

# 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 모델링에 관한 연구

최성문\*, 김지명\*, 곽충근\*, 유경상\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, 한국에너지기술연구원\*\*

e-mail:moon9507@koreatech.ac.kr

## Modeling of VPL to Improve Power Curtailment of Renewable Energy Sources using PSCAD/EMTDC

Sung-Moon Choi\*, Ji-Myung Kim\*, Chung-Guen Kwak\*, Kyung-Sang Ryu\*\*,

Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education, \*\*Korea Institute of Energy Technology

### 요약

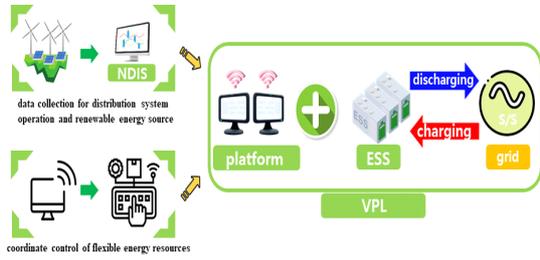
최근, 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제10차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격하게 증가하고 있지만, 전력공급과 수요의 불균형에 의해 신재생에너지 출력제한이 빈번하게 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되므로 이를 극복하기 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 송·배전계통을 관리하는 VPL 운용방안을 제시한다. 여기서, VPL은 VPL 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL 플랫폼은 배전계통 운용 및 계통 유연자원 정보를 수집하며, VPL용 ESS는 VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소부, VPL부, 태양광전원부, 수용가 부하부, 에너지 프로슈머부, 등으로 구성된 VPL이 연계된 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, VPL은 수용가에 과전압 및 저전압 문제가 발생할 경우, VPL 운용특성에 의해 수용가의 전압을 적절하게 유지시킬 수 있어, 전력설비 인프라 증설없이 경제적으로 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서론

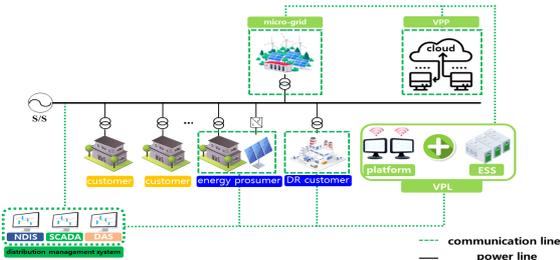
2050 탄소중립 선언과 제10차 전력수급기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가 되고 있다. 하지만 제주도와 같은 일부 지역은 전력설비 인프라의 부족으로 신재생에너지의 출력을 제한시키고 있는 사례가 다수 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 추가적으로 선로를 증설하는 방안이 제시되고 있지만, 경제적으로 높은 건설비용이 발생함으로 전력설비 투자비를 경감시킬 수 있는 연구의 필요성이 증가하고 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 해결할 수 있는 방안 중 하나인 VPL의 운용특성을 제시하고 VPL용 ESS의 최적용량 산정방안을 제시한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소, 배전선로, 태양광전원, VPL용 ESS, 부하 등으로 구성된 신재생에너지 수용성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 제주도의 부하를 대상으로 VPL에 의한 신재생에너지 수용성을 평가한 결과, 수용가의 과전압이 해소됨을 확인할 수 있고 추가적인 전력설비 건설 시기를 늦출 수 있음을 알 수 있었다.

### 2. 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용특성

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 송·배전설비를 추가로 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치 및 운용하여, 송·배전계통을 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술이다. 또한, VPL이 연계된 배전계통은 그림 2와 같이 기존의 배전계통을 비롯하여, VPL(VPL용 ESS 및 플랫폼), 배전계통 운용시스템(NDIS, DAS, SCADA 등), 신재생에너지 및 계통 유연자원(VPP, DR, 에너지 프로슈머) 등으로 구성된다.



[그림 1] VPL의 구성

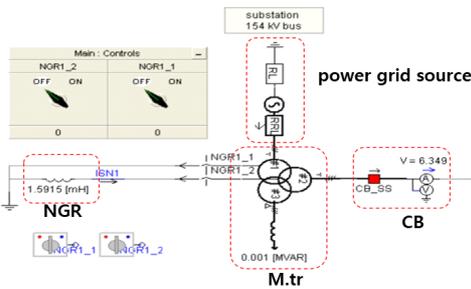


[그림 2] VPL이 연계된 배전계통

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 VPL 모델링

#### 3.1 배전용 변전소부 모델링

배전용 변전소는 그림 3과 같이 AC 전압원, 주변압기, 차단기, NGR로 구성된다. 여기서, 주변압기의 전압비는 154/22.9[kV], 용량은 45/60[MVA] 상정한다. 또한, 배전용 변전소의 주변압기는 Y-Yg-D 결선으로 구성되는데, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 채용한다. 한편, 주변압기 2차측은 0.6[Ω]의 NGR(neutral ground resistor)을 설치하여 배전계통의 지락전류를 제한한다.

