

태양광전원용 그리드포밍 인버터를 이용한 마을형 MG의 전압변동특성에 관한 연구

김경화*, 이세연*, 최성문*, 김병기**, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

**한국에너지기술연구원 전력시스템연구팀

e-mail:kyunghwa316@koreatech.ac.kr

Voltage Variation Characteristics of Community MG with Grid-forming Inverter in PV System

Kyung-Hwa Kim*, Se-Yeon Lee*, Sung-Moon Choi*, Byung-Ki Kim**, and Dae-Seok Rho*

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

**Korea Institute of Energy Research Electric Power System Research Team

요약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대되면서, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 전라남도에서는 기존의 배전계통에서 태양광전원 등의 신재생에너지 전원을 설치하여 운용함으로써, 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 분산에너지 생산 및 소비 체계 구축을 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 연구가 진행되고 있다. 그러나, 이러한 마이크로그리드에서 신재생에너지 전원의 설치가 증가함에 따라, 수용가의 전압변동에 따른 전력품질 문제가 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, droop 제어방식에 기반한 태양광전원용 그리드포밍 인버터의 모델링을 제안하고, 배전용 변전소, 태양광전원, 지열발전, ESS, 수용가부하, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 마을형 마이크로그리드의 전압변동특성을 분석한 결과, 그리드포밍 방식의 인버터를 이용한 경우가 계통연계형 인버터 방식보다 수용가의 전압변동이 낮아, 수용가 전압을 안정적으로 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대되면서, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 전라남도에서는 기존의 배전계통에서 태양광전원, 지열발전 등의 신재생에너지 전원을 설치하여 운용함으로써 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 재생에너지 변동성 완화를 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 사업이 이루어지고 있다[1]. 그러나, 이러한 신재생에너지 전원의 도입이 급격하게 증가함에 따라, 계통에서 관성에 따른 주파수 변동성에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, droop제어방식에 기반한 태양광전원용 그리드포밍 인버터를 제안하고, 배전용 변전소, 태양광전원, 지열발전, ESS, 수용가부하, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 구성을 제시한다. 이 구성을 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 태양광전원용 인버터의 종류에 따른 운용특성을 분석한 결과, 계통연계형 인버터를 이용한 경우

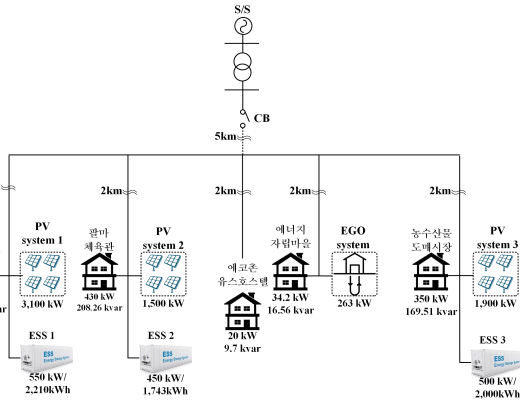
보다 수용가 전압을 안정적으로 유지할 수 있음을 확인하였다.

2. 태양광전원용 그리드포밍 인버터를 이용한 마을형 MG의 운용특성

2.1 마을형 마이크로그리드의 구성

지역 단위의 신재생에너지를 생산 및 소비 체계를 구축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을형 마이크로그리드의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 마을형 마이크로그리드를 구성하는 수용가들은 각각 수용가 부하와 신재생에너지 전원, ESS 등으로 다양하게 구성되며, 발전상태에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용할 수 있다. 또한, 각 수용가의 신재생에너지 전원은 태양광전원 및 지열 발전 등으로 이루어지며, 수용가 부하의 소비를 대체하고 잉여전력을 ESS에 충전하거나 타 수용가에 공급하는 등의 역할을 하여, 배전계통으로부터 마이크로그리드의 에너지 자립율을 확보한다. 한편, ESS는 신재생에너지 전원이나 배전계통으로부터 수전하는 전력으로 충전하여 기후 의존도

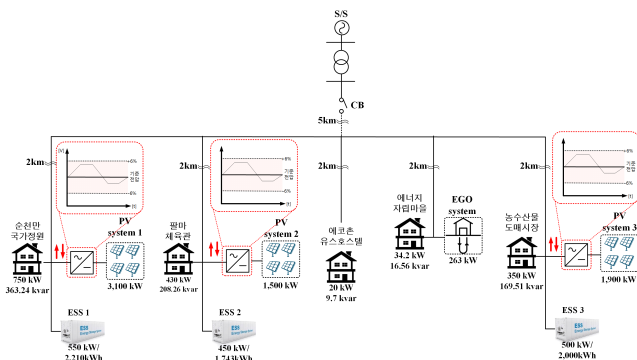
가 높은 신재생에너지 전원을 대신해서 수용가 부하에 에너지를 공급하거나, 피크 부하 시간에 방전하여 경제성을 확보하는 등의 역할을 한다.



