

에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 운영 알고리즘에 관한 연구

김경화, 한병길, 이세연, 김기영, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

An Operation Algorithm of Community Micro-grid Considering Self Energy Supply Rate

Kyung-Hwa Kim, Byeong-Gill Han, Se-Yeon Lee, Ki-Young Kim, Dae-Seok Rho*
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS의 도입이 확대되면서, 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율 확보를 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 운영을 위하여, 에너지 자립율에 따른 마을형 마이크로그리드의 운영 알고리즘을 제시한다. 즉, 에너지 자립율이 50%인 경우, 마을형 마이크로그리드는 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용하여 신재생에너지 전원의 발전에 따른 과전압 현상을 해결하기 위한 ESS의 충전 동작전압을 산정하고, 이를 바탕으로 수용가 전압을 표준 전압에 가깝게 유지할 수 있는 ESS의 적정용량을 구하는 알고리즘을 제시한다. 또한, 에너지 자립율이 100%인 경우, 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용하여 에너지 sinking에 의한 CVCF 인버터의 탈락을 방지할 수 있도록 배터리의 SOC가 85% 이상일 때 에너지 sinking이 발생하면 태양광전원의 출력을 최소한으로 제한하는 운영 알고리즘을 제시한다. 이를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 에너지 자립율에 따라 제안한 알고리즘의 운영 특성을 분석한 결과, 에너지 자립율이 50%인 경우 ESS의 운용으로 수용가 부하의 과전압 현상을 해결하고, 에너지 자립율이 100%인 경우 CVCF 인버터가 탈락하지 않고 안정적으로 운용됨을 알 수 있었다.

Abstract Recently, studies of micro-grids have been actively being performed due to the installation of renewable energy sources and ESS, and the demonstration projects on a community micro-grid for self-energy supply rate are proceeding in Jeollanam-do in Korea. On the other hand, as the installation of renewable energy sources increases in micro-grid, power quality problems occur due to voltage variations in customer loads. Therefore, this paper proposes the operation algorithm according to the self-energy supply rate for the stable operation of the community microgrid. In particular, when the replacement of energy consumption is 50%, the community micro-grid is operated as a grid-connected micro-grid. The proposed algorithm calculates the charging voltage and proper introduction capacity of ESS to overcome the over-voltage and keep the voltage of customer loads to standard voltage. Moreover, when the replacement of energy consumption is 100%, the community micro-grid is operated as an off-grid micro-grid, and the proposed algorithm curtails the minimum value of output power of PV systems to prevent the shutdown of a CVCF inverter when the SOC of battery is more than 85%, and the energy sinking phenomena occurred simultaneously. Based on the proposed algorithm, this paper presents the modeling of a community micro-grid according to the self-energy supply rate, which is composed of ESS, PV system, geothermal source, and CVCF inverter, using PSCAD/EMTDC S/W. The simulation results confirmed that the community micro-grid could overcome over-voltage of customer loads with the operation of ESS when the self-energy supply rate is 50%, and the CVCF inverter could be operated stably without shut down when the self-energy supply rate is 100%.

Keywords : Community Micro-grid, Grid-connected and Off-grid Operation Algorithm, Self Energy Supply Rate, Grid-connected Micro-grid, Off-grid Micro-grid, etc.

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원에 의한 연구(P0008458)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원에 의한 연구(No.20213030160080)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received August 29, 2022

Revised October 4, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. 또한, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 분산에너지 생산 및 소비 체계 구축을 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 연구가 진행되고 있다[5,6]. 이러한 마을형 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 마이크로그리드의 형태와 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다. 즉, 에너지 자립율이 50%인 경우 마을형 마이크로그리드는 배전계통에 연계되어 운용할 수 있으며, 에너지 자립율이 100%인 경우 마을형 마이크로그리드는 배전계통에서 독립하여 운용할 수 있다. 그러나, 이러한 마이크로그리드에서 신재생에너지 전원의 설치가 증가함에 따라, 수용가의 전압변동에 따른 전력품질 문제가 발생하고 있는 실정이다[7-9].

따라서, 본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 에너지 자립율에 따른 안정적인 운용 알고리즘을 제시한다. 즉, 에너지 자립율이 50%인 경우, 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 및 저전압 현상을 해결하기 위하여, ESS의 충전 및 방전 동작모드에 따른 전압보상값을 산정하고, 에너지 자립율이 100%인 경우, 에너지 sinking에 의한 CVCF 인버터의 탈락 방지할 수 있도록 배터리의 운용 한계전압과 운용 한계 SOC를 고려하여 태양광전원의 출력을 제한하는 운용 알고리즘을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 제시한 알고리즘에 따라 운용 특성을 분석한 결과, 에너지 자립율이 50%인 경우 ESS의 운용에 의한 수용가 부하의 과전압 현상을 해결하고, 에너지 자립율이 100%인 경우, SOC가 85% 이상일 때 energy sinking이 발생하여도, CVCF 인버터가 탈락하지 않고 안정적으로 운용됨을 알 수 있다.

2. 마을형 마이크로그리드의 운용 특성

지역 단위의 신재생에너지의 생산 및 소비 체계를 구축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을형 마이크로그리드의 구성은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기

서, 마을형 마이크로그리드는 각각 수용가 부하와 신재생에너지 전원, ESS 등으로 다양하게 구성되며, 신재생에너지 전원의 에너지 자립율에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용될 수 있다. 또한, 각 소규모 마이크로그리드의 신재생에너지 전원은 태양광전원 및 지열 발전 등으로 이루어지며, 수용가 부하에 전원을 공급하거나 잉여전력을 ESS에 충전하여, 마이크로그리드의 에너지 자립율을 확보한다. 한편, ESS는 신재생에너지 전원의 발전용량에 따라, 충전 및 방전 동작을 수행하여 과전압 및 저전압 현상을 해결하고, 마을형 마이크로그리드가 독립형으로 운용하는 경우, CVCF(constant voltage constant frequency) 기능에 의하여 전압 및 주파수를 제어하는 역할을 한다.

