

재생 발전원의 무효전력제어 전략에 따른 송전망 전압상승 완화 효과 비교

김수빈*, 송승호*

* 광운대학교 전기공학과

Comparison of Voltage Regulation Characteristics According to Reactive Power Control Strategies of Renewable Energy Generation Systems in Transmission Grid

Soo-Bin Kim*, Seung-Ho Song*

* Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon Univ.

ABSTRACT

송전망에 장거리 지중선로로 재생 발전원이 연계되는 경우, 지중선로의 커패시턴스 성분으로 인한 계통으로 무효전력 주입이 발생하여 전압상승을 야기시킬 수 있다. 또한 재생 발전원의 발전량 조절의 어려움은 경부하시 전력 생산과 소비의 불균형을 발생시킬 수 있으며 계통의 전압상승을 심화시킬 수 있다. 계통의 전압상승은 계통의 신뢰도를 저하시키고 계통운영에 어려움을 수반한다. 이러한 전압상승은 무효전력보상을 통해 완화가 가능하다. 인버터 기반의 재생 발전원은 무효전력제어 제어 정밀도가 높고 빠르게 제어가 가능하여 계통의 전압상승 완화에 좋은 솔루션이 될 수 있다. 본 논문에서는 송전망 계통에서의 전압상승 완화를 위한 재생 발전원의 무효전력제어 기술을 설명한다. 재생 발전원의 무효전력지원에 따른 전압상승 완화 효과를 평가하기 위해 Matlab을 활용하여 송전망 전압상승 및 재생 발전원의 무효전력지원을 모의하였다. 계통 모델에는 영광의 태양광 및 풍력 발전소와 주변 계통의 파라미터를 적용하여 구현하였다.

1. 서론

화석연료의 고갈과 환경오염의 문제로 전 세계적으로 신재생 에너지 보급이 지속적으로 증가하고 있으며, 국내에서도 정책적, 제도적 지원으로 계통에 연계되는 신재생 에너지가 급증하고 있다. 그런데 일사량이나 풍속 등 자연조건에 의존하여 발전하는 신재생 에너지는 출력을 예측하기 어렵고 변동성이 높아서 높은 신재생 에너지 비중은 전력계통의 유연성을 저해할 수 있다. 또한 지중선로로 연계되는 신재생 발전소는 지중선로의 높은 커패시턴스로 인해 계통으로 주입되는 무효전력이 높아져서 과전압 문제가 발생될 수 있다. 태양광이나 풍력 등 재생 에너지가 몰려있는 전남 지역에서는 신재생 발전이 지중선로로 연계되어 송전선로를 통해 높은 무효전력 유입됨이 확인되었으며, 주말 경부하시간에 높은 전압상승이 발생하는 사례도 있었다.

이러한 전압상승은 탭절환 변압기나 셉트 리액터, FACTS(Flexible AC Transmission system), 발전기의 여자 제어 등을 통해 무효전력을 흡수하여 완화가 가능하다. 이러한 무효전력 지원을 신재생 에너지가 참여한다면 계통 전압상승 완화를 위한 전기 설비 확충에 따른 비용을 저감할 수 있으며

인버터 기반의 신재생 발전기는 반응 속도가 높아서 계통 운영에 있어서 여러 이점을 제공할 수 있다.

본 논문에서는 신재생 발전의 기존 무효전력제어 방식들을 비교하였다. 각 무효전력제어의 성능은 계통의 손실과 전압조정 능력에 대해 평가하였다. 무효전력제어 방식의 성능 평가는 MATLAB 툴을 이용하여 송전망 계통을 모델링하고 모의하였다.

2. 전압 민감도 해석

2.1 무효전력과 전압변동

전력 조류에 따른 전압변동은 계통의 임피던스에 의해 영향을 받는다. 송전선로에 전류가 흐르면 선전선로의 임피던스에 의해 전압상하가 발생하게 되어 송전단과 수전단에 전압차가 발생하게 된다. 그림 1은 전력 조류에 따른 수전단의 전압 변동을 나타낸다.

