

신재생에너지 수용성 향상을 위한 VPL의 응용

유경상, 김찬수, 남양현, 김대진, 김병기
한국에너지기술연구원 전력시스템연구팀
e-mail: ksryu@kier.re.kr

Application of VPL for the hosting capacity of Renewable Energy

Kyung-Sang Ryu, Chan-Soo Kim, Yang-Hyun Nam, Dae-Jin Kim and Byungki Kim
Korea Institute of Energy Research, Electric Power System Reserch Team

요약

본 논문에서는 재생에너지 및 초고속 전기충전인프라의 증가에 따른 접속대기, 출력제한, 선로용량 부족 등 계통에서 발생할 수 있는 다양한 문제점을 해결하기 위해 VPL(Virtual Power Line) 기술을 응용하여 기존 선로의 증설 없이 부하 및 재생에너지의 수용성을 증가시키기 위한 방안을 제안한다. 즉, ESS(Energy Storage System)를 재생에너지 및 부하에 연계하는 기존의 VPL 기술과는 다르게 선로 말단에 ESS를 연계하면, 기존의 VPL이 갖고 있는 기능을 모두 수행할 수 있을 뿐만 아니라 선로의 추가 증설 없이 연계용량을 극대화 할 수 있다. 이를 위해 PSCAD/EMTDC를 통해 계통 및 알고리즘을 모델링하고 다양한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제시한 수용성 증가 방안을 입증한다.

1. 서론

2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제 9차 전력수급기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가 되고 있다. 하지만 신재생에너지를 연계하기 위한 인프라 부족으로 3.7 GW가 접속 대기 중에 있으며, 국내 전력계통의 분산전원 연계 용량을 살펴보면 송전은 30%, 배전은 70%로 대부분의 신재생에너지는 배전계통에 연계되고 있다. 이러한 접속대기 문제를 해결하기 위해 신재생에너지의 접속지연을 위한 배전선로 증설을 비롯한 투자비를 경감시킬 수 있는 방안 마련이 절실하다[1].

또한 신재생에너지의 보급률이 전국에서 가장 높은 제주에서는 신재생에너지 수용 가능량 한계 초과로 인해 신재생에너지의 출력제한 횟수가 증가 하고 있다. 20년도에만 총 77회 출력 감발 지시가 있었고, 21년 4월에는 HVDC #1의 역송에도 불구하고 신재생에너지의 출력을 감발하였다. 이러한 출력제한 문제를 줄이기 위해서는 운전 중인 발전기의 출력 감발이나 잉여전력 활용을 위한 수요이전, 에너지저장장치

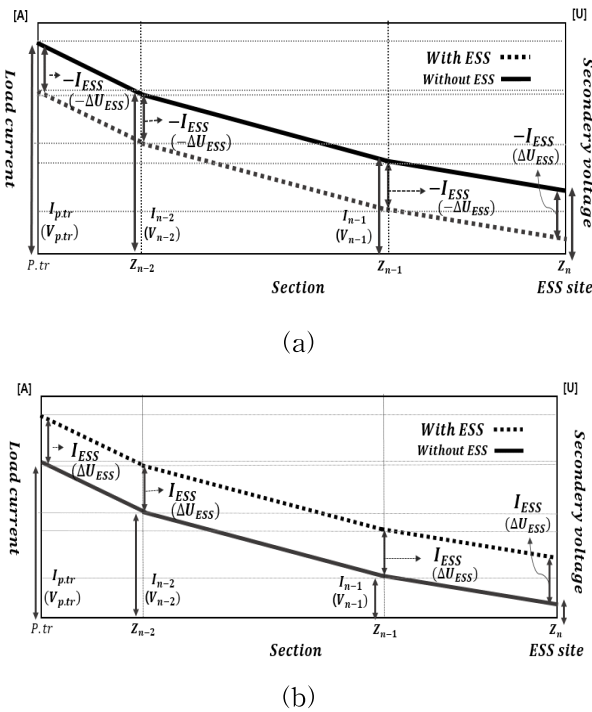
도입 및 섹터커플링 기술을 이용한 수소생산 및 활용을 통해 전력계통의 유연성을 확보하는 것이 중요하다[2].