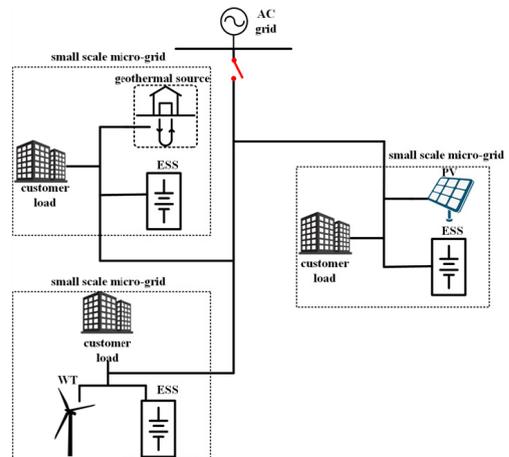


Fig. 1. Configuration of community micro-grid

한편, 에너지 자립율에 따른 마을형 마이크로그리드의 정상상태 운용방안은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 2의 (a)와 (b)는 에너지 자립율이 50%, 100%인 경우의 운용방안을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 에너지 자립율이 50%인 경우, 마을형 마이크로그리드는 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용되며, 각 지점에 설치된 ESS를 이용하여 수용가의 과전압 및 저전압 현상을 제어할 수 있다. 한편, Fig. 2의 (b)와 같이, 에너지 자립율이 100%인 경우, 마을형 마이크로그리드는 계통에서 분리되어 독립형 마이크로그리드로의 형태로 운용된다. 즉, 특정 ESS의 CVCF 기능을 추가하여, 마이크로그리드의 계통전압을 유지하고, 다른 ESS를 수 요관리용으로 운용하여 각 수용가의 전압을 안정적으로 유지시킨다.

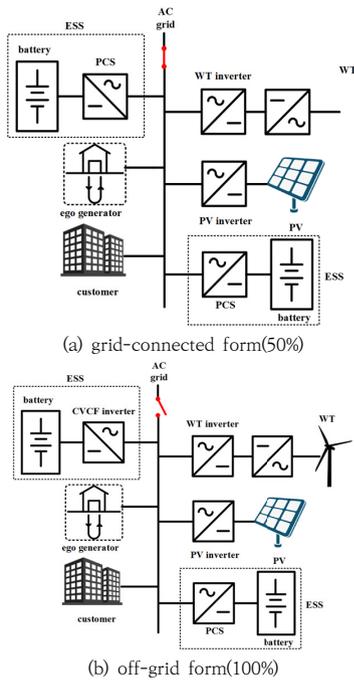


Fig. 2. Operation characteristics of community micro-grid with self energy supply rate

3. 에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 운용 알고리즘

3.1 계통연계형 마이크로그리드의 운용방안

마을형 마이크로그리드의 에너지 자립율이 50%인 경우, 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용되는데, 신재생에너지 전원의 발전용량과 부하조건에 따라 각 수용가에 과전압 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 여기서는 배전계통에 연계되어 있는 마을형 마이크로그리드의 과전압 및 저전압 현상을 해결하고 전압을 안정적으로 유지하기 위한 운용방안을 제시한다. 먼저, 마이크로그리드의 저압측 수용가 전압은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 저압측 수용가 전압은 주상변압기 1차측 전압을 탭 전압에 의해 저압측으로 환산한 값과 저압선로의 전압강하 및 수용가 부하율을 고려하여 산정한다.

$$V_n(t) = (V_{pri,n}(t) \times \frac{V_s}{V_{tap}}) - V_d \times f_c(t) \quad (1)$$

여기서, $V_n(t)$: n번째 구간에서의 수용가 전압[V], $V_{pri,n}(t)$: n번째 구간에서의 주상변압기 1차측 전압

[V], V_d : 저압선로 전압강하, $f_c(t)$: 수용가 부하율

또한, 수용가의 과전압 현상을 해결하기 위한 ESS의 충전 및 방전 동작모드는 Eq. (2)의 조건에 따라 결정된다. 즉, Eq. (1)에서 산정된 저압측 수용가 전압의 최소값 ($V_{min}(t)$)이 목표전압(V_{ref})보다 크면 ESS는 충전 동작 ($\delta(t) = -1$)을 수행하고, 저압측 수용가 전압의 최대값 ($V_{max}(t)$)이 목표전압보다 작으면 방전 동작($\delta(t) = 1$)을 수행한다.

$$\delta(t) = \begin{cases} -1, & \text{if } V_{min}(t) > V_{ref} \\ 1, & \text{if } V_{max}(t) < V_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $\delta(t)$: ESS의 충전 및 방전 동작 모드, $V_{min}(t)$: 저압측 수용가 전압의 최소값, $V_{max}(t)$: 저압측 수용가 전압의 최대값, V_{ref} : 목표전압

한편, ESS의 충전 및 방전동작으로 제어할 수 있는 전압 보상값은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, Eq. (2)에서 결정된 ESS의 충전 및 방전 동작모드에 따라 Eq. (1)에서 산정된 저압측 수용가 전압의 최대값(최소값)과 목표전압의 차로 산정한다.

$$V_{con}(t) = \begin{cases} V_{max}(t) - V_{ref}, & \text{if } \delta(t) = -1 \\ |V_{min}(t) - V_{ref}|, & \text{if } \delta(t) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $V_{con}(t)$: ESS의 전압 보상값[V]

또한, ESS의 전압 보상값은 저압선로의 전압강하 및 수용가 부하율을 고려하여, 주상변압기 탭 전압에 의해 고압측으로 환산하면 Eq. (4)와 같다.

$$V_{ESS}(t) = \{V_{con} + V_f \times f_c(t)\} \times \frac{V_{tap}}{V_s} \quad (4)$$

여기서, $V_{ESS}(t)$: ESS의 전압 보상값을 고압측으로 환산한 값[V]

