

신재생에너지의 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 장치의 모델링 및 운용특성에 관한 연구

노성은*, 최성문*, 유현상*, 이수용*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:eunnny0513@koreatech.ac.kr

Modeling and Operation Characteristics of 30kW VPL Device to Improve Hosting Capacity in Renewable Energy Sources

Seong-Eun Rho*, Sung-Moon Choi*, Hyun-Sang You*

Soo-Yong Lee*, Dae-Seok Rho*

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

요약

최근, 배전선로에 연계된 신재생에너지의 용량이 급속도로 증가하여, 수용가의 전압이 규정전압 범위(207V~233V)를 벗어날 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설 및 신설이 요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되므로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 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) 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. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL부 등으로 구성된 30kW급 VPL 시험장치의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, VPL 장치의 운용특성을 평가한 결과, 신재생에너지의 역조류에 의하여 수용가에 과전압 및 저전압 현상이 발생하는 경우, VPL이 배전계통, 신재생에너지, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, ESS를 충·방전시켜 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 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.[1] 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 도입모델과 운용특성을 제안한다. 또한, 30kW급 VPL 시험장치를 바탕으로, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL 장치부 등으로 구성된 30kW급 VPL 장치가 연

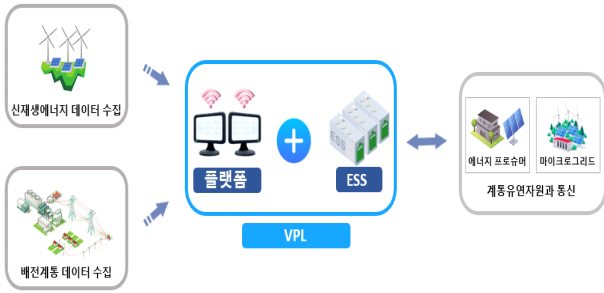
계된 배전계통의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, VPL 장치의 운용특성을 평가한 결과, 수용가의 과전압 현상이 발생하는 경우, VPL이 배전계통, 신재생에너지, 태양광전원, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, ESS를 충·방전시켜 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 태양광전원이 배전선로 말단에 연계될수록 수용가의 과전압 현상이 크게 발생하여, 더 큰 용량의 VPL 장치가 요구됨을 알 수 있다.

2. 신재생에너지의 수용성 향상을 위한 VPL 장치의 도입 모델

2.1 VPL의 운용특성

신재생에너지의 용량이 급속도로 증가함에 따라 연계된 배전선로의 공급용량(10[MVA])을 초과하거나 수용가의 전압이 규정전압 범위(207[V]~233[V])를 벗어날 가능성이 있다. 이로 인하여 배전계통에 접속된 신재생에너지의 수용성이 감소하여, 경제적으로 막대한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 전력설비 인프라의 증설이

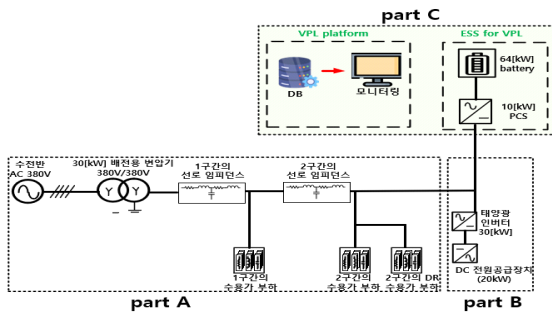
요구되지만, 막대한 건설비용과 오랜 건설기간이 소요되어, 이를 대체할 수 있는 VPL 운용기술이 주목받고 있다. 여기서, VPL은 그림 1과 같이 VPL용 플랫폼과 VPL용 ESS로 구성되는데, VPL용 플랫폼은 기존의 배전계통 운용시스템으로부터 배전계통 각 지점의 전압 및 전류, 등의 배전계통 운용정보를 실시간으로 수집하고, 신재생에너지의 출력과 계통 유연자원의 운용상황을 모니터링하며, VPL용 ESS는 배전계통 수용가에 전압 문제가 발생할 경우, VPL 플랫폼 제어 신호에 의하여 충·방전 동작을 수행한다.