[그림 1] 마을형 마이크로그리드의 구성

2.2 태양광전원용 그리드포밍 인버터의 운용특성

태양광전원용 그리드포밍 인버터의 운용특성을 나타내면 그림 2와 같다. 이 그림에서와 같이, 그리드포밍 인버터는 계통전압에 상관없이 전압과 주파수의 출력을 스스로 변경하여 안정적으로 전압을 공급할 수 있도록 한다. 한편, 그리드포밍 인버터는 인버터에서 출력되는 유효전력이 증가했을 때 출력전압의 주파수가 강하는 특성과 무효전력이 증가했을 때 출력전압의 크기가 강하하는 특성을 이용하는 droop 제어방식을 일반적으로 선정하고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 droop제어의 특성을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원용 그리드포밍 인버터를 모델링하고, 이 인버터를 바탕으로 마을형 마이크로그리드를 구성하여, 안정적으로 운용하고자 한다.

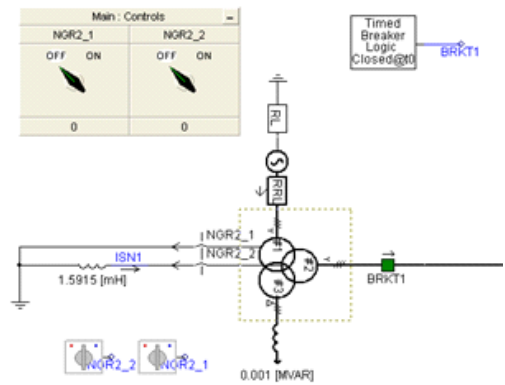


[그림 2] 태양광전원용 그리드포밍 인버터의 운용특성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 마을형 마이크로그리드의 모델링

3.1 배전계통부 모델링

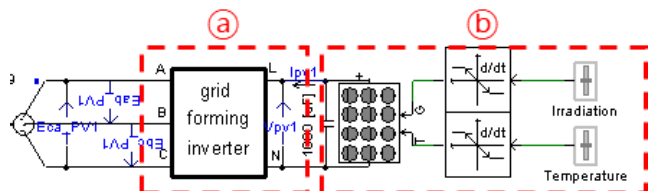
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부의 모델링을 수행하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제3 고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 적용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral grounding reactor)이 포함된다.



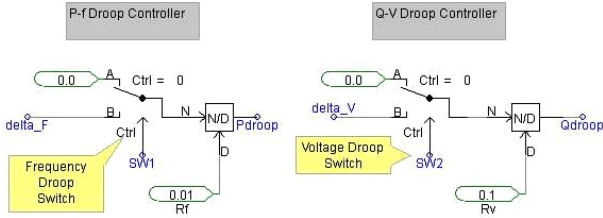
[그림 3] 배전계통부 모델링

3.2 태양광전원부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원부의 모델링을 수행하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 그림 4의 ①는 그리드포밍 인버터, ②는 태양광모듈을 나타낸다. 여기서, 그리드포밍 인버터의 제어방식은 droop 제어방식을 선정하며, 제어기의 모델링은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 한편, 태양광모듈에서는 일사량 및 온도의 설정을 통하여 출력을 제어할 수 있으며, 출력 전압 및 전류를 바탕으로 MPPT(maximum power point tracking)제어를 수행한다.



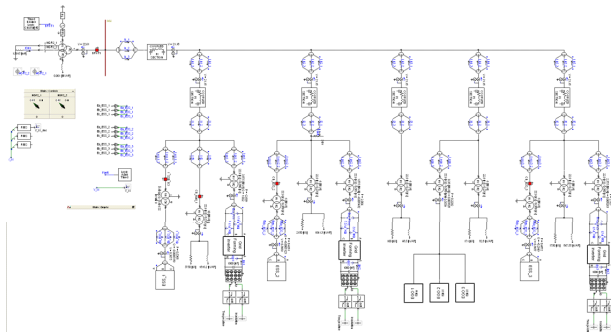
[그림 4] 태양광전원부 모델링



[그림 5] droop제어기 모델링

3.3 전체 시스템

마을형 마이크로그리드의 전체 시스템을 모델링하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 전체 시스템은 배전계통부, 태양광전원부, 지열발전부, ESS부, 수용가 부하부, 등으로 이루어져 있으며, 배전용 변전소는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식의 주변압기와 0.6[Ω]의 NGR로 구성하고, 태양광전원부는 태양광모듈과 그리드포밍 인버터로 구성한다. 한편, 지열 발전부는 동기조상기의 모델링을 바탕으로 모의하며, ESS 부는 배터리와 계통연계형 인버터로 구성되어 유효전력 및 무효전력에 대한 제어를 수행하도록 구성하고, 부하는 유효분과 무효분으로 나누어 정전력 부하로 구성한다.