한편, Eq. (5)는 ESS의 충전 및 방전동작에 의하여 공급 또는 소비되는 전류값으로서, Eq. (4)의 전압 보상값을 고압측으로 환산하여 ESS의 연계구간까지의 선로 저항으로 나누어 산정한다.

$$I_{ESS}(t) = \frac{V_{ESS}(t)}{\sum_{n=1}^{n_s} (R(n) \cdot L(n))} \quad (5)$$

여기서, $I_{ESS}(t)$: ESS의 전류[A], $R(n)$: n번째 구간의 선로 저항[Ω/km], $L(n)$: n번째 구간의 선로 공장 [km], n_α : ESS의 연계구간

한편, ESS의 충전 및 방전동작에 의해 공급 또는 소비 되는 유효전력은 ESS의 전압 보상값을 고압측으로 환산 한 값과 ESS의 전류값을 곱하여, Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = 3 \cdot V_{ESS}(t) \cdot I_{ESS}(t) \quad (6)$$

여기서, $P(t)$: ESS의 유효전력[W]

3.2 계통연계형 마이크로그리드의 운용 알고리즘

상기에서 제시한 운용방안을 바탕으로 계통연계형 마이크로그리드의 운용 알고리즘에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

- [Step 1] 선종 및 공장, 부하용량, 태양광전원 및 ESS의 용량, 설치 위치 등의 배전계통 데이터를 입력한다.
- [Step 2] 모든 수용가 구간에 대하여, Eq. (1)에 의해 저압측 수용가 전압($V_n(t)$)을 계산하고, 저압측 수용가 전압의 최대값($V_{max}(t)$) 및 최소값($V_{min}(t)$)을 산정한다.
- [Step 3] [Step 2]에서 산정한 저압측 수용가 전압의 최대값 및 최소값과 목표전압(V_{ref})을 비교하여, Eq. (2)에 의해 ESS의 충전 및 방전 동작모드를 결정한다.
- [Step 4] [Step 3]에서 결정된 ESS의 충전 및 방전 동작모드를 고려하여 Eq. (3)에 의해 ESS의 전압 보상값($V_{con}(t)$)을 산정하고, Eq. (4)와 같이 고압측으로 환산한다.
- [Step 5] [Step 4]에서 산정된 고압측으로 환산한 ESS의 전압 보상값을 이용하여, ESS의 전류값($I_{ESS}(t)$)과 ESS의 유효전력($P(t)$)을 산정한다.
- [Step 6] 전체 시간대(t_{max})까지 [Step 2]~[Step 5]의 절차를 반복한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 3과 같다.

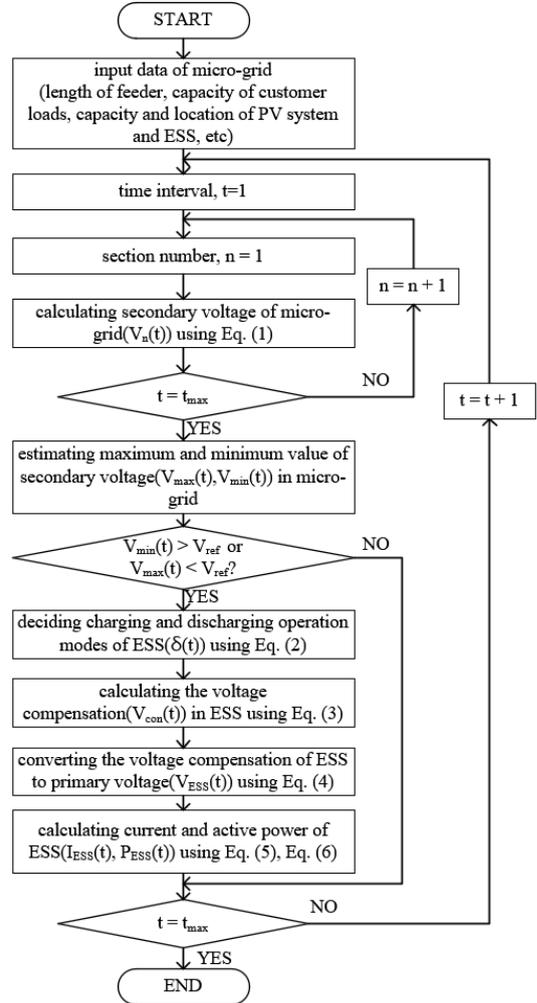


Fig. 3. Operation algorithm of grid-connected micro-grid

3.3 독립형 마이크로그리드의 운용방안

마을형 마이크로그리드의 에너지 자립율이 100%인 경우, 특정 ESS의 CVCF 기능에 의하여 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용될 수 있다. 이때, 계통의 전체 부하량보다 신재생에너지전원의 출력이 큰 경우, CVCF 인버터 내부에서는 Fig. 4와 같이 에너지 sinking 현상이 발생하게 된다[10]. 이 그림에서와 같이, 인버터가 PWM controller의 제어신호에 의하여 정전압 및 정주파수로 운전되는 동안, 신재생에너지전원의 출력이 수용가 부하에 먼저 공급되고 남게 된 에너지는 인버터 내부의 반도체스위치와 환류다이오드를 통하여 DC측으로 유입된다. 그러나 이렇게 전력이 유입되어도 Q1의 다이오

드를 거친 정류전압이 통상 DC 전압보다 높지 않으므로 에너지가 DC 측으로 흘러가지 못하지만, Q2가 스위칭 동작을 할 경우, 출력 측의 L에 의해 승압작용이 일어나므로 DC 전압이 상승하여 잉여전력이 인버터의 AC 측에서 DC 측으로 흡수되는 boost 현상이 일어나게 된다.

