

# 신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 최적용량 산정방안에 관한 연구

최성문<sup>1</sup>, 김지명<sup>1</sup>, 김윤호<sup>1</sup>, 유현상<sup>1</sup>, 유경상<sup>2</sup>, 노대석<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국기술교육대학교, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원

## Estimation method of Optimal Capacity for VPL to improve Power curtailment of Renewable energy sources

Sung-Moon Choi<sup>1</sup>, Ji-Myung Kim<sup>1</sup>, Yun-Ho Kim<sup>1</sup>,  
Hyun-Sang You<sup>1</sup>, Kyung-Sang Ryu<sup>2</sup>, Dae-Seok Rho<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Korea University of Technology and Education  
<sup>2</sup>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·배전계를 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, VPL용 ESS를 경제적으로 도입하기 위한 VPL용 ESS의 최적용량 산정방안을 제안하고, 이를 기반으로 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 적정하게 유지시킬 수 있어, 전력설비 인프라 증설없이 경제적으로 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

**Abstract** The installation of renewable energy sources is rapidly being increased according to the basic roadmap for national greenhouse gas reduction by 2030 and the 10th Basic Plan for Long-Term Electricity. However, power curtailment of renewable energy sources frequently has occurred due to the imbalance between the power supply and the demand. To solve these problems, an investment in power facility infrastructure is required, which has enormous cost and a long period of construction. Therefore, this paper presents the operation characteristics of a VPL to improve the power curtailment of renewable energy sources and avoid investment in the power system infrastructure. We propose a method to calculate the optimal capacity of ESS for a VPL. An estimation method of optimal capacity is the minimum capacities of ESS (kW and kWh) are estimated based on the active power required to maintain voltages within the allowable limits for customers. The modeling of a VPL-connected distribution system was performed, which is composed of distribution substations, a VPL, a PV system, customer loads, and an energy prosumer using PSCAD/EMTDC S/W. The simulation results confirmed that the customer voltages are maintained within the allowable voltage limit according to the operation characteristics of a VPL. Therefore, power curtailment of renewable energy sources can be improved economically without investment in power facility infrastructure.

**Keywords** : VPL, ESS, VPL Platform, Power Curtailment, Estimation Method of Optimal Capacity

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 실행 융합연구사업(No.CPS22131-120)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터).

\*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received September 18, 2023

Revised October 12, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

## 1. 서론

2050 탄소중립 선언과 제10차 전력수급기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가되고 있지만, 전력 공급과 수요의 불균형에 의해 신재생에너지의 출력을 제한시키고 있는 사례가 다수 발생하고 있다 [1-3]. 특히, 제주도의 경우 carbon-free 정책에 의해 신재생에너지 점유율이 전력공급 설비용량의 40%까지 증가하여, 출력제한 사례가 2022년 상반기 동안 총 80건이 보고되고 있어, 경제적으로 막대한 손실이 발생하고 있는 실정이다[4,5]. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되어, 이를 대응할 수 있는 연구의 필요성이 요구되고 있다[6-10].

따라서, 본 논문에서는 전력설비 인프라를 증설하지 않고 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치 및 운영하여, 송-배전계를 관리하는 VPL (virtual power line) 운용기술을 제시한다. 여기서, VPL은 VPL 플랫폼과 VPL용 ESS(energy storage system)로 구성되는데, VPL 플랫폼은 배전계통 운용 및 계통 유연자원 정보를 수집하고 VPL용 ESS를 제어하며, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충-방전 동작을 수행한다. 또한, 본 논문에서는 VPL용 ESS를 경제적으로 도입하기 위한 VPL용 ESS의 최적용량 산정방안을 제안하고, 이를 기반으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소부, VPL부, 태양광전원부, 수용가 부하부, 에너지 프로슈머부, 등으로 구성된 VPL 연계형 배전계통 모델링을 수행한다.

이를 바탕으로, 시뮬레이션을 수행한 결과, 태양광 역조류에 의하여 수용가에 과전압이 발생할 경우, VPL은 배전계통과 태양광전원의 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS와 에너지 프로슈머용 ESS를 충전시키고, DR 수용가에게 (+)DR을 요청하여, 수용가의 전압을 적정하게 유지시킨다. 또한, 배전계통 말단에 연계된 수용가에 피크 부하시 선로 임피던스에 의한 전압강하로 인하여 저전압 현상이 발생할 경우, VPL은 VPL용 ESS와 에너지 프로슈머용 ESS를 방전시키고, DR 수용가에게 (-)DR을 요청하여, 수용가 전압을 적정하게 유지시킬 수 있다.