[그림 6] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

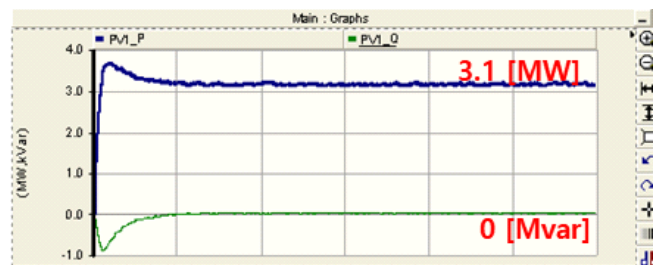
태양광전원용 그리드포밍 인버터를 이용한 마을형 마이크로그리드의 운용특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전선로는 ACSR 160 [mm²]를 이용하며, 배전용 변전소에서부터 거리는 10 [km]로 상정한다. 한편, 수용가는 전라남도에서 진행하고 있는 마을형 마이크로그리드 실증사업을 바탕으로 다섯 개의 수용가로 상정한다. 또한, 수용가 1, 수용가 2와 수용가 5는 부하와 태양광전원, ESS로 구성하고, 수용가 3은 부하, 수용가 4는 부하 및 지열 발전으로 상정한다. 한편, 태양광전원용 인버터는 계통연계형인 경우와 그리드포밍인 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

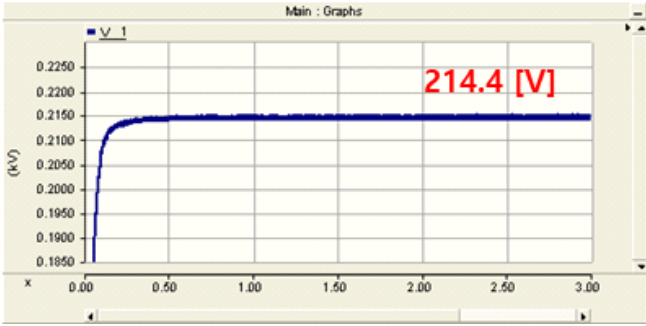
항목	내역	
배전용 변전소	정격용량	100[MVA]
	결선방식	Yg-Yg- Δ
배전선로	선종	ACSR 160 [mm ²]
수용가 1	수용가 부하 (부하 1)	3,750 [kW], 1,816.2 [kvar]
	태양광전원 (PV 1)	3,100 [kW]
	ESS (ESS 1)	550/2,210 [kW/kWh]
수용가 2	수용가 부하 (부하 2)	2,150 [kW], 1041.3 [kvar]
	태양광전원 (PV 2)	1,500 [kW]
	ESS (ESS 2)	450/1,743 [kW/kWh]
수용가 3	수용가 부하 (부하 3)	100 [kW], 48.5 [kvar]
수용가 4	수용가 부하 (부하 4)	171 [kW], 82.8 [kvar]
	지열 발전 (EGO 1)	267 [kW]
수용가 5	수용가 부하 (부하 5)	1,750 [kW], 847.6 [kvar]
	태양광 전원 (PV 3)	1,900 [kW]
	ESS (ESS 3)	500/2,000 [kW/kWh]

4.2 그리드포밍 인버터를 이용한 MG의 전압변동 특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 태양광전원용 인버터가 계통연계형 인버터인 경우와 그리드포밍 인버터인 경우에 대한 마을형 마이크로그리드의 전압변동 특성을 나타내면 그림 7과 그림 8과 같다. 여기서, 그림 7은 태양광전원용 인버터가 계통연계형인 경우를 나타낸다. 또한, 그림 7의 (a)는 PV 1의 출력 특성을 나타내고, 그림 7의 (b)는 수용가 1의 저압측 전압 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원용 인버터가 계통연계형 인버터인 경우, 태양광전원의 유효전력 및 무효전력 출력은 각각 3.1 [MW]와 0 [Mvar]가 나타나며, 수용가 1의 저압측 전압은 214.4 [V]가 나타남을 알 수 있었다.