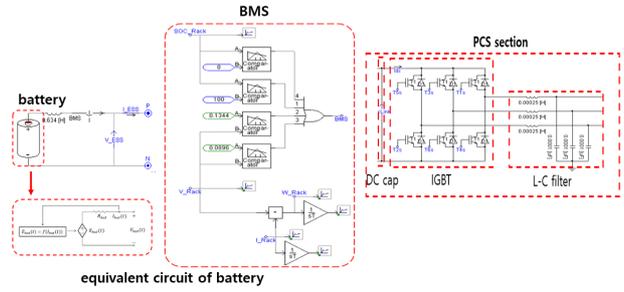


[그림 3] VPL 플랫폼 모델링

#### 3.2 VPL용 ESS부 모델링

VPL용 ESS부는 그림 4와 같이 PCS와 배터리로 모델링할 수 있다. 여기서, PCS는 비례적분(PI: proportional integral)제어 알고리즘을 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어를 수행한다. 이때, 목표로 하는 ESS의 전력(유효전력, 무효전력)을 제어하기 위하여, ESS의 출력을 결정하는 dq축의 기준전류( $I_{d,ess}^*$ ,  $I_{q,ess}^*$ )를 산정한다. 즉, ESS의 목표 전력( $P_d^*$ ,  $Q_q^*$ )과 측정 값( $P_d(t)$ ,  $Q_q(t)$ )을 비교하여 오차를 구한 후,

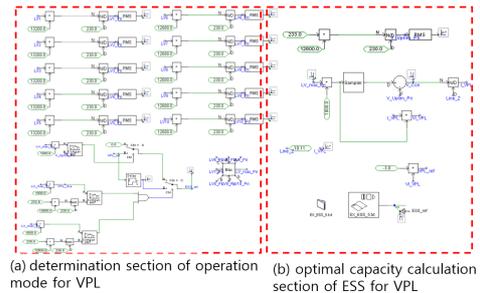
이를 비례적분하여 목표로 하는 dq 축의 기준전류를 산정할 수 있다.



[그림 4] VPL용 ESS 모델링

#### 3.3 VPL용 플랫폼 모델링

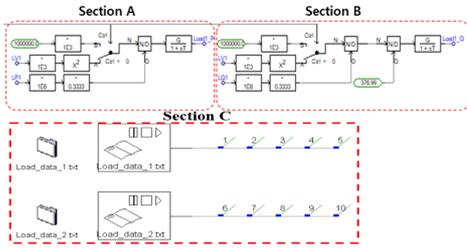
VPL용 플랫폼은 ESS 동작모드 결정부와 최적용량 산정부로 구성되는데, 이를 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 4(a)는 ESS 동작모드 결정부로, VPL 플랫폼을 통해 배전계통 구간별로 수집된 수용가의 전압이 충전 및 방전 동작전압 범위를 벗어나면, ESS를 충전 또는 방전시키는 모델링을 나타낸 것이다. 또한, 그림 5(b)는 VPL용 ESS 최적용량 산정부를 나타내는데, 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키기 위한 ESS의 최적용량을 산정하는 모델링을 나타낸 것이다.



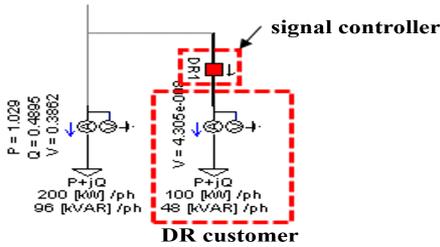
[그림 5] VPL 플랫폼 모델링

#### 3.4 수용가 부하부 모델링

수용가 부하는 정전력 부하로 상정하여, 그림 6과 같이 나타낸다. 여기서, Section A는 유효전력, Section B는 무효전력을 나타내고, Section C는 일부하 곡선으로 제주도의 대표적인 농업용 부하패턴을 나타낸다. 한편, DR 수용가는 PSCAD/EMTDC 라이브러리의 3상 부하와 신호 제어기를 사용하여 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DR 수용가는 피크부하 이거나 DR에 참여하는 시간 동안에 VPL의 제어 신호에 의해 협조 운용을 수행한다.