따라서, VPL은 전력설비 인프라에 투자하지 않고 경제적으로 배전선로의 공급 허용용량과 수용가의 전압문제를 해결하여, 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

## 2. 신재생에너지의 출력제한 개선을 위한

### VPL의 운용특성

신재생에너지의 용량이 급속도로 증가함에 따라 연계된 배전선로의 공급 허용용량(10MW)을 초과하거나 수용가의 전압이 규정전압 범위(207V~233V)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 Fig. 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 운영하여, 송-배전계를 관리하는 가상적인 전력선로 운용기술이다.

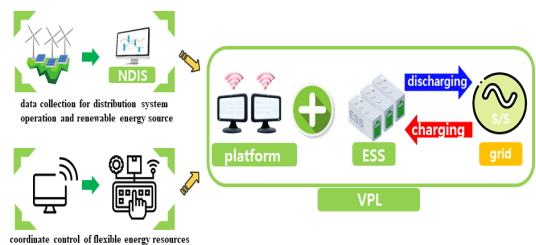


Fig. 1. Configuration of VPL

또한, VPL이 연계된 배전계통은 Fig. 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.

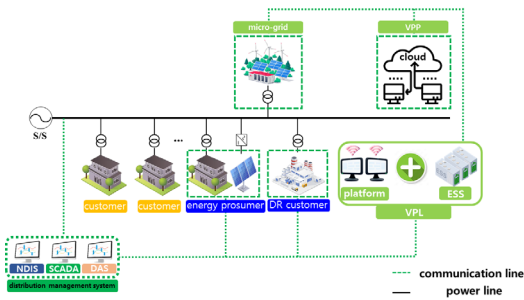


Fig. 2. Concept of VPL-connected distribution system

한편, 수용가 전압이 규정전압 범위를 벗어난 경우, 이를 해결하기 위한 VPL의 운용방안을 나타내면 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 여기서, Fig. 2(a)와 같이 배전선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류에 의하여 수용가의 과전압 현상이 발생할 경우, VPL은 배전계통과 태양광전원의 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS와 계통에 연계된 마이크로그리드의 ESS를 충전시키고, DR 수용가에게 (+)DR을 요청하여 Fig. 2(b)와 같이 수용가의 전압을 적정하게 유지시킬 수 있다. 또한, Fig. 3(a)와 같이 피크부하시 선로 임피던스에 의한 전압강하로 인하여 배전선로 말단에 연계된 수용가에 저전압 현상이 발생할 경우, VPL은 VPL용 ESS와 계통에 연계된 마이크로그리드 및 에너지 프로슈머의 ESS를 방전시키거나, DR 수용가에게 (-)DR을 요청하여 Fig. 3(b)와 같이 수용가 전압을 적정하게 유지시킬 수 있다.

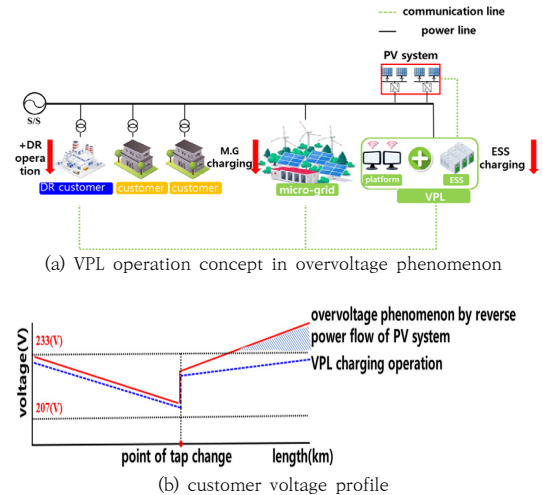
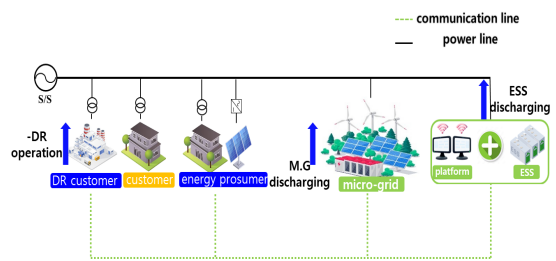


Fig. 3. Operation characteristics of VPL-connected distribution system in case of overvoltage phenomenon



(a) VPL operation concept in undervoltage phenomenon

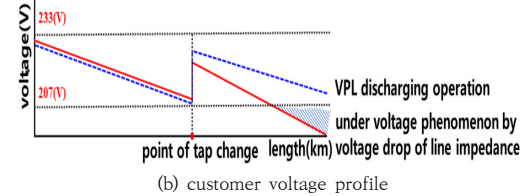


Fig. 4. Operation characteristics of VPL-connected distribution system in case of undervoltage phenomenon