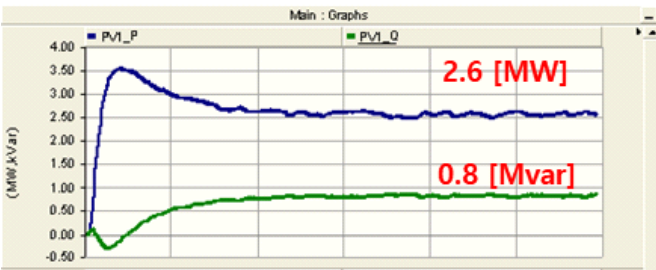


(a) PV 1의 태양광전원 출력 특성

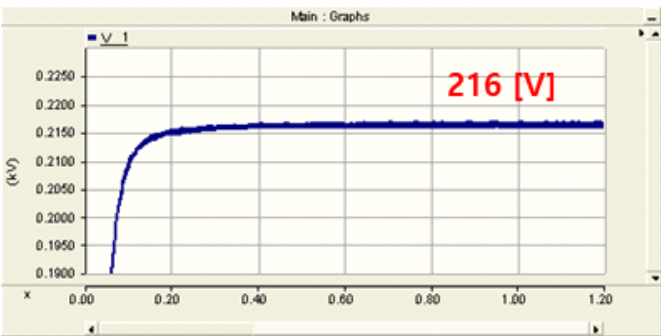


(b) 수용가 1의 2차측 전압 특성
[그림 7] 계통연계형 인버터인 경우의 운용 특성

한편, 그림 8은 태양광전원용 인버터가 그리드포밍 인버터인 경우를 나타낸다. 여기서, 그림 8의 (a)는 PV 1의 출력 특성을 나타내고, 그림 8의 (b)는 수용가 1의 저압측 전압 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원용 인버터가 계통연계형 인버터인 경우, 태양광전원의 유효전력 및 무효전력 출력은 각각 2.6 [MW]와 0.8 [Mvar]가 나타나며, 수용가 1의 저압측 전압은 216 [V]로 계통연계형 인버터인 경우보다 약 1.5 [V]가 상승함을 알 수 있다.



(a) PV 1의 태양광전원 출력 특성



(b) 수용가 1의 부하측 전압 특성
[그림 8] 그리드포밍 인버터인 경우의 운용 특성

또한, 태양광전원용 인버터의 종류에 따른 마을형 마이크로그리드의 전압변동특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 태양광전원용 인버터는 계통연계형 인버터인 경우와 그리드포밍 인버터인 경우로 나누어 분석한다. 이 표에서와 같이, 태양광전원용 인버터를 계통연계형으로 운용하는 경우, 수용가 2차측 전압은 최소 214.4 [V]에서 최대 219.4 [V]로 나타나는 것을 알 수 있었다. 한편, 태양광전원용 인버터를 그

리드포밍 인버터로 운용하는 경우, 수용가 2차측 전압이 최소 216 [V]에서 최대 220.9 [V]로, 각 수용가 2차측 전압이 약 1.5 [V] 상승하는 것을 확인하였다. 따라서, 태양광전원용 인버터를 그리드포밍 인버터로 선정하는 경우, 무효전력을 통해 역률을 보상하여, 수용가의 전압강하를 줄일 수 있음을 확인하였다.

[표 2] 마을형 마이크로그리드의 전압변동특성

	전압특성[V]				
	수용가 1	수용가 2	수용가 3	수용가 4	수용가 5
계통연계형 인버터	214.4	215.1	219.4	219	216
그리드포밍 인버터	216	216.5	220.9	220.5	217.5

5. 결 론

본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, droop제어방식에 기반한 태양광전원용 그리드포밍 인버터를 제안하고, 배전용 변전소, 태양광전원, 지열발전, ESS, 수용가부하, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 구성을 제시한다. 이 구성을 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 태양광전원용 인버터의 종류에 따른 운용특성을 분석한 결과, 계통연계형 인버터를 이용한 경우보다 전압변동이 낮아, 수용가 전압을 안정적으로 유지할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010) 및 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김지명 외 3인, “5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 해석 모델링에 관한 연구”, 전기학회 논문지, 71(1), 45-54, 2022.1
- [2] 임경배 외 1인, “마이크로그리드 독립 운전 모드시 저전압 불평형 선로 임피던스를 고려한 드롭 방식의 인버터 병렬 운전 제어 연구”, 전력전자학회 논문지, 18(4), 387-396, 2013.8