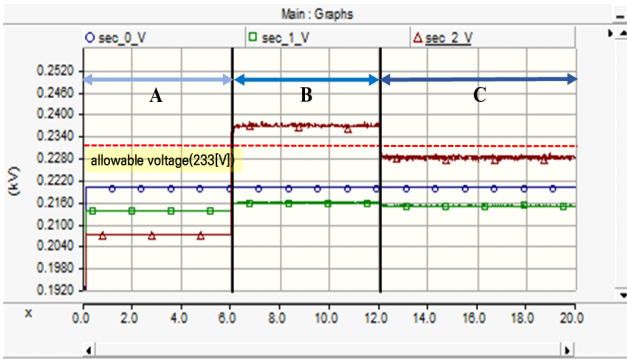
상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, Section A는 AC 모의 선로장치부, Section B는 모의 수용가 부하부, Section C는 모의 태양광전원부, Section D는 VPL부를 나타낸다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	내역	
선로 임피던스[Ω]	1번 구간 선로	0.3+j0.6
	2번 구간 선로	2.6+j3.5
수용가 부하[kVA]	과전압시	7.2
	저전압시	1.1
태양광전원[kW]	7	
-DR[kVA]	2번 구간 수용가 전부하 용량의 20%	

4.2 수용가 과전압 시 VPL에 의한 운용특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 10과 표 2와 같다. 여기서, 그림 10의 A 시간대는 태양광전원이 연계되지 않아 1번 수용가의 전압은 214[V], 2번 수용가는 207[V]로 산정되어, 규정전압 범위 이내로 유지됨을 알 수 있다. 또한, 그림 10의 B 시간대와 같이 태양광전원 7.2[kW] 연계되면, 2번 수용가의 전압이 237[V]로 산정되어, 규정전압 범위를 벗어나는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 10의 C 시간대와 같이 2[kW]의 용량으로 VPL이 충전 동작을 수행하면, 2번 수용가의 전압이 228[V]로 산정되어, 규정전압 범위 이내로 유지됨을 알 수 있다. 따라서, VPL은 수용가의 과전압 문제를 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 10] 수용가 과전압 시 VPL 운용특성

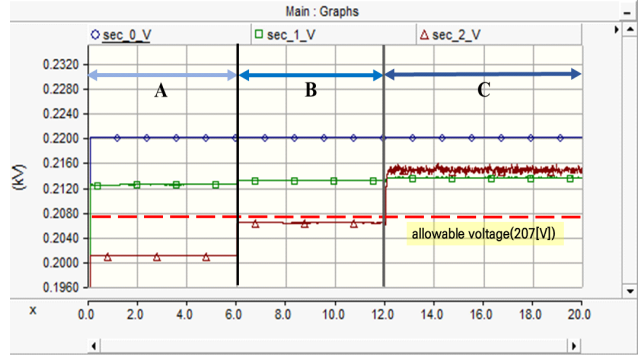
[표 2] 수용가 과전압 시 VPL 운용특성 평가

구분	내역			
	1번 구간 수용가 3Ø 부하 [kVA]	2번 구간 수용가 3Ø 부하 [kVA]	1번 구간 수용가 전압 [V]	2번 구간 수용가 전압 [V]
정상상태	7.2	1.1	214	207
태양광전원 (7kW) 연계	7.2	1.1	216	237
VPL (2kW 충전) 운용	7.2	1.1	216	228

4.3 수용가 저전압 시 VPL에 의한 운용특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 저전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 11과 표 3과 같다. 여기서, 그림 11의 A 시간대는 태양광전원이 연계되지 않아 1번 수용가의 전압은 212[V], 2번 수용가는 201[V]로 산정되어 규정전압 범위를 벗어나는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 11의 B 시간대와 같이 -DR이 1.2[kW] 연계된 경우, 2번 수용가의 전압은 206[V]로 산정되었으며, 그림 11의 C 시간대와 같이, 1.5[kW]의 용량으로 VPL이 방전 동작을 수행하면 2번 수용가의 전압이 215[V]로 산정되어, 규정전압 범위 이내

로 유지됨을 알 수 있다. 따라서, VPL은 수용가의 저전압 문제를 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 11] 수용가 저전압 시 VPL 운용특성

[표 3] 수용가 저전압 시 VPL 운용특성 평가

구분	내역			
	1번 구간 수용가 3Ø 부하 [kVA]	2번 구간 수용가 3Ø 부하 [kVA]	1번 구간 수용가 전압 [V]	2번 구간 수용가 전압 [V]
시나리오				
피크부하	7.7	1.5	212	201
DR(20%) 운용	7.7	1.5	213	206
VPL (2kW 방전) 운용	7.7	1.5	214	215

5. 결론

본 논문에서는 VPL의 구성을 제시하고 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, AC 모의 선로 장치부, 수용가 부하부, 태양광전원부, VPL부로 구성된 VPL이 연계된 배전계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, VPL의 충전 및 방전 동작에 의하여 수용가의 전압문제를 해소할 수 있어, VPL이 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 명호산, 김세호 “재생에너지 출력제한에 따른 출력량 배분 방안 연구”, 전기전자학회논문지, 제 23권 1호, pp. 173-180, 3월, 2019년
- [2] 최성문, 김지명, 김윤호, 유현상, 유경상, 노대석 “신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 최적용량 산정방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 제 24권 11호, pp. 441-451, 11월, 2023년