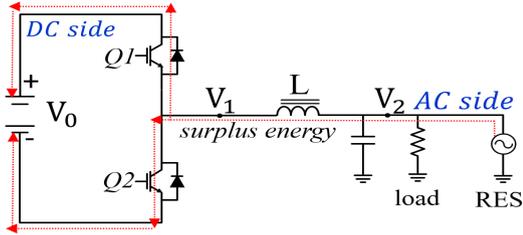


Fig. 4. Concept of energy sinking in single phase half-bridge inverter

한편, Fig. 5는 리튬이온전지의 SOC와 전압과의 상관 관계를 나타낸 것이며, 일반적으로 SOC가 약 85% 내외에서 CV(constant voltage)충전을 하게 되어, 단자전압이 급격히 상승하게 된다. 즉, Micro-grid에서 에너지 sinking이 발생하는 경우, SOC가 85% 보다 적으면 CC(constant current) 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 크게 변동되지 않지만, SOC가 85% 보다 크게 되면 CV 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC 측 전압이 급격하게 상승하여, 인버터가 탈락될 가능성이 있다. 이를 방지하기 위하여, SOC의 운용 한계치 (SOC_M)를 85%로 상정하고, Eq. (7)과 같이 CVCF용 배터리의 운용 한계전압(V_M)을 인버터의 최대 전압에 여유율(η)을 곱하여 산정한다.

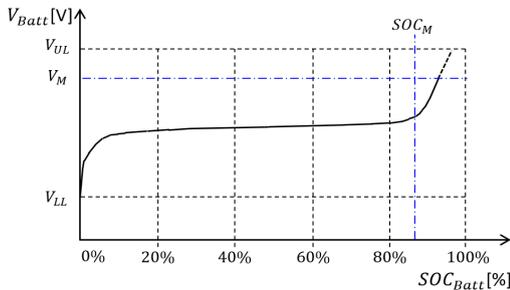


Fig. 5. Voltage characteristics of battery with SOC

$$V_M = V_{LL} + (V_{UL} - V_{LL}) \times \eta \quad (7)$$

여기서, V_M : 배터리의 운용 한계전압, V_{UL} : CVCF 인버터의 상한전압(DC), V_{LL} : CVCF 인버터의 하한전압

(DC), η : 여유율

따라서, 상기에서 산정한 배터리의 운용 한계전압을 바탕으로, 에너지 sinking시에 발생하는 CVCF 인버터용 배터리의 급격한 전압상승을 방지하기 위하여, 적당한 양의 태양광전원의 출력을 순차적으로 차단시켜야 한다. 본 논문에서는 배터리 운용 한계전압을 고려하여 에너지 sinking 크기만큼의 태양광전원을 최소한으로 차단하며, 과도상태 시의 발생하는 에너지 sinking의 크기 ($E_S(t)$)를 구하면 Eq. (8)과 같다.

$$E_S(t) = (P_{PV}(t) - P_{PV-cut}(t)) - P_L(t) \quad (8)$$

여기서, $E_S(t)$: 에너지 sinking의 크기, $P_{PV}(t)$: MG에서의 태양광전원 총 출력, $P_L(t)$: MG에서의 수용가부하 총 소비량, $P_{PV-cut}(t)$: 태양광전원의 차단량

3.4 독립형 마이크로그리드의 운용 알고리즘

상기에서 제시한 독립형 마이크로그리드의 운용 알고리즘에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

- [Step 1] CVCF 인버터의 운용 전압범위와 운용 한계 SOC(SOC_M)를 상정하고, Eq. (7)에 의하여 CVCF 인버터의 운용 한계전압(V_M)을 산정한다.
- [Step 2] 수용가부하의 크기와 태양광전원의 발전용량을 비교하여, Eq. (8)에 따라 에너지 sinking의 크기($E_S(t)$)를 산정한다.
- [Step 3] 에너지 sinking이 발생하면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 6]으로 이동한다.
- [Step 4] 배터리의 SOC($SOC_{batt}(t)$)와 전압($V_{batt}(t)$)이 SOC 운용 한계치(SOC_M)와 운용 한계전압(V_M)보다 큰 경우 [Step 5]로 이동하고, 아니면 [Step 6]으로 이동한다.
- [Step 5] Eq. (8)에 의해 산정된 에너지 sinking의 크기($E_S(t)$)만큼 최소한으로 태양광전원의 발전용량($P_{PV}(t)$)을 제한한다.
- [Step 6] 전체 시간대에 대하여 [Step 1]부터 [Step 5]까지 반복한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 6과 같다.

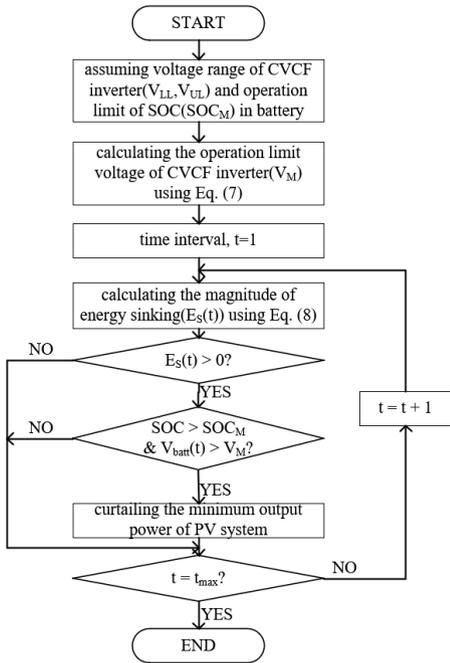


Fig. 6. Operating algorithm of off-grid micro-grid

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 마을형 마이크로그리드의 모델링

4.1 ESS부

ESS부는 Fig. 7과 같이 PCS와 배터리로 모델링 할 수 있다. 여기서, PCS는 비례적분(PI: proportional integral) 제어 알고리즘을 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어를 수행한다. 이때, 목표로 하는 ESS의 전력(유효전력, 무효전력)을 제어하기 위하여, ESS의 출력을 결정하는 dq축의 기준전류($I_{d,ess}^*$, $I_{q,ess}^*$)를 산정한다. 즉, ESS의 목표 전력(P_d^* , Q_q^*)과 측정 값($P_d(t)$, $Q_q(t)$)을 비교하여 오차를 구한 후, 이를 비례적분하여 목표로 하는 dq축의 기준전류를 산정할 수 있다. 여기서, 기준전류는 Eq. (9)와 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있고, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전기능을 수행한다.