한편 국외에서는 신재생에너지 연계에 의한 전력계통 유연성을 확보하기 위해 VPL(Virtual Power Line) 기술을 활용하고 있다. VPL은 송배전 시스템을 추가로 강화하거나 구축하는 대신, 신재생에너지 및 부하측에 ESS(Energy Sotrage System)을 설치하여 기존 계통 인프라를 지원하고 시스템의 성능 및 수용성을 향상 시키는 기술이다[3]. 본 논문에서는 신재생에너지 및 부하에 각각 ESS를 연계하는 기존 VPL 대신, 선로 말단에 연계된 단일 ESS만으로 기존 VPL의 기능 충분히 수행할 수 있는 방안을 제시한다. 즉, 그리드와 ESS간 양방향 전력조류를 이용하여 전압을 계통에서 요구하는 허용치($220\pm 6\%$)를 만족함과 동시에 신재생에너지 및 부하를 해당 선로가 가진 용량을 약 2배까지 초과하여 연계할 수 있는 방안을 제시한다.

이를 위해 배전계통의 대표적인 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 저압배전계통을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하여 본 논문의 유용성을 입증한다.

2. VPL 제어 알고리즘

저압 배전계통에서 전압은 EV를 포함한 부하 및 태양광전원의 발전 패턴에 따라 달라질 수 있다. 즉, 낮 시간동안 태양광 발전이 많을 경우 역조류에 의해 수용가에는 과전압이 발생할 수 있고, 저녁 시간대에 EV 충전이 많을 경우에는 수용가에 저전압 현상이 발생할 수 있다. 이와 같은 상황에서 ESS를 활용하여 적절한 충/방전 운용을 수행하게 된다면 전압 및 선로용량 문제를 해결함과 동시에 수용성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문은 태양광전원에 의한 전압이 상한치를 벗어날 경우 ESS를 충전시키고, EV의 전력소모에 의해 전압이 하한치를 벗어날 경우 ESS를 방전시켜 허용범위 이내로 전압을 조정하고 동시에 저압선로의 한계용량을 유지하기 위한 방안을 제시한다. 이 전략의 개념을 나타내면 그림 1과 같다



[그림 1] Feeder current and voltage of LVDS
(a) ESS charge, (b) ESS discharge

한편 배전용 ESS의 제어 알고리즘에서 충/방전 모드, 동작시점 및 운용용량 결정은 각 부하가 연계된 버스에서 측정된 데이터를 기반으로 결정되며, ESS는 설정된 SOC 범위 이내에서 안정적으로 운영하도록 구성된다. 이를 위해 각 모드별로 5개의 알람신호가 알고리즘에 포함되며 상세한 알고리즘 운용절차는 다음과 같다.

[Step 1] ESS 운용을 위한 기준값 산정

ESS의 충방전 운용을 위해 우선적으로 각 구간별 부하 분포에 따라 선로용량을 초과하지 않는 범위 내에서 전압 상·하한치에 도달하는 부하 및 신재생에너지의 합산전력을 산출하고 이는 각각 ESS의 충방전 운용 시작시점(PL, PG)을 알리는 기준값이다

[Step 2] ESS의 충/방전 모드 결정

ESS의 모드를 결정하기 위해서는 측정 지점에서 전력조류의 방향을 우선 결정해야 한다. 알고리즘에서는 식 (1)과 같이 조류의 방향이 계통에서 부하측이면 양수, 부하측에서 계통측 이면 음수로 정한다.

