

VMEI 지수를 활용한 제주 배전계통 내 EV 충전부하에 의한 과전압 완화 효과 분석

남준혁*, 조동일*, 조윤진*, 김병기**, 문원식*
 *송실대학교 전기공학과, **한국에너지기술연구원
 e-mail: junhyuk6@gmail.com

Analysis of Overvoltage Mitigation Effects by EV Charging Loads in Jeju Distribution System Using the VMEI Index

Junhyuk Nam*, Dongil Cho*, Yunjin Cho*, Byoungki Kim**, Wonsik Moon*
 *Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, **KIER

요약

본 연구는 제주 배전계통에서 전기차(EV) 충전부하를 활용하여 태양광발전으로 인한 과전압 완화 가능성을 평가하였다. OpenDSS와 Python을 이용한 시뮬레이션을 통해 VMEI 지수를 분석한 결과, 모든 피더에서 전압 여유율이 개선되는 효과를 확인하였다. 이를 통해 EV 충전부하가 과전압을 완화하여 전압 안정성 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

최근 신재생에너지의 급격한 증가로 인해 배전계통 내 태양광 발전 연계가 늘어나면서 낮 시간대 과전압 문제가 빈번히 발생하고 있다. 과전압 완화를 위해 에너지저장장치(ESS)를 활용한 방법이 제안되고 있지만, 높은 초기 투자 비용과 유지관리비용이 한계점으로 지적되고 있다. 이에 대한 대안으로 본 논문에서는 전기차(EV)의 충전부하가 태양광 발전에 의한 과전압 완화에 기여할 수 있는 가능성을 정량적으로 평가하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 제주지역 154/22.9 kV 변전소 배전망 모델을 기반으로 수행하였다. 해당 배전계통은 4개의 피더와 총 24개의 노드로 구성되었으며, 총 48 MW의 태양광발전 설비가 연계되어 있다. EV 충전부하가 전압 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 각 피더 말단 노드(Node 8, Node 13, Node 20, Node 24)에 EV 충전소가 위치한다고 가정하였고, 각 충전소의 EV 충전부하는 0.5 MW로 설정하였다.

과전압 완화 효과를 평가하기 위해 전압 여유율 평가 지수인 VMEI(Voltage Margin Evaluation Index)를 활용하였다[1]. VMEI는 전압값이 전압 유지범위의 상하한에 가까울수록 페널티를 부과하여 전압 여유율을 평가하는 지표로서, 수식(1)~(4)와 같이 정의된다. 여기서 V 는 측정된 노드 전압, V_{nom} 은 표준전압, V_{min} 과 V_{max} 는 전압유지범위 하한 및 상한을 의미하며, 특고압 한계전압의 전압유지 범위를 적용하였다[2].

$$VM_{k,t}^{above} = 1 - \left(\frac{V_{k,t} - V_{nom}}{V_{max} - V_{nom}} \right)^2, \text{ if } V_{k,t} > V_{nom} \quad (1)$$

$$VM_{k,t}^{below} = 1 - \left(\frac{V_{nom} - V_{k,t}}{V_{nom} - V_{min}} \right)^2, \text{ if } V_{k,t} \leq V_{nom} \quad (2)$$

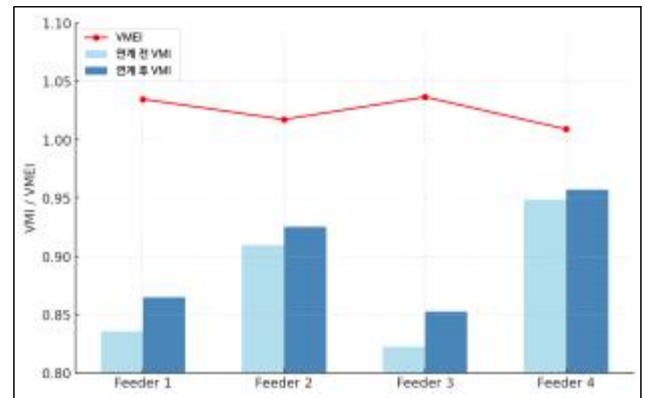
$$VMI_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (VM_{k,t}^{above} + VM_{k,t}^{below}) \quad (3)$$

$$VMEI_k = \frac{VMI_{k,threshold}}{VMI_k} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

EV 충전부하가 연계되었을 때, 피더 전체의 전압 여유율 개선 효과를 분석하기 위해 OpenDSS와 Python을 연계하여 전압 분석 시뮬레이션을 진행하였고, 피더 평균 VMI와 VMEI 지수를 이용하여 평가하였다.

시뮬레이션 결과는 [그림 1]과 같다. EV 충전부하 적용 후 모든 피더에서 VMI가 증가하여 VMEI 값이 1보다 크게 나타났다. 이를 통해 모든 피더의 전압 여유율이 개선되었음을 알 수 있다.



[그림 1] 피더별 EV 충전부하 연계 전/후 VMI 및 VMEI

특히 [표 1]에 나타난 것과 같이 Feeder 1과 Feeder 3의 경우 VMEI 값이 각각 1.03464, 1.03649로 가장 큰 개선 효과를 나타냈으며, 이는 두 피더에 설치된 태양광 발전 설비가 많아 낮 시간대에 과전압 문제가 상대적으로 심각하였기 때문이다. EV 충전부하가 피크 시간대의 과도한 발전량을 효과적으로 흡수하여 전압을 적정 범위 내로 유지하는 역할을 한 것으로 분석된다. 반면, Feeder 2와 Feeder 4는 각각 1.01724와 1.00897의 VMEI 값으로 상대적으로 작은 개선 폭을 보였다. 이는 피더별로 설치된 태양광 발전량의 차이에 따라 EV 충전부하가 과전압 완화에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 시사한다.

[표 1] 피더별 EV 충전부하 연계 전/후 VMI 및 VMEI

피더	연계 전 VMI	연계 후 VMI	VMEI
Feeder 1	0.83578	0.86473	1.03464
Feeder 2	0.90958	0.92526	1.01724
Feeder 3	0.82261	0.85262	1.03649
Feeder 4	0.94869	0.95719	1.00897

4. 결 론

본 연구를 통해 EV 충전부하를 활용하여 제주 배전계통의 과전압 문제를 효율적으로 완화할 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 추가적인 설비 투자나 복잡한 제어 시스템 없이도 EV 충전부하가 배전계통의 전압 안정성을 높일 수 있는 경제적이고 효과적인 수단이 될 것으로 기대된다. 다만 향후 다양한 EV 보급률과 충전소 위치에 따라 세분화 된 운영 데이터를 반영한 보다 정밀한 시뮬레이션과 추가적인 기술적 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20225500000120)

참고문헌

- [1] J. -H. Nam, S. -J. Park, D. -I. Cho, Y. -J. Cho and W. -S. Moon, "Assessing the Suitability of Distributed Energy Resources in Distribution Systems Based on the Voltage Margin: A Case Study of Jeju, South Korea," in IEEE Access, vol. 13, pp. 36263–36272, 2025.
- [2] "분산형전원 배전계통연계 기술기준", 한국전력공사, 2023.