### 3. VPL용 ESS의 최적용량 산정방안

#### 3.1 VPL용 ESS의 동작모드 결정

배전계통에 연계된 신재생에너지의 출력제한을 개선하는 VPL용 ESS의 최적용량은 수용가 전압을 규정전압 이내로 유지시키는 ESS의 충전량 및 방전량에 의해 결정된다. 먼저, 주상변압기 2차측의 직하 및 말단 수용가전압은 주상변압기 1차측 전압을 변압기 탭에 의해 저압측으로 환산한 값, 수용가 인입점까지의 전압강하분 및 수용가 부하율을 고려하여 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같이 산정된다.

$$V_f(n, t) = V_{pri}(n, t) \times \frac{230}{V_{tap}(n)} - \Delta V_d \times f_c(t) \quad (1)$$

$$V_l(n, t) = V_{pri}(n, t) \times \frac{230}{V_{tap}(n)} - \Delta V_e \times f_c(t) \quad (2)$$

Where,  $n$  : section of primary feeder,  $t$  : time interval,  $V_f(n, t)$  : voltage of (n)th point in first customer[V],  $V_l(n, t)$  : voltage of (n)th point in last customer,  $V_{pri}(n, t)$  : primary voltage of (n)th point in pole transformer[V],  $V_{tap}(n)$  : tap ratio of primary feeder in pole transformer[V],  $\Delta V_d$  : drop voltage of first customer[V],  $\Delta V_e$  : drop voltage of last customer[V],  $f_c(t)$  : load factor

또한, 전체 구간에서 각 시간대 규정전압(220±13V) 범위를 벗어난 수용가 전압을 고압측으로 환산하면 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{\max}(t) = (V_{1\max}(t) + \Delta V_d \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (3)$$

$$V_{\min}(t) = (V_{2\min}(t) + \Delta V_e \times f_e(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (4)$$

Where,  $V_{\max}(t)$  : the converted value of  $V_{1\max}(t)$  to primary voltage[V],  $V_{\min}(t)$  : the converted value of  $V_{2\min}(t)$  to primary voltage[V],  $V_{1\max}(t)$ : the maximum value among the first customer voltages that violate allowable voltage range[V],  $V_{2\min}(t)$ : the minimum value among the last customer voltages that violate allowable voltage range[V]

한편, VPL용 ESS의 충전 및 방전을 결정하는 충전 동작전압 및 방전 동작전압은 Eq. (5)와 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있으며, ESS의 충전 및 방전 동작 모드는 Eq. (7)의 조건에 따라 결정된다. 즉, 직하 수용가전압을 고압측으로 환산한 값의 최대값이 ESS의 충전 동작전압보다 크면 VPL는 충전동작( $\delta(t) = -1$ )을 수행하고, 말단 수용가전압을 고압측으로 환산한 값의 최소값이 ESS의 방전 동작전압보다 작을 경우에는 방전동작( $\delta(t) = 1$ )을 수행하며 그 외의 경우에는 ESS를 충방전하지 않는다.

$$V_{cha}(t) = \max \left[ \left\{ V_{ulimit} + \Delta V_d \times f_c(t) \right\} \times \frac{V_{tap}(n)}{230} \right] \quad (5)$$

$$V_{dis}(t) = \min \left[ \left\{ V_{llimit} + \Delta V_e \times f_e(t) \right\} \times \frac{V_{tap}(n)}{230} \right] \quad (6)$$

Where,  $V_{cha}(t)$  : the charging voltage of ESS for VPL[V],  $V_{dis}(t)$  : the discharging voltage of ESS for VPL[V],  $V_{ulimit}$  : allowable upper limit of customer voltage[V],  $V_{llimit}$  : allowable lower limit of customer voltage[V]

$$\delta(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } V_{\max}(t) > V_{cha}(t) \\ 1 & \text{if } V_{\min}(t) < V_{dis}(t) \end{cases} \quad (7)$$

Where,  $\delta(t)$ : ESS operation mode

### 3.2 VPL용 ESS의 최적용량 산정

VPL용 ESS의 충전 및 방전 동작으로 보상할 수 있는 전압 제어값은 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, Eq. (9)는 VPL용 ESS의 충전 및 방전동작에 의하여 공급 또는 소비되는 전류값으로, Eq. (8)의 전압 제어값을 송출 단에서 ESS의 연계구간까지의 선로 임피던스로 나눈 값이다.