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i(t) \geq 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

[Step 3] ESS의 전압조정 기능을 위한 용량 결정

충/방전 모드가 결정되면, ESS의 동작 시점 및 용량을 결정해야 한다. 먼저, 방전모드에서 ESS의 동작 시점은 [Step 1]에서 구한 P_L 에 따라 정해진다. 합산 전력이 P_L 에 도달하면 식 (2)와 같이 신호 $\beta(t)$ 는 활성화되어 ESS는 방전운용을 시작된다. 만약 $\beta(t)$ 가 비활성화 된 경우, 즉 $\beta(t)$ 가 0이면, ESS는 방전모드 상태에서 대기한다.

$$\beta(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i \geq P_L \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i < P_L \end{cases} \quad (2)$$

다음으로 ESS의 방전 용량은 식 (3)과 같이 취합된 구간별 부하 전력의 합과 P_L 을 이용하여 결정된다.

$$P_{dis.ref}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_L \right\} \times \beta(t) \quad (3)$$

여기서, $P_{dis.ref}$ 는 ESS 방전 출력 기준값이다

충전 모드에서는 방전모드와 마찬가지로 운용되고 식 (4)의 $\gamma(t)$ 에 따라 충전모드가 결정되고 그 값은 식 (5)에 따라 결정된다.

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i \geq P_G \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i < P_G \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{chg_ref}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_G - P_{grid} \right\} \times \gamma(t) \quad (5)$$

여기서, P_{chg_ref} 는 ESS 충전 출력 기준값이고, P_{grid} 는 ESS 충전 시 계통으로부터 받는 전력값이다.

[Step 5] SOC 상태에 따른 ESS의 동작여부 결정

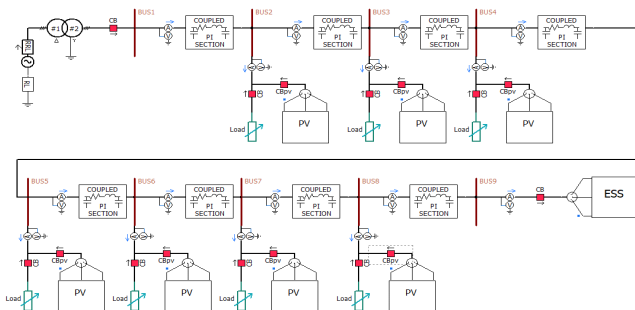
본 단계에서는 충/방전 모드에서 SOC를 파악하여 ESS의 동작 지속여부를 결정한다. 즉, 충전모드에서 유효전력 흡수로 인해 ESS의 SOC가 상한 설정값을 초과하게 되면 식 (6)과 같이 신호 $\delta(t)$ 가 활성화 되어 ESS는 동작을 멈추게 된다. 또한 방전모드에서 유효전력 방출로 인해 ESS의 SOC가 하한 설정값 미만이면 식 (7)과 같이 신호 $\eta(t)$ 가 활성화 되어 ESS는 정지한다.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & SOC > 90\% \\ 0, & SOC \leq 90\% \end{cases} \quad (6)$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & SOC < 10\% \\ 0, & SOC \geq 10\% \end{cases} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

저압 배전계통에서 ESS의 제어 알고리즘에 대한 모델 검증을 수행하기 위하여 배전계통의 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 EV 부하, 태양광전원 및 전압 제어 알고리즘이 포함된 ESS를 그림 2와 같이 모델링하며, 구간은 총 8개 구간으로 구분된다.



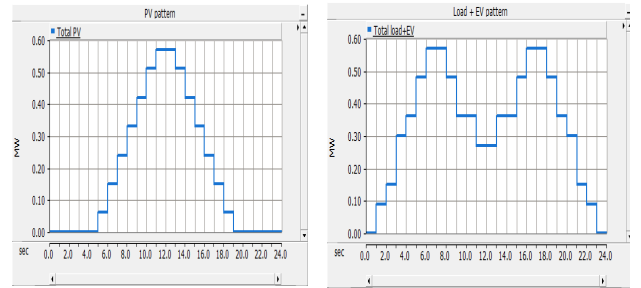
[그림 2] 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 위한 모델 파라미터는 표 1과 같고 각 구간별 선로 길이는 60m이다.