[그림 1] VPL의 구성

2.2 30kW급 VPL 시험장치의 구성

신재생에너지 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 시험장치는 그림 2와 같이 모의 배전계통부, 모의 태양광전원부, VPL 부 등으로 구성된다. 먼저, 모의 배전계통부는 그림 2의 part A와 같이, AC 380[V]의 수전반, 배전용 변압기 (380[V]/380[V]), 저압 배전선로와 수용가 부하로 구성된다. 여기서, 수용가 부하는 일반 부하와 DR 부하로 분류된다. 또한, 태양광전원부는 그림 2의 part B와 같이, 20[kW]급 DC 전원공급장치, 태양광 인버터 등으로 구성된다. 한편, VPL부는 그림 2의 part C와 같이, 플랫폼과 ESS 등으로 구성되는데, 플랫폼은 2개의 저압 배전선로 구간의 전압 및 전류 등의 배전계통 운용정보를 실시간으로 수집하고, 태양광전원의 출력과 DR 부하의 운용상황을 실시간으로 감시, 제어한다. 또한, VPL용 ESS는 상기의 VPL용 플랫폼의 제어신호에 의하여 충·방전 동작을 수행하여 저압 배전선로의 전압을 적절한 범위로 유지시킨다.

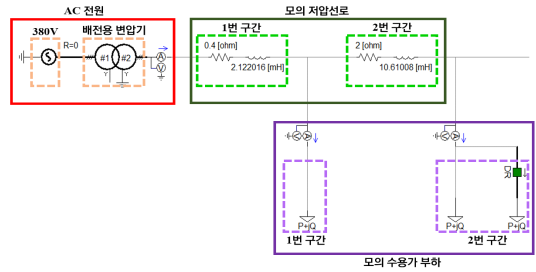


[그림 2] 30kW급 VPL 시험장치의 구성도

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 30kW급 VPL 시험장치의 모델링

3.1 모의 배전계통부

모의 배전계통부는 그림 3과 같이 AC 전원, 모의 저압선로, 모의 수용가 부하 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 저압선로는 실 계통의 저압 배전선로를 전압강하 20[%]의 lab-scale로 축약하고, 저항과 리액턴스 성분으로 구성한다. 여기서, 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 선로 임피던스에 따른 수용가 과전압 특성을 모의하기 위하여 모의 배전선로는 2개의 구간으로 구성한다. 한편, 1번 구간의 모의 수용가 부하는 일반 수용가 부하를 나타내고, 2번 구간의 일반 수용가 부하는 일반 수용가 부하와 DR 수용가 부하로 구성된다. 또한, DR 수용가 부하는 VPL 플랫폼의 제어신호에 의해 DR에 참여하는 시간 동안 협조 운용을 수행하는 것으로 상정한다.



[그림 3] 모의 배전계통부 모델링

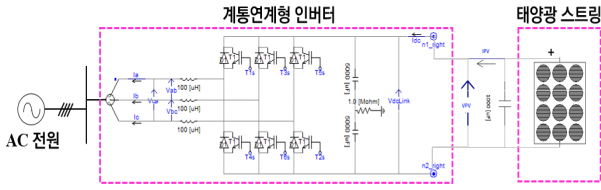
3.2 모의 태양광전원부

모의 태양광전원부는 그림 4와 같이 태양광 스트링과 계통 연계형 인버터 등으로 구성된다. 여기서, 태양광 스트링은 다수의 태양광 모듈을 1개의 스트링으로 등가화하여 나타내고, 계통연계형 인버터는 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 조정하기 위하여, 그림 5와 같이 태양광전원 전류제어기의 모델링을 수행한다. 여기서, 전류제어기의 제어 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 태양광전원부 모델링