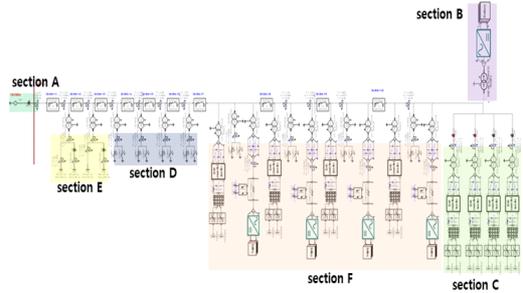
[그림 6] 수용가 부하부 모델링



[그림 7] DR 수용가 부하 모델링

### 3.7 전체 시스템 모델링

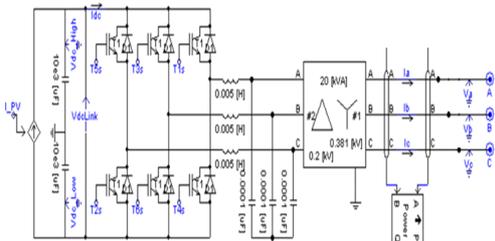
상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, Section A는 배전용 변전소부, Section B는 VPL부, Section C는 태양광전원부, Section D는 DR 수용가, Section E는 에너지 프로슈머, Section F는 일반 수용가를 나타낸다.



[그림 9] 전체 시스템 모델링

### 3.5 태양광전원부 모델링

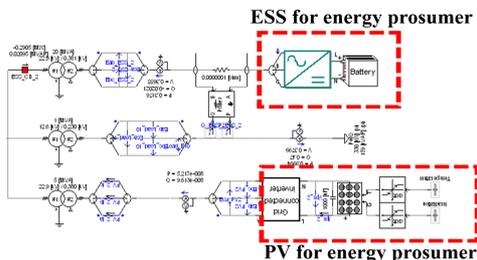
태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용하여 전류제어 알고리즘을 모델링하면 그림 8과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 8] 태양광전원용 인버터 모델링

### 3.6 에너지 프로슈머부 모델링

전력의 생산과 소비를 동시에 수행하는 에너지 프로슈머는 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 에너지 프로슈머는 수용가 부하측에 연계된 태양광전원과 ESS로 구성되며, VPL의 제어 신호에 의하여 에너지 프로슈머의 ESS를 충·방전 시킨다.



[그림 8] 에너지 프로슈머 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용특성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 10개 구간으로 구성하고, 1번~6번 구간의 선종은 ACSR-160[mm], 7번~10번 구간의 선종은 ACSR-95[mm]로 상정한다. 또한, 주상변압기 탭은 수용가 1~5번 구간과 6~10번 구간에 대하여, 각각 13,200[V], 12,600[V]를 적용한다.

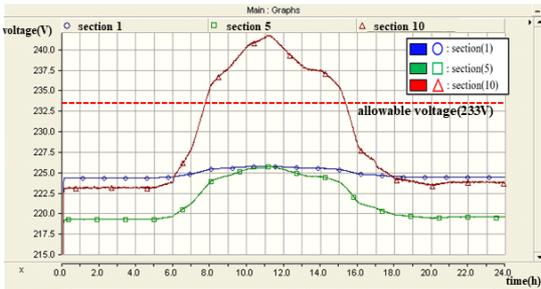
<표 1> 시뮬레이션 조건

section	line types	line length	line impedance [Ω/km]		tap ratio [V]
			R	X	
1	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
2	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
3	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
4	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
5	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
6	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	12,600
7	ACSR95SQ	2km	0.4	0.48	12,600
8	ACSR95SQ	2km	0.4	0.48	12,600
9	ACSR95SQ	2km	0.4	0.48	12,600
10	ACSR95SQ	2km	0.4	0.48	12,600

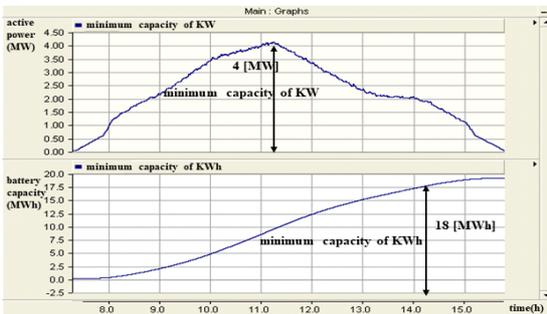
### 4.2 수용가 과전압시 VPL의 운용특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 말단 수용가(10번 구간)의 전압은 상향된 조정된 주상변압기 탭과 배전선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류에 의하여 8시부터 15시까지 규정전압 범위를 벗어나고, 최대 241[V]의 과전압이 발생함을 알 수 있다. 이러한 수용가의 과전압 현상을 해결하기 위한 VPL용 ESS의 kW/kWh