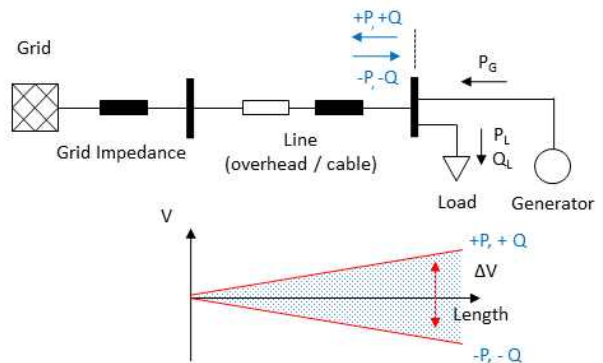


그림 1 전력조류에 따른 계통 전압
Fig. 1 Grid voltage due to power flow

일반적으로 부하는 유효전력 및 무효전력을 흡수하여 되어 계통의 전압을 강하시킨다. 반대로 발전기는 계통으로 전력을 주입하여 계통의 전압을 상승시키게 된다. 이러한 전력 조류에 의한 전압 변동은 계통의 임피던스가 클수록 높게 나타난다. 송전선로의 길이가 길수록 선로 임피던스가 증가하므로 전력조류에 의한 전압변동이 높게 나타난다^[1]. 이러한 전력조류에 의한 전압변동은 전압 민감도 해석을 통해 평가가 가능하다.

2.2 전압 민감도 해석

전압 민감도 해석은 발전기 또는 부하의 위치 및 전력량에 따른 전압 변동 크기를 평가하는데 효과적이다. 식 (1)과 (2)는 유효 및 무효전력에 대한 방정식을 나타낸다. 식 (1), (2)와 전력조류해석 중 비선형 대수방정식을 반복해법을 통해 해를 계산하는 뉴턴-랩슨 법을 이용하여 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{\delta P} & S_{\delta Q} \\ S_{VP} & S_{VQ} \end{bmatrix}}_{J^{-1}=S} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (1)-(3)에서 P 와 Q 는 유효전력 및 무효전력을 의미하고, V 와 δ 는 전압의 크기 및 위상, Y 와 θ 는 어드미턴스의 크기 및 위상, J 는 자코비안 행렬이며, 자코비안 행렬의 역행렬이 전압 민감도 행렬 S 이다. 자코비안 행렬 J 는 수렴 공차를 만족할 때까지 반복 연산을 통해 갱신된 결과이다^[2].

그림 2는 전압 민감도 해석을 위한 계통 모델이다. 계통 모델에 사용된 파라미터는 전남 지역 중 신재생 발전 연계에 따른 경부하시 전압상승이 높게 나타나는 지역의 실제 계통 파라미터를 적용하였다. 그림 2에서 경부하시 전압상승 문제가 발생한 모선은 Bus3-5이다.

그림 3은 Bus3에서의 전압 민감도를 나타낸다. 그림 3에서 Bus3의 전압변동은 Bus4 및 Bus5의 유효 및 무효전력에 영향을 많이 받으며 특히 무효전력에 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 Bus4에 주입되는 Q 에 대한 Bus3의 전압 민감도 S_{VQ} 는 약 0.0001이고 이것은 만일 Bus4에서 무효전력을 50 [Mvar]를 흡수한다면 Bus3에서는 약 5 [kV]의 전압강하가 발생된다는 것이다.

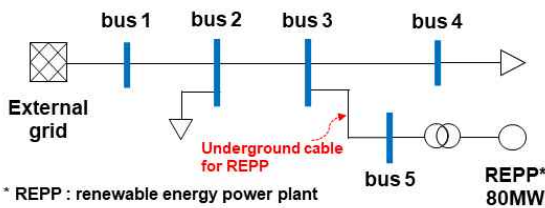


그림 2 전압 민감도 해석을 위한 계통 모델
Fig. 2 Grid model for the voltage sensitivity analysis

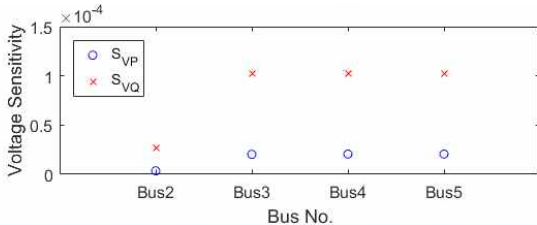


그림 3 각 노드별 P, Q 변동에 의한 Bus3에서의 전압 민감도
Fig. 3 Voltage sensitivity at Bus3 to P and Q variation

Bus3과 Bus5 모선 간에는 지중선로로 연결되어 있다. 선로의 커패시턴스로부터 계통에 주입되는 무효전력은 전압의 제곱

에 비례($Q = V^2 B$)하는데 지중선로는 가공선로에 비해 커패시턴스가 커서 선로에서 계통으로 주입되는 무효전력이 증가한다. Bus3과 Bus5 모선 간 송전선로에서 Bus3으로 주입되는 무효전력은 약 40-50 [MVar] 정도 되는데, 이로 인해 경부하시에 Bus3 주변 계통에서 과전압이 발생될 수 있다. 따라서 Bus3 모선 주변 계통은 무효전력 보상이 요구되는 지역이다.