$$I_{d,ess}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(P_d^* - P_d(t)) \quad (9)$$

$$I_{q,ess}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (10)$$

여기서, $I_{d,ess}^*$: ESS 출력을 위한 d축 기준전류, $I_{q,ess}^*$: ESS 출력을 위한 q축 기준전류, P_d^* : d축 유효전력 기준값, Q_q^* : q축 무효전력 기준값, $P_d(t)$: d축 유효전력 출력값, $Q_q(t)$: q축 무효전력 기준값

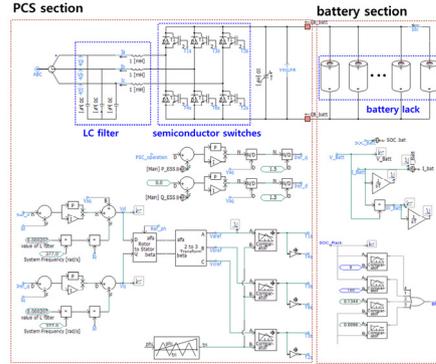


Fig. 7. Modeling of ESS

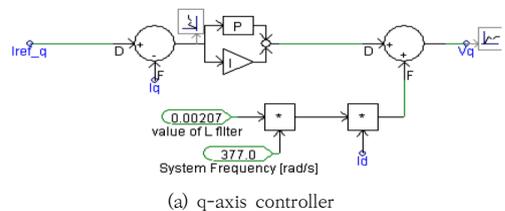
4.2 태양광전원부

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 Eq. (11)과 Eq. (12)와 같고, 이 제어를 모델링하면 Fig. 8과 같다[11]. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (11)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) + I_d \cdot \omega L \quad (12)$$

여기서, V_d , V_q : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_q , I_d : d-q동기좌표계에 의한 계통전류(직류), V_{sq} : 계통의 순시전압



(a) q-axis controller

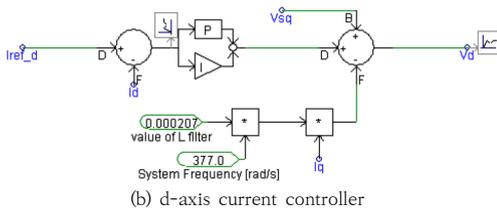


Fig. 8. Modeling of current controller in PV system

4.3 지열발전부

지열발전부는 Fig. 9와 같이, 여자기와 조속기, 등으로 구성된다. 먼저, 여자기를 모델링하면 Fig. 9의 (a)와 같고, 목표로 하는 무효전력을 제어하기 위한 세부적인 전압제어는 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다. 한편, 조속기를 모델링하면 Fig. 9의 (b)와 같고, 터빈의 속도를 제어하여 유효전력의 출력을 결정하는 PI 제어기를 이용한 세부적인 속도제어는 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다.

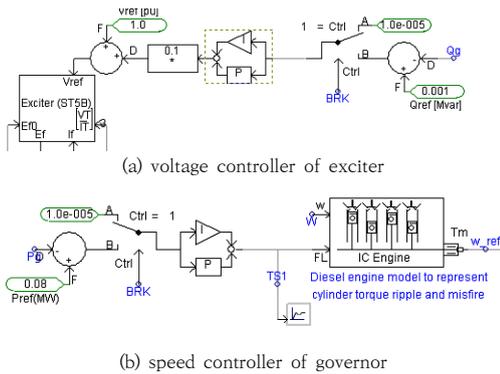


Fig. 9. Modeling of voltage and speed controller in geothermal source

$$V_{ref} = (Q_{ref} - Q_{out}) \cdot (K_p + \frac{K_i}{s}) + V_{ref} \quad (13)$$

$$\omega_{ref} = (P_{ref} - P_{out}) \cdot (K_p + \frac{K_i}{s}) \quad (14)$$

여기서, V_{ref} : 전압기준값, Q_{ref} : 무효전력 기준값, Q_{out} : 무효전력 출력값, V_{out} : 발전기 출력전압, ω_{ref} : 터빈의 속도 기준값, P_{ref} : 유효전력 기준값, P_{out} : 유효전력 출력값

4.4 CVCF 인버터부

CVCF 인버터부는 제어기와 인버터로 구성된다. 구체

적으로, 제어기에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성을 빠르게 수행하기 위하여, Eq. (15)와 같이 PI제어 알고리즘을 이용한다. 여기서, Eq. (15)의 첫 번째 항은 목표전압(V_{ref})과 현재 출력전압($V(t)$)의 차를 고려하여 비례제어신호를, 두 번째 항은 오차를 누적하여 적분제어신호를 산정한다. 세 번째 항은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 제어신호를 나타낸다. 한편, Eq. (16)은 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, Eq. (15)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(pulse width modulation) 신호로 변환된다[10].

$$Wave_{ref}(t) = \left[K_p \left(1 - \frac{V(t)}{V_{ref}} \right) + K_i \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{V(\tau)}{V_{ref}} \right) d\tau \right] \cdot \sin(2\pi ft + \phi) \quad (15)$$

$$Wave_{carrier}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\omega t}{(2n-1)^2} \quad (16)$$

여기서, $Wave_{ref}(t)$: 기준 파형, K_p : 비례 계수, K_i : 적분 계수, $V(t)$: 현재 전압, V_{ref} : 목표전압, f : 목표 주파수, ϕ : 목표 위상

상기의 Eq. (14)와 Eq. (15)를 바탕으로, CVCF 인버터의 한 상에 대한 제어부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 Fig. 10과 같다. 여기서, A부분은 목표전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차 값을 산정하는 것이고, B부분은 오차 값에 대하여 각각 PI제어를 수행하는 것이며, C부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 것을 나타낸다. 또한, D부분은 삼각파의 반송파를 출력하고, E부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환하는 것을 나타낸다.