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (7)$$

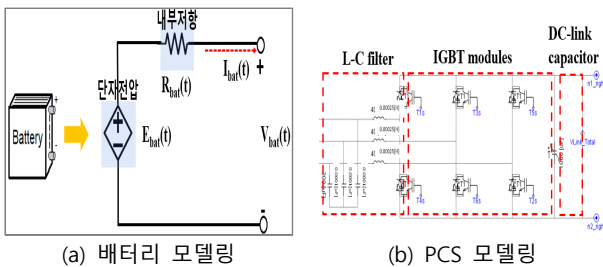
여기서, $E_{bat}(t)$: 배터리 기전력[V], E_0 : 배터리 전압상수, K : 양극화 상수, Q : 배터리 용량[Ah], A : 지수함수 크기 상수, B : 반전지수함수 시간 상수, SOC : 충전상태[%], $V_{bat}(t)$: 배터리 전압[V], R_{bat} : 배터리 내부저항[Ω], $I_{bat}(t)$: 배터리 전류[A], $I_{d,ess}^*$: ESS 출력을 위한 d축 기준전류, P_d^* : d축 유효전력 기준값, $P_d(t)$: d축 유효전력 출력값, $I_{q,ess}^*$: ESS 출력을 위한 q축 기준전류, Q_q^* : q축 무효전력 기준값, $Q_q(t)$: q축 무효전력 출력값

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, 그림 5(a)와 같이 배터리는 단자전압, 내부저항 등으로 구성되며, 다수의 배터리 모듈을 하나의 배터리팩으로 증가화하여 나타낸다. 구체적으로, 배터리의 기전력은 SOC의 역함수와 지수함수의 조합으로 나타내며, SOC는 배터리 전체 용량에서 누적된 전류의 비로 충전상태를 의미한다. 또한, 배터리 단자전압은 기전력에서 내부저항에 의한 전압강하를 뺀 값이며, 이를 수식으로 나타내면 식 (3)~식 (5)와 같다. 또한, VPL용 ESS의 PCS는 그림 5(b)와 같이 L-C 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, L-C 필터는 전력변환 시 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감시키고, 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 (6), 식 (7)에 따라 산정되며, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전된다.

[그림 5] VPL용 ESS 모델링



(a) 배터리 모델링

(b) PCS 모델링

$$E_{bat}(t) = E_0 - K \frac{1}{SOC} + A \exp(-BQ(1 - SOC)) \quad (3)$$

$$SOC = \frac{Q - \int_{t_0}^{t_1} I_{bat}(t) dt}{Q} \times 100 \quad (4)$$

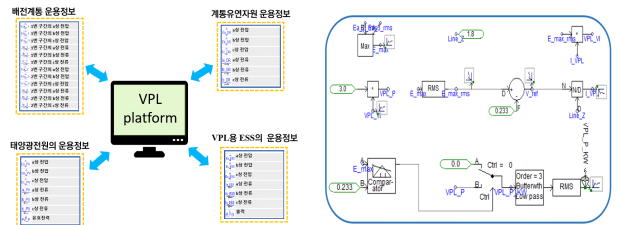
$$V_{bat}(t) = E_{bat}(t) - I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (5)$$

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (6)$$

3.3.2 VPL용 플랫폼

VPL용 플랫폼은 그림 6과 같이 모니터링 장치와 ESS 제어장치로 구성된다. 여기서, 그림 6(a)와 같이 모니터링 장치는 배전선로에 연계된 수용가의 전압과 전류, 모의 태양광전원의 출력, VPL용 ESS의 운용 등의 배전계통 운용정보와 DR 운용정보를 실시간으로 수집한다. 또한, 그림 6(b)와 같이 ESS 제어장치는 수용가의 전압이 규정전압 범위를 벗어난 경우, 모니터링 장치의 정보를 바탕으로 수용가 전압이 규정전압의 상한치보다 크면 충전 동작을 수행하고, 그 외의 경우에는 ESS를 운용하지 않는다.

[그림 6] VPL용 플랫폼 모델링

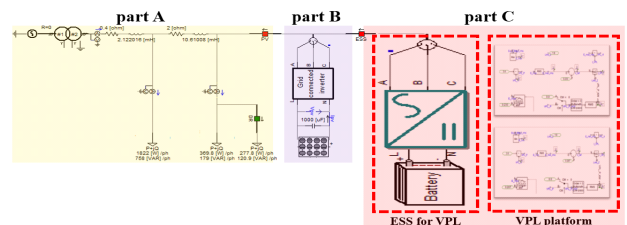


(a) 모니터링 장치 모델링

(b) ESS 제어장치 모델링

3.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 신재생에너지의 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL용 시험장치의 전체 시스템을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, part A는 모의 배전계통부, part B는 모의 태양광전원부, part C는 ESS와 플랫폼으로 구성된 VPL부를 나타낸다.