송전선로에 의한 용량성 무효전력의 발생은 선트 리액터를 설치하면 상쇄가 가능하다. 그런데 선트 리액터는 용량에 따른 부피가 매우 크기 때문에 설치 공간확보에 어려움이 있고 비용도 크게 발생한다. 따라서 만일 신재생 발전원이 적절히 무효전력을 보상한다면 선트 리액터의 용량을 낮출 수 있다.

3. 신재생 발전의 무효전력제어

일반적인 무효전력제어 방법에는 고정 무효전력제어 방식, 역률제어 방식, 전압에 따른 무효전력제어 $Q(V)$ 방식 등이 있다. 고정 무효전력제어 방식은 계통의 부하 및 발전기의 전력에 대한 프로파일이 요구되는 방식이다. 본 논문에서는 신재생 발전의 연계지점 전압이나 발전량 등과 같은 지역정보만 이용하는 무효전력제어에 대해서만 다룬다.

역률제어 방식은 신재생 발전의 유효전력 출력 정보만 이용하여 간접적으로 전압을 조정한다. 식 (4)는 역률제어 방식의 무효전력 지령 식이다. 이 방식은 계통의 전압이 부하 변동에 관계없이 유효전력에 따라 증가한다고 가정한다. 만일 신재생 발전의 출력이 높아도 주변 계통에서 전력 소비가 높은 경우 신재생 발전의 연계점 전압이 낮을 수도 있다. 따라서 역률제어 방식은 경우에 따라 불필요한 무효전력을 흡수하여 계통 손실을 증가시키고, 경우에 따라서는 계통 저전압을 발생시킬 수도 있다^{[2],[3]}.

$$Q_{ref} = -P_{gen} \frac{\sqrt{1 - PF_{ref}^2}}{PF_{ref}} \quad (3)$$

$Q(V)$ 방식은 신재생 발전의 연계점 전압 정보를 직접 사용하여 무효전력지령을 결정한다. 이 방식은 연계점 전압에 비례하는 무효전력 지령을 생성한다^{[2],[3]}. 그림 4는 $Q(V)$ 방식의 특성곡선을 나타낸다. $Q(V)$ 방식은 전압 정보를 직접 사용함으로써 주변 계통의 부하 수준에 따라 적절한 무효전력을 출력할 수 있다. 그러나 주변 계통의 전압 및 부하 수준이 달라질 수 있으므로 $V_{set-point}$ 를 적절히 선정하는 것이 중요하다.

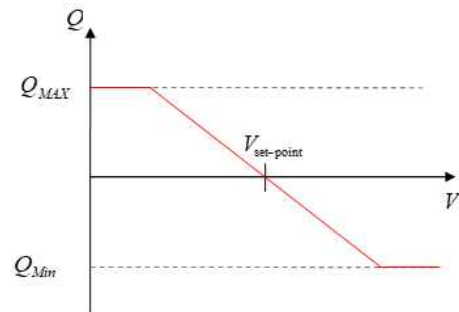


그림 4 $Q(V)$ 방식의 $Q-V$ 특성곡선
Fig. 4 $Q-V$ characteristic curve of $Q(V)$ method

4. 시뮬레이션

무효전력제어 방식에 따른 전압상승 완화 효과를 평가하기 위해 그림 2와 같은 계통 모델을 MATLAB에서 구현하였다. 시뮬레이션 모델의 파라미터는 표 1과 같다. 전압상승 모의 조건은 표 2와 같다.

표 1 계통 모델의 파라미터

Table 1 Parameters of the grid model

Parameters	Values
Rated Voltage of Bus 1	154 [kV]
Slack bus(Bus 1) voltage	156 [kV]
Rated Active Power of REPP*	80 [MW]