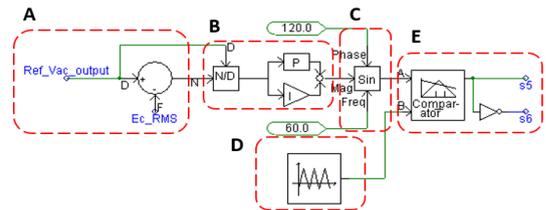


Fig. 10. Modeling of voltage and frequency controller in CVCF inverter

4.5 계통연계형 마이크로그리드의 모델링

계통연계형 마이크로그리드는 Fig. 11과 같이, 배전 계통부와 마을형 마이크로그리드로 구성된다. 여기서, Fig. 11의 ① 부분은 배전계통부, ② 부분은 마을형 마이크로그리드를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, ① 부분은 배전용 변전소와 고압배전선으로 구성되고, ② 부분은 4개의 소규모 마이크로그리드와 수용가 부하로 구성된다. 여기서, Fig. 11의 ②부분에서 section A와 B, E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, section C는 수용가부만으로 이루어지며, section D는 수용가부와 지열발전부로 구성된다.

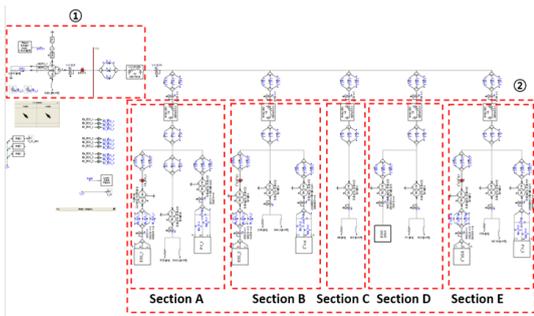


Fig. 11. Modeling of grid-connected micro-grid

4.6 독립형 마이크로그리드의 모델링

독립형 마이크로그리드는 Fig. 12와 같이, 한전 계통과 독립적으로 마을형 마이크로그리드만으로 구성된다. 여기서, section A는 CVCF인버터부와 CVCF용 배터리부, 태양광전원부, 수용가부, 등으로 구성되어 마이크로그리드의 전압을 안정적으로 유지한다. 한편, section B ~ section E는 상기의 계통연계형 마이크로그리드와 동일하게 구성된다.

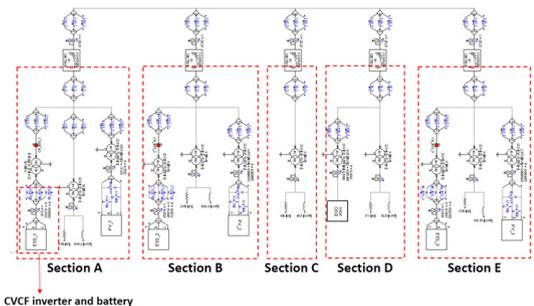


Fig. 12. Modeling of off-grid micro-grid

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용되는 마을형 마이크로그리드의 운용 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전선로의 선종은 ACSR 160 [mm²], 공장은 20 [km]로 상정한다. 한편, 마이크로그리드는 5개의 section으로 구성하며, 각 section의 수용가 부하 및 태양광전원, ESS, 지열발전, 등의 용량은 실증 모델계통을 상정한다.

Table 1. Simulation conditions of grid-connected micro-grid

items		contents
distribution substation	rated capacity	100[MVA]
	winding connection	Yg-Yg-Δ
distribution feeder	type	ACSR 160 [mm ²]
section A	customer load	750 [kW], 363.2 [kvar]
	PV system	3,100 [kW]
	ESS	550/2,210 [kW/kWh]
section B	customer load	430 [kW], 208.3 [kvar]
	PV system	1,500 [kW]
	ESS	450/1,743 [kW/kWh]
section C	customer load	20 [kW], 9.7 [kvar]
section D	customer load	34.2 [kW], 16.6 [kvar]
	geothermal source	267 [kW]
section E	customer load	350 [kW], 169.5 [kvar]
	PV system	2,000 [kW]
	ESS	500/2,000 [kW/kWh]

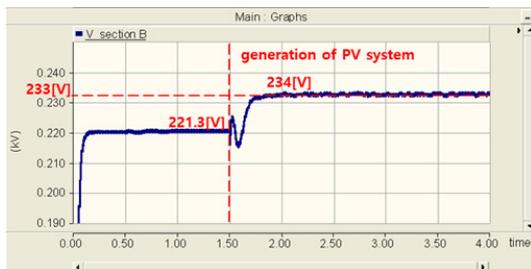
또한, 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용되는 마을형 마이크로그리드의 시뮬레이션 조건은 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, CVCF 인버터용 배터리의 운용 한계 SOC는 85%이고, 운용 한계전압은 611.8[V]로서 인버터 최대 전압의 약 95%의 여유율을 산정한 것이다.

Table 2. Simulation conditions of off-grid micro-grid

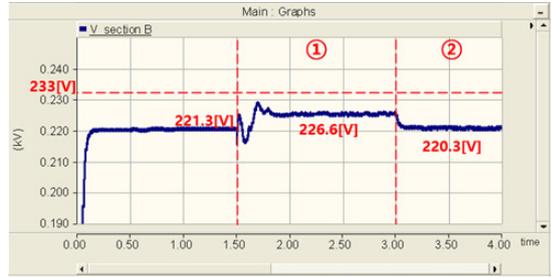
items		contents
battery system	range of operation voltage	408.2 ~ 611.8 [V]
	operation limit of SOC	85 [%]
CVCF inverter	range of operation voltage	410 ~ 610 [V]
	rated capacity	500 [kW]
	maximum operation voltage	600[V]