$$V_{con}(t) = \begin{cases} V_{\max}(t) - V_{cha}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{\min}(t) - V_{dis}(t)|, & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

Where,  $V_{con}(t)$  : reference voltage of VPL[V]

$$I_{VPL}(t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{n=1}^{n_a} (Z(n) \cdot L(n))} \quad (9)$$

Where,  $I_{VPL}(t)$  : current of ESS for VPL [A],  $Z(n)$  : line impedance[Ω/km],  $L(n)$  : length of nth point in distribution line [km],  $n_a$  : nth installation point of VPL

또한, VPL용 ESS의 충전 및 방전동작에 의해 공급 또는 소비되는 유효전력은 허용전압 범위를 벗어난 최대 및 최소 수용가전압을 고압측으로 환산한 값과 VPL의 전류값을 곱하여, Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = \begin{cases} 3 \cdot V_{\max}(t) \cdot I_{VPL}(t), & \text{if } \delta(t) = -1 \\ 3 \cdot V_{\min}(t) \cdot I_{VPL}(t), & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

Where,  $P(t)$  : active power of VPL[W]

따라서, VPL의 최소 kW 도입용량( $P_{VPL}$ )은 VPL용 ESS의 시간대별 유효전력의 크기 중에서 가장 큰 값을 고려하여, Eq. (11)과 같이 산정할 수 있으며, VPL용 ESS의 최소 kWh 도입용량( $W_{VPL}$ )은 전체 시간대에 대한 VPL용 ESS의 유효전력을 적산하여, Eq. (12)와 같이 산정할 수 있다.

$$P_{VPL} = \max [P(t)] \quad (11)$$

$$W_{VPL} = \sum_{t=1}^{t_{max}} P(t) \quad (12)$$

Where,  $P_{VPL}$  : minimum kW capacity of ESS for VPL[kW],  $W_{VPL}$  : minimum kWh capacity of ESS for VPL[kWh],  $t_{max}$  : total time interval

## 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 VPL 출력제한 개선평가 모델링

### 4.1 배전용 변전소부 모델링

배전용 변전소는 Fig. 5와 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.

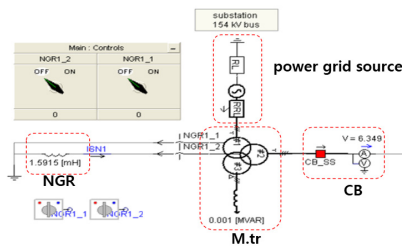


Fig. 5. Modeling of distribution section

### 4.2 VPL용 ESS부 모델링

VPL용 ESS부는 Fig. 6과 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 dq축의 기준전류를 산정할 수 있다.

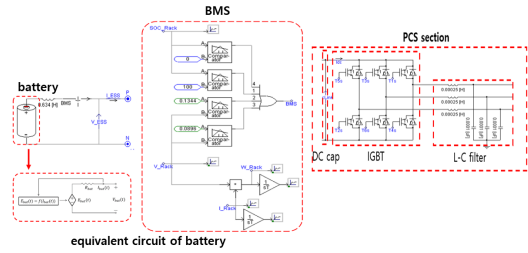
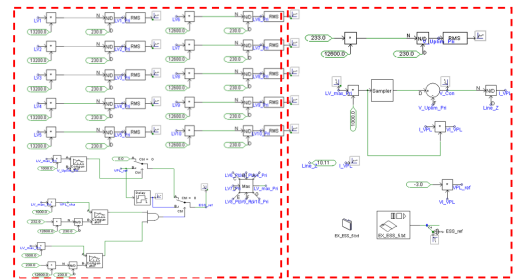


Fig. 6. Modeling of ESS section for VPL

### 4.3 VPL용 플랫폼 모델링

VPL용 플랫폼은 ESS 동작모드 결정부와 최적용량 산정부로 구성되는데, 이를 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서, Fig. 7(a)는 ESS 동작모드 결정부로, VPL 플랫폼을 통해 배전계통 구간별로 수집된 수용가의 전압이 3.1%에서 제시된 Eq. (5), Eq. (6)의 충전 및 방전 동작전압 범위를 벗어나면, Eq. (7)에 따라 ESS를 충전 또는 방전시키는 모델링을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 7(b)는 VPL용 ESS 최적용량 산정부를 나타내는데, 3.2%의 Eq. (8)~ Eq. (12)를 바탕으로 수용가의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키기 위한 ESS의 최적용량을 산정하는 모델링을 나타낸 것이다.