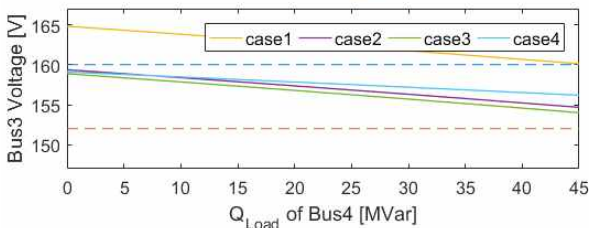
* REPP : Renewable energy power plant

표 2 시뮬레이션 조건

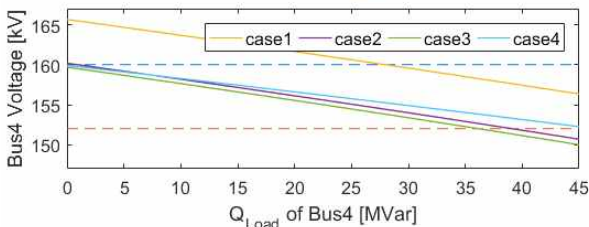
Table 2 Cases of simulation

Case	description
1	- Shunt reactor 미설치 - 신재생 발전 무효전력제어 미적용
2	- Bus3에 50MVar Shunt reactor 설치 - 신재생 발전 무효전력제어 미적용
3	- Bus3에 30MVar Shunt reactor 설치 - 신재생 발전 역률제어 방식(PF=0.95) 적용
4	- Bus3에 30MVar Shunt reactor 설치 - 신재생 발전 Q(V) 제어 방식 적용

전압상승은 신재생 발전의 유효전력 발전량이 높고, 부하가 낮을 시에 높게 나타난다. 표 2의 모든 조건에서 신재생 발전의 출력은 정출력(80 [MW])에서 Bus4의 유도성 부하를 0에서 45 [MVar]까지 조정하였을 때의 전압변동이 높게 나타나는 Bus3과 Bus4의 전압을 모의하였다.



(a)



(b)

그림 5 Q(V) 방식의 Q-V 특성곡선

Fig. 5 Q-V characteristic curve of Q(V) method

그림 5는 각 조건에 따른 Bus3과 Bus4의 전압을 나타낸다. 그림 5에서 점선은 국내 계통전압 운영 기준에서 경부하시 전

압 유지범위(156 ± 4kV)를 나타낸다. 시뮬레이션 결과, Bus4의 부하가 낮은 조건에서는 Case 1의 경우, Bus3과 Bus4의 전압 운영기준의 최대 전압 유지범위 기준을 초과하였으나 Case2-4에서는 전압 유지범위 기준을 만족하였다. Bus4의 부하가 높은 조건에서는 case 2와 3의 경우, 최소 전압 유지범위 기준을 벗어났으나 case 4의 경우에는 전압 유지범위 기준을 만족하였다. Bus4의 부하의 무효전력 소비가 높은 구간에서는 전압강하가 높게 나타나서 신재생 발전의 무효전력 흡수를 줄여야하지만 역률제어 방식의 경우, 신재생 발전의 유효전력 출력에 의해 무효전력 흡수가 결정되어 Bus4의 전압이 최소 전압 유지범위를 만족하지 못하였으나 Q(V) 방식의 경우에는 연계점 전압이 set-point 전압 이하로 낮아지는 경우에 무효전력을 주입함으로써 계통 전압을 전압 유지범위 기준에 만족한 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 신재생 발전의 증가에 따른 송전망 시스템의 전압상승 문제와 기존 신재생 발전의 무효전력제어 방식에 대해 설명하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 신재생 발전의 무효전력제어의 전압 조정 능력을 확인하였다.

신재생 발전의 무효전력제어를 통해 무효전력 보상을 위한 선트 리액터의 용량을 낮출 수 있으며, 반응 속도도 높아서 계통 운영 측면에서 이점을 가지고 있다. 이러한 신재생 발전의 무효전력제어의 효과를 확인하기 위해 전남 지역의 계통 시뮬레이션 모델을 구현하여 전압변동을 모의하였다.

시뮬레이션 결과, 신재생 발전이 무효전력제어를 수행하는 경우에 무효전력 보상을 위한 선트 리액터의 용량을 낮출 수 있었으며, 신재생 발전의 무효전력제어 기법 중에서 Q(V) 제어가 역률제어 방식보다 계통 전압을 조정하는데 유리함을 확인하였다.

본 논문을 바탕으로 향후에는 신재생 발전을 활용한 송전망 계통의 전압 안정성 확보 방안을 연구할 예정이다.

- 본 연구는 2017년 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20173010024890)

참고 문헌

- [1] J. Backes, C. Schorn, and H. Basse, "Cost-efficient integration of dispersed generation using voltage dependent reactive power control," presented at the CIRED Workshop, Lyon, France, 2010.
- [2] E. Demirok, P. C. Gonzalez, K. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, "Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids," IEEE J. Photovoltaics, vol. 1, no. 2, pp. 174 - 182, Oct. 2011.
- [3] M. Braun, T. Stetz, T. Reimann, B. Valov, and G. Arnold, "Optimal reactive power supply in distribution networks—Technological and economic assessment for PV systems," presented at the 24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf., Hamburg, Germany, Sep. 2009.