5.2 계통연계형 마이크로그리드의 운용 특성

5.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로 계통 연계형 마이크로그리드의 전압 변동특성은 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 13의 (a)는 태양광전원이 연계된 전압 변동특성, (b)는 제안한 알고리즘을 바탕으로 ESS를 운용하였을 때의 전압 변동특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원의 역조류에 의하여 section B의 수용가 전압은 220.9[V]에서 233.3[V]으로 상승하여 과전압 현상이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 13 (b)의 ①번 구간은 기존에 설치된 ESS를 제시한 알고리즘에 따라 운용한 전압 변동특성을 나타낸 것이며, ②번 구간은 제시한 알고리즘에서 산정된 유효전력을 바탕으로 ESS를 추가 설치하였을 때의 전압 변동특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원의 역조류에 의해 수용가 전압이 상승하면 기존에 설치된 ESS의 충전 동작으로 인해 과전압 현상이 해소되는 것을 알 수 있다. 또한, 제시한 알고리즘에 따라 약 500[kW]의 ESS를 추가로 설치하여 운용하면, section B의 수용가 전압을 220.3[V]로 감소시켜 표준전압에 가깝게 마이크로그리드를 안정적으로 운용할 수 있음을 알 수 있다.



(a) PV system



(b) proposed algorithm

Fig. 13. Operation characteristics of customer voltage in section B

한편, Table 3은 각 section의 수용가 전압 변동특성을 나타낸 것이다. 여기서, 수용가 전압은 최소 220.3[V]에서 최대 222.3[V]로 나타나며, 태양광전원의 역조류에 의해 수용가 전압은 233.3[V]에서 234.8[V]로 상승하여 모든 section의 수용가에서 과전압 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서 제시한 알고리즘에 따라 기존에 설치된 ESS를 운용하면, 수용가 전압은 최소 226.2[V]에서 최대 227.5[V]로 유지되어 과전압 현상을 해소할 수 있고, ESS를 추가로 설치하여 운용하면 수용가 전압은 최소 220.3[V]에서 최대 222.2[V]로 감소하여 마이크로그리드의 전압을 안정적으로 유지할 수 있어, 제안한 알고리즘의 유용성을 알 수 있었다.

Table 3. Voltage characteristics of grid-connected micro-grid

section	customer voltage without PV [V]	customer voltage with PV [V]	customer voltage with ESS[V]	customer voltage by proposed algorithm [V]
A	220.9	233.6	226.5	220.5
B	220.3	233.3	226.2	220.3
C	222.3	233.8	227.4	221.9
D	222.2	233.8	227.5	222.2
E	221.3	234	226.6	221.0

5.3 독립형 마이크로그리드의 운용 특성

5.1절에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로 독립형 마이크로그리드의 운용 특성은 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 14의 (a)는 마이크로그리드에서 발생하는 에너지 sinking의 크기를 나타낸 것이고, (b)는 CVCF용 배터리의 전압특성을 나타낸 것이다. 이

그림에서와 같이, 에너지 sinking의 크기가 증가함에 따라, CVCF 인버터용 배터리의 전압이 운용한계 전압을 초과하여 CVCF 인버터가 탈락되는 것을 알 수 있다. 따라서, SOC가 90% 이상인 경우, 에너지 sinking을 방지할 수 있는 적절한 조치가 필요함을 알 수 있다.

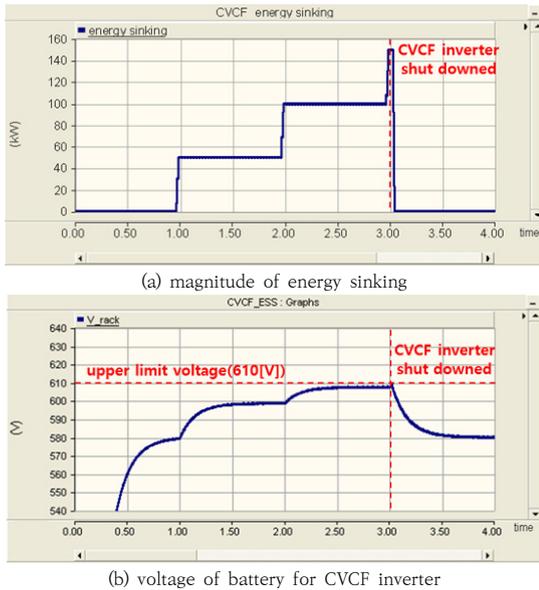


Fig. 14. Operation characteristics of off-grid micro-grid

한편, 본 논문에서 제시한 알고리즘에 의한 독립형 마이크로그리드의 운용 특성은 Fig. 15와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 15의 (a)는 마이크로그리드에서 발생하는 에너지 sinking의 크기를 나타낸 것이고, (b)는 CVCF용 배터리의 전압특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 100[kW]의 에너지 Sinking이 발생하면, CVCF 인버터용 배터리 전압은 운용 한계전압인 600[V]에 도달하게 된다. 이때, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 최소한의 용량으로 차단하면, 에너지 sinking 크기와 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 동시에 단계적으로 감소됨을 알 수 있다. 즉, 배터리 전압이 인버터의 운용전압 범위(410 ~ 610[V])를 벗어나지 않고, 마이크로그리드의 전압이 안정적으로 유지되어, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.