(a) determination section of operation mode for VPL (b) optimal capacity calculation section of ESS for VPL

Fig. 7. Modeling of VPL platform

### 4.4 태양광전원부 모델링

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

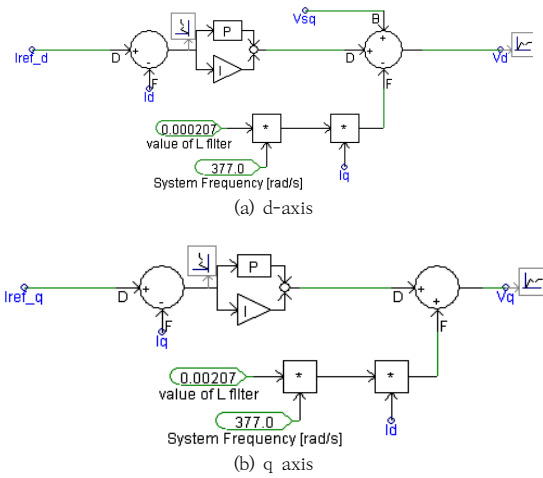


Fig. 8. Modeling of current control

또한, 상기의 모델링에서 구한  $V_d$ 와  $V_q$ 는 d-q 좌표 변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 한편, Fig. 10은 계통연계형 인버터의 모델링을 나타내는데, IGBT는 PWM으로부터 나온 6개의 스위칭 신호를 바탕으로 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC 출력으로 변환시킨다.

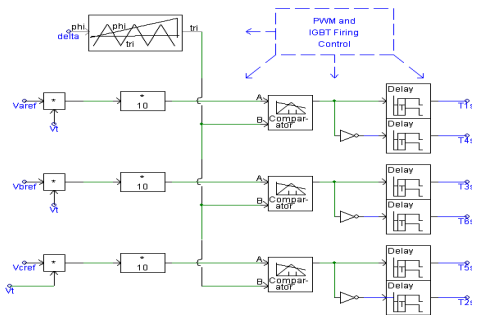


Fig. 9. Modeling of PWM for IGBT

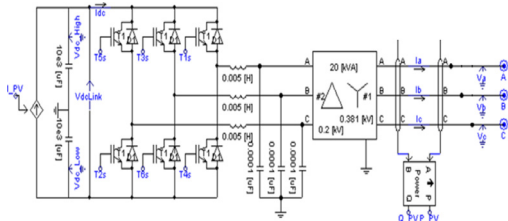


Fig. 10. Modeling of grid-connected PV inverter

#### 4.5 수용가 부하부 모델링

수용가 부하는 정전력 부하로 상정하여, Fig. 11과 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 제어를 사용하여 Fig. 12과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DR 수용가는 피크부하 이거나 DR에 참여하는 시간 동안에 VPL의 제어 신호에 의해 협조 운용을 수행한다.

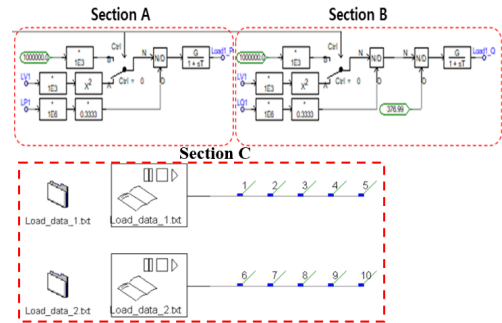


Fig. 11. Modeling of customer load

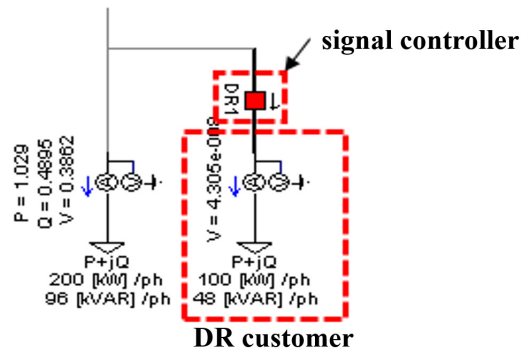


Fig. 12. Modeling of DR customer load

#### 4.6 에너지 프로슈머부 모델링

전력의 생산과 소비를 동시에 수행하는 에너지 프로슈머는 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 에너지 프로슈머는 수용가 부하측에 연계된 태양광전원과 ESS로 구성되며, VPL의 제어 신호에 의하여 에너지 프로슈머의 ESS를 충·방전 시킨다.