[표 1] 모델 파라미터

Category	Contents
Pole Transformer	300KVA, 13200/230V
Rated Voltage	220V
PF	1
Line Impedance 1	OW-95mm2 Z=0.248+j0.0852Ω/km
Load (customer. EV)	0~570kW
PV system	0~240kW
ESS Output	0~320kW

또한 시뮬레이션을 위한 태양광 전원 및 전기충전 인프라를 포함하는 부하 패턴은 그림 3과 같다.



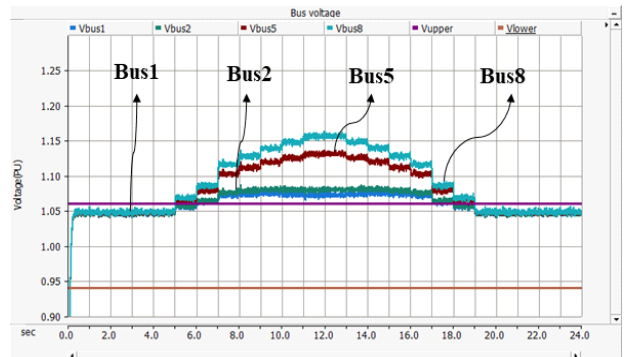
(a) 태양광 발전 패턴

(b) 부하 패턴

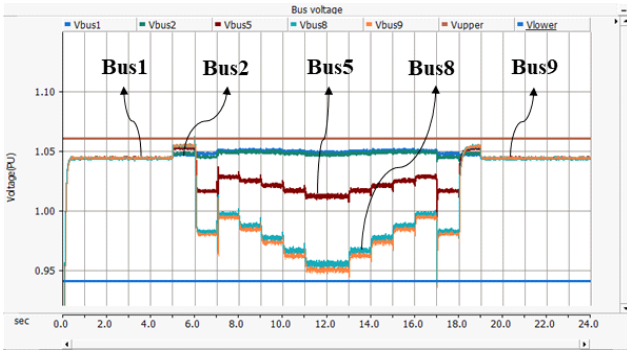
[그림 3] 태양광전원 및 부하 패턴

3.1 ESS 연계 전/후 태양광전원 수용성 시뮬레이션

그림 4는ESS가 연계되지 않은 상태에서 태양광전원을 변압기 용량의 1.9배인 570kW까지 발전하도록 하여 운용할 경우의 시뮬레이션 결과로 전압 및 선로용량이 하한치 및 주상 변압기 용량을 크게 벗어남을 확인할 수 있다 그러나 ESS를 연계할 경우 그림 5와 같이 전압이 허용치 이내로 들어오며 주상변압기 용량의 1.9배를 초과할 지라도 안정적으로 운용할 수 있음을 보여준다..