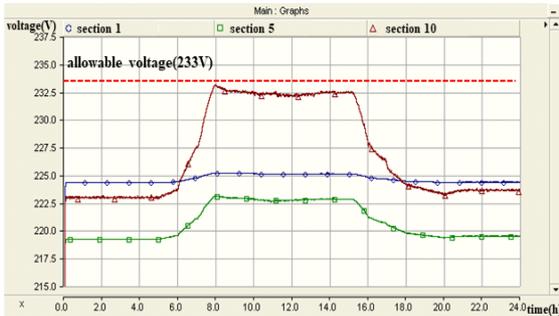
최소도입용량은 그림 11과 같이 산정된다. 여기서, VPL용 ESS의 최소 kW 도입용량은 전체 시간대에 대하여, ESS 출력의 최댓값인 4[MW]로 산정되고, 최소 kWh 도입용량은 전체 시간대에 대하여 ESS의 출력을 적산하여 약 18[MWh]로 산정된다. 또한, 그림 12는 VPL 운용에 따른 수용가 전압의 특성을 나타내는데, VPL용 ESS의 충전동작에 의하여 8시~15시 사이의 말단 수용가(10번 구간) 전압을 규정전압 범위 이내로 유지 시켜, 과전압 현상을 해소 시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 10] 태양광역조류에 의한 수용가 과전압



[그림 11] VPL의 kW/kWh 최소 도입용량

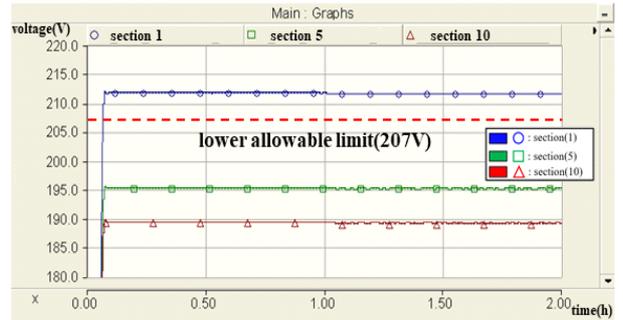


[그림 12] 과전압시 VPL의 운용특성

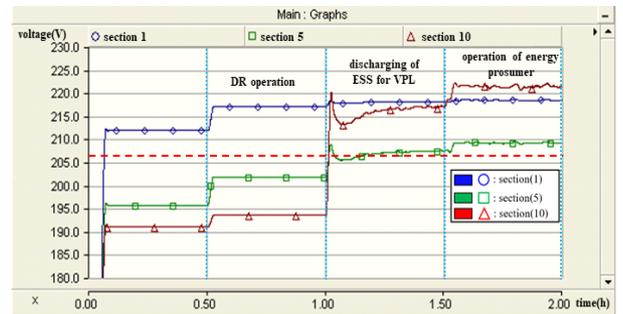
#### 4.3 수용가 저전압시 VPL의 운용특성

수용가 저전압 현상시 수용가 전압 특성을 나타내면 그림 13과 같다. 여기서, 피크 부하시 16[MW]가 배전선로에 흐를 경우, 5번 구간의 수용가와 10번 구간의 수용가의 전압은 각각 195[V], 189[V]로 산정되어, 저전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 14는 수용가 저전압 시 배전선로에 연계된 수용가의 전압 특성을 나타내는데, 수용가 DR에 의해 5번

구간 수용가와 10번 구간 수용가의 전압은 각각 201[V], 193[V]로 증가하고, VPL용 ESS 방전동작에 의하여 각각 208[V], 219[V], 에너지 프로슈머 방전동작에 의하여 각각 209[V], 221[V]로 산정되어 저전압 현상이 해결됨을 알 수 있다.



[그림 13] 피크부하시 수용가 전압 특성



[그림 14] 저전압시 VPL 운용특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 VPL에 의한 신재생에너지 수용성을 증가시키기 위하여, VPL에 대한 구성을 제시하고 VPL의 최적용량 산정방안을 제안한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소, 배전선로, 태양광전원, 부하, VPL로 구성된 신재생에너지 수용성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, VPL의 운용특성을 분석한 결과, 태양광전원 역조류에 의해 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 과전압이 발생하지만 VPL를 제어하여 수용가의 과전압을 해소할 수 있고 추가적인 선로의 증설 및 전력설비 건설 시기를 늦출 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-120)의 지원을 받아 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### [참고문헌]

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 10th demand supply program," 2023