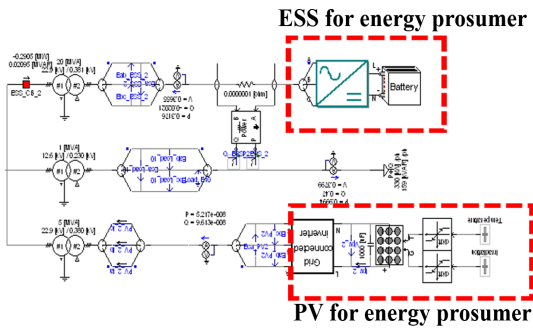


Fig. 13. Modeling of energy prosumer

### 4.7 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 Fig. 14와 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.

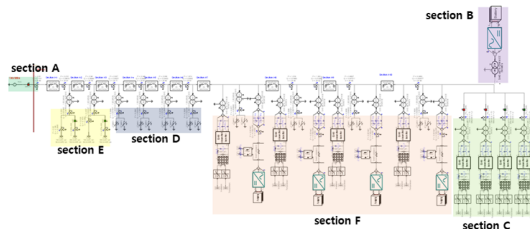


Fig. 14. Modeling of the entire system

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

신재생에너지 출력제한 개선을 위한 VPL의 운용특성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 Table 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 10개 구간으로 구성하고, 1번~6번 구간의 선종은 ACSR-160[mm<sup>2</sup>], 7번~10번 구간의 선종은 ACSR-95[mm<sup>2</sup>]로 상정한다. 또한, 주상변압기 탭은 수용가 1~5번 구간과 6~10번 구간에 대하여, 각각 13,200[V], 12,600[V]를 적용한다. 또한, 저압측의 전압강하 분담률은 주상변압기 전압강하분(1%), 인입선 전압강하분(1%), 저압 배전선로 전압강하분(2%)으로 상정한다. 한편, 일부하 곡선 및 태양광전원 출력패턴은 제주도를 대상으로, 10[MW]의 피크 수요를 가지는 농업용 부하곡선과 7[MW] 피크

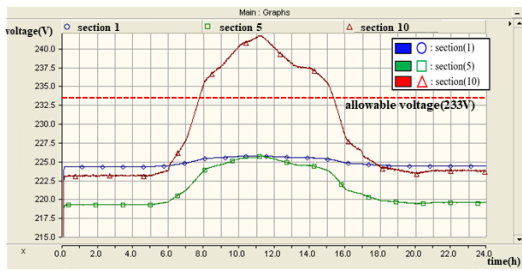
출력의 태양광전원 출력 패턴을 상정한다. 그리고, DR 수용가는 피크부하시 1[MW] 용량으로 DR에 참여하고, 에너지 프로슈머의 ESS 용량은 250[kW]/1[MWh]로 상정한다.

Table 1. Simulation conditions

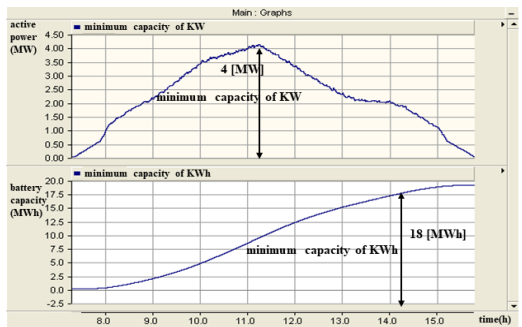
section	line types	line length	line impedance [Ω/km]		tap ratio [V]
			R	X	
1	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
2	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
3	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
4	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
5	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	13,200
6	ACSR160SQ	2km	0.18	0.39	12,600
7	ACSR95SQ	2km	0.4	0.48	12,600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

### 5.2 수용가 과전압시 VPL의 운용 특성

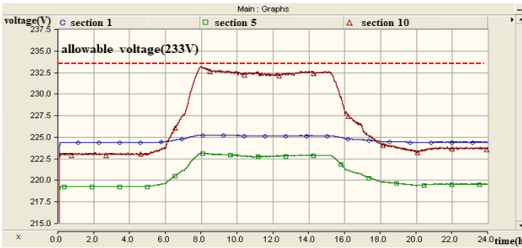
상기의 5.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 VPL의 운용특성을 나타내면 그림 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig. 15(a)와 같이 말단 수용가(10번 구간)의 전압은 상향된 조정된 주상변압기 탭과 배전선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류에 의하여 8시부터 15시까지 규정전압 범위를 벗어났고, 최대 241[V]의 과전압이 발생함을 알 수 있다. 이러한 수용가의 과전압 현상을 해결하기 위한 VPL용 ESS의 kW/kWh 최소도입용량은 3장에서 제시한 Eq. (8)~ Eq. (10)에 따라 Fig. 15(b)와 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, Fig. 15(c)는 VPL 운용에 따른 수용가 전압의 특성을 나타내는데, VPL용 ESS의 충전동작에 의하여 8시~15시 사이의 말단 수용가(10번 구간) 전압을 규정전압 범위 이내로 유지시켜, 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) overvoltage of customer with reverse power flow in PV system