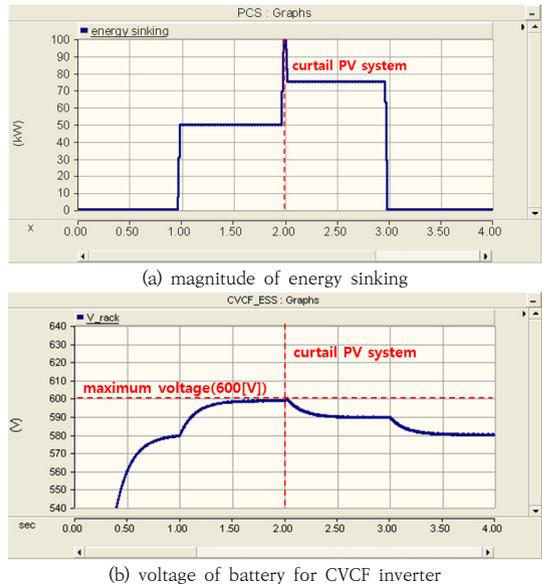


Fig. 15. Operation characteristics with proposed algorithm

한편, Table 4는 독립형 마이크로그리드의 운용특성을 나타낸 것이다. 여기서, 기존의 방식의 경우 150[kW]의 에너지 sinking이 발생하면 CVCF 배터리의 전압이 인버터의 운용전압 범위를 초과하여, CVCF 인버터의 탈락이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 제한한 알고리즘의 경우 100[kW]의 에너지 sinking이 발생하면 CVCF 인버터용 배터리의 전압은 운용 한계전압인 600[V]에 도달하게 된다. 이때, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 최소한의 용량인 25[kW]만큼 차단하면 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 CVCF 인버터의 운용 전압 범위를 벗어나지 않고 마이크로그리드의 전압이 안정적으로 유지되어, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.

Table 4. Operation characteristics of off-grid micro-grid

items	magnitude of energy sinking [W]	voltage of battery for CVCF inverter [V]	curtailment of PV system [W]
existing method	150	610 (shut down of CVCF inverter)	-
proposed algorithm	100	600	25

6. 결론

본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 자립율에 따른 마을형 마이크로그리드의 운용 방안 및 운용 알고리즘을 제시한다. 이에 대한 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 마을형 마이크로그리드가 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용되는 경우, 태양광전원의 역조류에 의해 수용가 전압은 233.3[V]에서 234.8[V]로 상승하여 마이크로그리드의 모든 수용가에서 과전압 현상이 발생함을 확인하였다.
- (2) 본 논문에서 제시한 알고리즘에 따라 기준에 설치된 ESS를 운용하면, 수용가 전압은 최소 226.2[V]에서 최대 227.5[V]로 유지되어 과전압 현상을 해소할 수 있고, ESS를 추가로 설치하여 운용하면 수용가 전압은 최소 220.3[V]에서 최대 222.2[V]로 감소시켜, 표준전압에 가깝게 마이크로그리드의 전압을 안정적으로 유지할 수 있어, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.
- (3) 마을형 마이크로그리드가 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용되는 경우, 에너지 sinking의 크기가 증가함에 따라, CVCF 인버터용 배터리의 전압이 운용한계 전압을 초과하여 CVCF 인버터가 탈락되는 것을 확인하였다.
- (4) 본 논문에서 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 순차적으로 차단하면, 배터리 전압이 인버터의 운용전압 범위(410 ~ 610[V])를 벗어나지 않고, 마이크로그리드의 전압이 안정적으로 유지되어, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.
- (5) 본 논문에서 제시한 마을형 마이크로그리드를 바탕으로 에너지 자립율에 따른 마을형 마이크로그리드의 보호협조 운용 방안에 관한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] Al-Ismail, Fahad Saleh. "DC microgrid planning, operation, and control: a comprehensive review." IEEE Access 9 (2021): 36154-36172. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062840>
- [2] J.M Kim, H.D Lee, D.H Tae, D.S Rho. "A Study on Fault Analysis Modeling of 5kV MV-LVDC Off-grid Micro Grid System.", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,22(9),745-753. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.745>
- [3] Muhtadi, Abir, et al. "Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability." IEEE Transactions on Industry Applications 57.3 (2021): 2223-2235. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIA.2021.3065329>
- [4] J.M. Kim, H.D. Lee, B.G Han, D.S Rho. "A Study on Operation Method of Protection Coordination in 5kV MV-LVDC Off-grid Micro-grid System.", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers,71(1),45-54. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.1.045>
- [5] Amin Khodaei, Mohammad Shahidehpour, Jaeseok Choi. "Optimal Hourly Scheduling of Community-Aggregated Electricity Consumption". Journal of Electrical Engineering & Technology,8(6),1251-1260. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2013.8.6.1251>
- [6] L. Che, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab and Y. Al-Turki, "Hierarchical Coordination of a Community Microgrid With AC and DC Microgrids." IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 3042-3051. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2015.2398853>
- [7] S.Y Lee, H.D Lee, D.H Tae, D.S Rho. "Evaluation algorithm for Hosting Capacity of PV System using LDC Method of Step Voltage Regulator in Distribution Systems.", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,21(7), 20-28. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.7.20>
- [8] B.K Kim, K.Y Kim, J.G Lee, S.S Choi, D.S Rho. "A Study on the Modeling of Step Voltage Regulator and Energy Storage System in Distribution System Using the PSCAD/EMTDC.", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,16(2),1355-1363. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.2.1355>
- [9] Y.H Nam, S.S Choi, M.K Kang, H.D Lee, J.H Park, D.S Rho. "A Study on the Large-scale Adoption Method of Distribution System Interconnected with PV System by Energy Storage System." The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers,67(8), 1031-1039. DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1031>
- [10] H.D Lee, S.S Choi, Marito Ferreira, J.H Park, D.S Rho. "A Study on Transient Operation Characteristics of 30kW Scale CVCF Inverter based Micro-grid.", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,20(10), 18-25. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.10.18>
- [11] B.K Kim, K.S Ryu, C.H Kim, D.S Rho, "A Study on the Customer Voltage Characteristic of Distribution System with Large Scale PV", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.62, No.1, pp. 29-36, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.62.1.029>

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 기 영(Ki-Young Kim)

[정회원]



- 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학전공 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학전공 박사과정
- 2020년 4월 ~ 현재 : 한국화학융합시험연구원 재직

<관심분야>

신재생에너지, 보호협조, 스마트그리드, MVDC

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자계어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

이 세 연(Se-Yeon Lee)

[정회원]



- 2015년 8월 : 한양대학교 공학대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(박사수료)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 전기제어과 교수

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드