[그림 7] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

신재생에너지의 수용성 향상을 위한 30kW급 VPL 시험장치의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식이며, 모의 저압선로는 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 $0.4+j0.8[\Omega]$ 으로 설정하고, 2번 구간(공장)은 선로 말단지점을 모의하기 위하여 $1+j2[\Omega]$ 또는 $2+j4[\Omega]$ 으로 상정한다. 한편, 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.

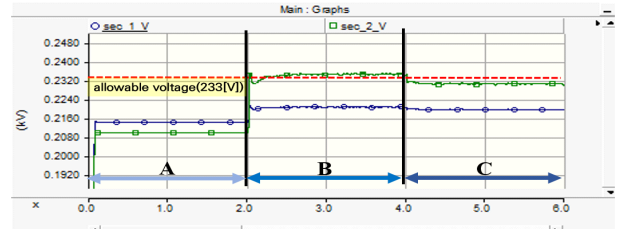
[표 1] 시뮬레이션 조건

| 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 | |

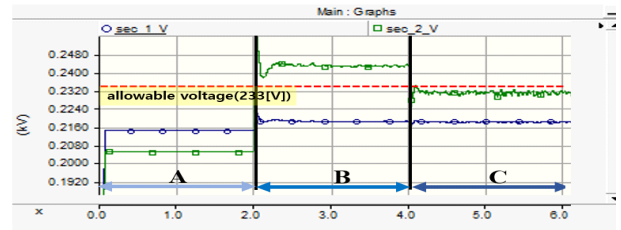
4.2 수용가 과전압 시 VPL 장치의 운용특성

상기의 4.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 수용가 과전압에 따른 30kW급 VPL 장치의 운용특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8의 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 8(a)는 1번과 2번 구간 선로 임피던스가 각각 $0.4+j0.8[\Omega]$, $1+j2[\Omega]$ 인 경우를 나타내며, A 영역과 같이 1번, 2번 구간의 수용가 전압은 각각 215[V], 209[V]로 산정된다. 한편, 그림 8(a)의 B 영역은 태양광전원의 역조류로 인하여 2번 구간 수용가 전압이 234[V]로 산정되어, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 8(a)의 C 영역에서는 본 논문에서 제안한 VPL 장치의 2[kW] 충전 동작에 의하여, 수용가의 전압이 232[V]로 유지되어, 과전압 현상을 해소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b)는 1번과 2번 구간 선로 임피던스가 각각 $0.4+j0.8[\Omega]$, $2+j4[\Omega]$ 인 경우를 나타내며, A 영역과 같이 1번, 2번 구간의 수용가 전압은 각각 215[V], 205[V]로 산정된다. 한편, 그림 8(b)의 B 영역은 태양광전원의 역조류로 인하여 2번 구간 수용가 전압이 246[V]로 산정되어, 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 8(b)의 C 영역은 본 논문에서 제안한 VPL 장치의 6[kW] 충전 동작에 의하여, 수용가의 전압이 231[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 적정한 용량으로 충전시켜 신재생에너지의 수용성을 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 $1+j2[\Omega]$ 인 경우



(b) 2번 구간의 선로 임피던스가 $2+j4[\Omega]$ 인 경우

[그림 8] 수용가 과전압시 VPL 장치의 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지의 수용성을 향상시킬 수 있는 방안 중 하나인 VPL 장치의 도입모델과 운용특성을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 모의 저압선로부, 모의 태양광전원부, VPL부, 등으로 구성된 30kW급 VPL 장치가 연계된 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 VPL의 운용특성을 평가한 결과, 수용가에 과전압 현상이 발생하는 경우, 30kW급 VPL 장치는 배전계통, 태양광전원, 계통유연자원의 운용정보를 바탕으로, VPL용 ESS를 적정한 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] 명호산, 김세호 “재생에너지 출력제한에 따른 출력량 배분 방안 연구”, 전기전자학회논문지, 제 23권 1호, pp. 173-180, 3월, 2019년