(b) optimal kW and kWh capacities of ESS for VPL

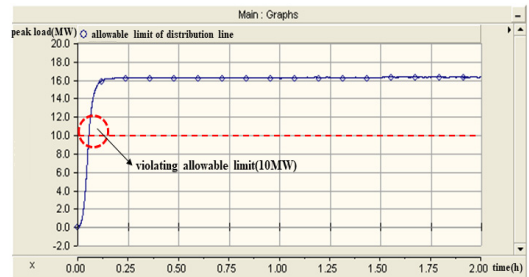


(c) characteristics of customer voltage according to VPL operation

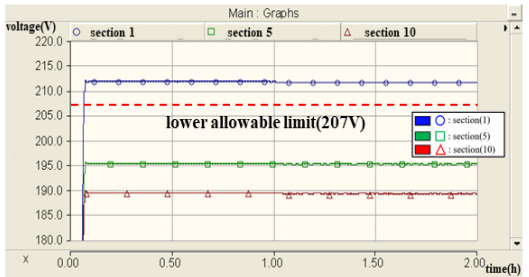
Fig. 15. VPL operation characteristics in case of overvoltage phenomenon

### 5.3 수용가 저전압시 VPL의 운영특성

상기의 5.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 저전압 현상 시 배전선로 공급 허용용량과 수용가 전압 특성을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16(a)는 16[MW]가 배전선로에 흐르는 것을 상정한 것으로, 공급 허용용량(10[MW])을 초과하여 선로 증설이 요구됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 16(b)는 피크부하시 배전선로에 연계된 수용가(1, 5, 10)의 전압을 나타내는데, 5번 구간의 수용가와 10번 구간의 수용가의 전압은 각각 195[V], 189[V]로 산정되어, 저전압 현상이 발생함을 알 수 있다.



(a) allowable limit characteristics of distribution line in peak load

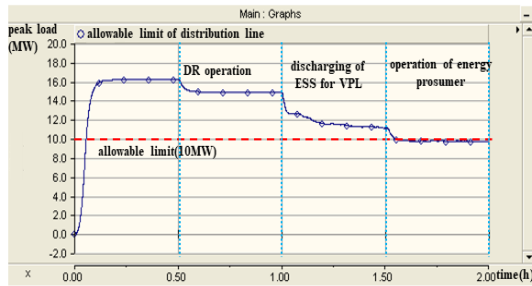


(b) customer voltage characteristics in peak load

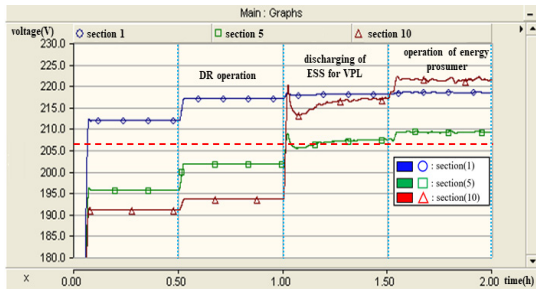
Fig. 16. Capacity and customer voltage characteristics of distribution line under peak load

한편, 수용가 저전압에 따른 VPL 운영특성을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, Fig. 17(a)는 배전선로의 공급 허용용량을 나타내는데, 배전선로에 16[MW]의 부하 전력이 흐르는 경우, 수용가의 DR에 의해 15[MW]로 감소되며, VPL용 ESS(4MW/19MWh)의 방전동작에 의하여 11[MW], 에너지 프로슈머의 동작에 의해 10[MW]로 감소됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 17(b)는 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. 따라서, 최적용량으로 산정된 VPL은 전력설비 인프라를 증설하지 않고 배전선로의 공급허용용량과 수용가의 전압문제를 해결하여, 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.