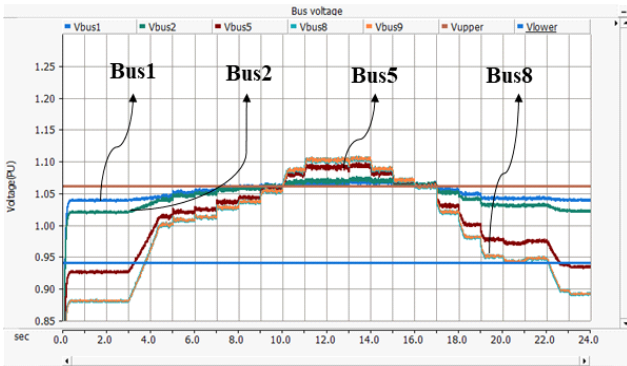
[그림 4] ESS 연계 전 저압계통 전압 특성



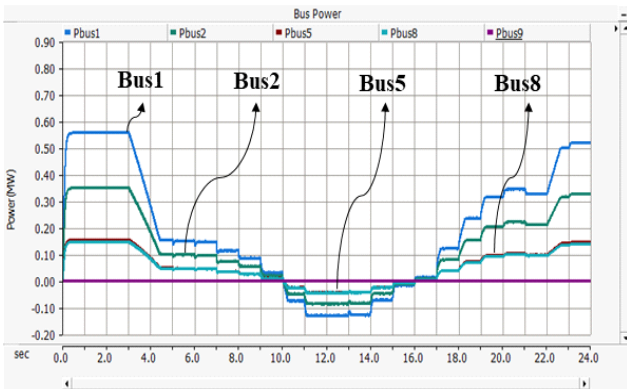
[그림 5] ESS 연계 후 저압계통 전압 특성

3.2.2 ESS 연계 전/후 복합배전계통의 선로용량 및 전압 특성

그림 6과 ESS를 연계하지 않은 상태에서 EV를 포함한 부하 및 태양광전원을 운용한 경우의 결과로 전압 및 선로용량이 하한치 및 주상변압기 용량을 크게 벗어남을 확인할 수 있다.



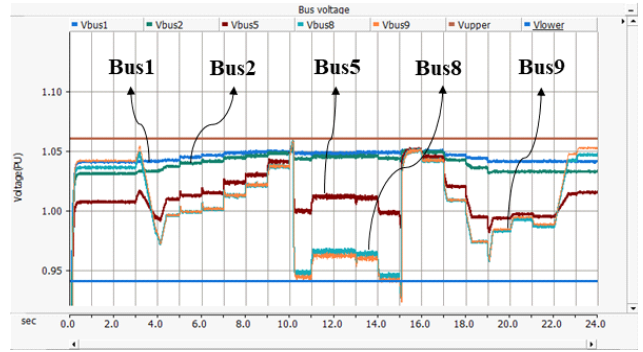
(a) 전압



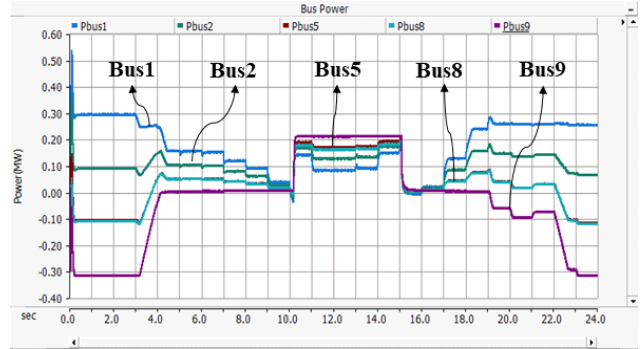
(b) Bus 측정전력

[그림 6] ESS 연계 전 부하 및 EV 운용에 따른 복합저압계통 특성

그림 7은 ESS를 연계한 상태에서 EV를 포함한 부하 및 태양광전원을 운용한 경우의 결과로 모든 버스 전압이 허용치 이내임을 보여준다. 또한그림 7(b)를 통해서 확인할 수 있듯이 변대 직하부터 말단 부하까지 각 버스에서 측정된 전력이 변압기 정격용량인 300kW 이내에 들어움을 확인할 수 있다.



(a) 전압



(b) Bus 측정전력

[그림 7] ESS 연계 전 부하 및 EV 운용에 따른 복합저압계통 특성

3. 결 론

본 논문에서는 VPL 기술을 응용하여 ESS를 저압배전선로 말단에 연계하여 전기자동차 및 신재생에너지의 수용성을 확대하기 위한 방안을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 선로 보강 없이 전력품질을 유지하면서 부하 및 태양광전원의 연계 용량을 해당 주상변압기 용량의 약 2배까지 연계할 수 있음을 확인하였으며, 부하 및 태양광전원의 패턴이 상이한 점을 이용할 경우 ESS의 용량을 작게 하고 효율적으로 운영할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(no. 20203030020200).

참고문헌

- [1] 조성수 외6, “배전선로의 분산 전원 상시 연계용량 기준 상향 타당성 연구”, KEPCO Journal on electric power and energy v.5 no.4, pp.311 - 321, 2019년
- [2] 이태의, 이유수, “제주도의 재생에너지 확대와 전력계통의 안정적 운영 방향” 에너지포커스, pp. 48-63, 2021년
- [3] “Virtual Power Lines”, IRENA, 2020년