(a) allowable limit characteristics of distribution line



(b) customer voltage profile

Fig. 17. VPL Operation characteristics in peak load

## 6. 결론

본 논문에서는 송·배전설비를 추가로 증설하거나 신설하지 않고, 신재생에너지의 연계지점이나 수용가 말단, 등에 ESS를 설치하여 신재생에너지의 출력제한을 개선시킬 수 있는 가상적인 전력선로 운용기술인 VPL을 제시하고, VPL용 ESS의 최적용량 산정방안을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VPL이 연계된 배전계통의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 VPL에 의한 출력제한 개선효과를 평가한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 수용가의 전압 문제가 발생하는 경우, 수용가 전압을 허용전압 범위 이내로 유지시킬 수 있는 각 시간대별 ESS의 유효전력을 근거로, VPL용 ESS의 최소 도입용량 산정방안을 제안하였다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소부, VPL부, 태양광원부, 수용가 부하부, 에너지 프로슈머부, 등으로 구성된 VPL이 연계된 배전계통의 모델링을 수행하고, VPL에 의한 신재생에너지의 출력제한 개선효과를 평가하였다.

- (2) 태양광 역조류에 의하여 수용가에 과전압이 발생할 경우, 이를 해결하기 위한 VPL용 ESS의 kW/kWh 최소도입용량은 각각 4[MW], 18[MWh]로 산정되었다. 이를 바탕으로 VPL용 ESS를 배전계통에 도입하게 되면, 말단 수용가 전압은 허용한계치 이내인 232[V]로 산정되어, 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 피크부하시 배전선로에 16[MW]의 부하전력이 흐르는 경우, VPL이 DR 수용가와 협조하여 부하전력을 15[MW]로 감소시킬 수 있으며, VPL용 ESS (4MW/19MWh)의 방전동작에 의하여 11[MW], 에너지 프로슈머에 의하여 10[MW]로 저감시킬 수 있어, VPL의 운용에 의하여 배전선로 공급허용용량 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 16[MW]의 피크부하시 수용가의 전압은 선로 전압강하에 의하여 5번 구간의 수용가와 10번 구간의 수용가의 전압이 각각 195[V], 189[V]로 산정되어, 저전압 현상이 발생하지만, VPL이 DR 수용가와 협조하여 5번 구간 수용가와 10번 구간 수용가의 전압을 각각 204[V], 195[V]로 증가시키고, VPL용 ESS 방전동작에 의하여 각각 210[V], 204[V], 에너지 프로슈머에 의하여 각각 212[V], 208[V]로 증가시켜, 저전압 현상을 해결할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] H. Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple\_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28, 2019.8.
- [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. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.4.031>
- [3] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, ESS utilization and related PCS technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 12-18, 2017.1.
- [4] W. Y. Jeon, J. Y Kim, S. W. Kim, "Establishing an Efficient Low-Carbon Power System by Reducing Curtailment of Renewable Energy using ESS - The Case of Jeju Island in 2025", Journal of Climate Change Research Vol.13, No.1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.1.001>

- [5] W. C. Lee, Y. H. Kim, S. H. Kim, "Minimization of Renewable Energy Output Limits and Reduction Methods", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.33, No.12, pp.41-48, 2019.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2019.33.12.041>
- [6] J. B. Jung, M. G. Lim, J. Y. Kim, D. S. Rho. "Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.22, No.8, pp.663-672, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2021.22.8.663>
- [7] I. S. Nam, B. C. Yoo, J. H. Kim, S. M. Jung, "A Study about the Curtailment for Wind Turbines Considering Power Sensitivity of Distribution System" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.71, No.3 pp. 495-502, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.3.495>
- [8] H.M. Hwang, J.B. Park, S.H. Lee, J.H. Roh, Y.G. Park, "Load Forecasting and ESS Scheduling Considering the Load Pattern of Building", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol 65, No. 9, pp. 1486-1492, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.9.14>
- [9] H.Y. Park, J.K. Lee, E.K Gong, J.G Shon, "A Study of Independent Control and Equalizing Operation Algorithms for Battery-rack in Energy Storage System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 68, No 1, pp. 11-16, 2019.  
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEEP.2019.68.1.011>
- [10] S.Y. Lee, J.M. Kim, B.G. Han, K.Y. Kim, D.S. Rho, "An Operation Strategy of SVR and ESS to Enhance Hosting Capacity of PV Systems in Distribution System", Vol. 71, No 11, pp. 1552-1563, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.11.1552>

최 성 문(Sung-Moon Choi)

[정회원]



- 2020년 2월 : 호원대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

김 윤 호(Yun-Ho Kim)

[준회원]



- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조, 전력품질

유 현 상(Min-Haeng Lee)

[준회원]



- 2019년 8월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 7월 ~ 2022년 7월 : 한국산업기술시험원 연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

유 경 상(Kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 동대학원 전기전자통신공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 제주대학교 전기공학과 박사 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/연구원 재직중

<관심분야>

배터리 운용관리시스템, 분산전원 연계기술, EMS

---

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석