

계통연계형 마을단위 마이크로그리드의 보호협조 운용방안에 관한 연구

이나경¹, 김지명¹, 김경화¹, 김윤호¹, 이일무², 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교 전기공학과, ²한국전기기술인협회

A Study on Operation Method of Protection Coordination in Grid-connected Community Micro-grid System

Na-Kyung Lee¹, Ji-Myung Kim¹, Kyung-Hwa Kim¹,
Yun-Ho Kim¹, Il-Moo Lee², Dae-Seok Rho^{1*}

¹Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
²Korea Electric Engineers Association

요약 최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역단위의 에너지 자립을 확보를 위한 마을단위 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다. 여기서, 에너지 자립율이 50%인 경우 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있는데, 이때 사고 발생 위치와 유형에 따라 사고전류의 크기와 방향이 상이하기 때문에, 이를 고려한 적절한 보호기기의 운용방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 계통연계형 마이크로그리드의 배전계통 측 보호기기와 마이크로그리드 측 보호기기 간의 원활한 보호협조 수행을 위하여, 사고 위치 및 유형을 고려한 보호협조 운용알고리즘을 제시한다. 한편, 마이크로그리드에서 3상 단락 및 1선 지락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 지열발전기, 수요관리용 ESS 등으로 구성된 계통연계형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링과 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 바탕으로 보호기기 동작특성을 분석한 결과, 모든 시나리오에서 필요한 최소 협조 시간차 이상을 유지할 수 있어, 본 논문에서 제시한 보호협조 운용방안에 의하여 계통연계형 마이크로그리드를 안정적으로 운용할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract Micro-grid research is being performed due to installation of renewable energy sources and ESSs, and demonstration projects on a community micro-grid for the self-energy supply rate are being carried out in Jeollanam-do province in South Korea. A community micro-grid may be operated as a type of grid-connected micro-grid when the self-energy supply rate is 50%. An operation method for protection devices is required because the magnitude and direction of the fault current may be changed depending on the location and type of the fault. Therefore, this paper proposes an operation algorithm for protection devices that considers the location and type of the fault in order to properly perform protection coordination in grid-connected micro-grid. We modeled a grid-connected micro-grid, which was composed of an ESS, PV system, and geothermal plant, and we used PSCAD/EMTDC S/W in order to analyze the fault current characteristics in the case of a short circuit and single-line ground faults. The simulation results confirmed that the proposed algorithm is useful to operate protection devices in a grid-connected micro-grid because the coordination time intervals were properly obtained.

Keywords : Grid-connected Micro-grid, Contingency Fault Analysis, PSCAD/EMTDC, Operation Algorithm, Protection Devices, Off-DAS, Protection Coordination

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20213030160080), 에너지 소비대체를 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터).

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

Received November 27, 2023

Revised January 3, 2024

Accepted January 5, 2024

Published January 31, 2024

1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 분산에너지 생산 및 소비 체계 구축을 위한 마을단위 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다[1-3]. 여기서, 에너지 자립율이 50%인 경우 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있는데, 이때 사고 발생 위치와 유형에 따라 사고전류의 크기와 방향이 상이하기 때문에, 이를 고려한 적절한 보호기기의 운용방안이 필요한 실정이다[4-6]. 특히, 배전용 변전소 측 보호기기와 사고 지점 측 보호기기 간의 협조를 고려하지 않고 운용할 경우, 사고발생 시 고압 선로 측 보호기기가 먼저 동작함으로써 정전기간이 확대되어 주변 수용가 또는 민간 발전사업자에게 설비 손상이나 재산적 피해를 줄 가능성이 있으므로, 안정적인 보호협조를 위한 보호기기의 운용방안이 요구되고 있다[7-9].

따라서, 본 논문에서는 계통연계형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 사고 발생 위치와 유형에 따른 사고전류의 크기와 방향을 고려한 보호협조 운용방안을 제시한다. 또한, 마이크로그리드의 고압 배전선로에서 3상 단락 및 1선 지락사고가 발생하는 상정사고 시나리오를 바탕으로 사고특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 지열발전기, 수요관리용 ESS 등으로 구성된 계통연계형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링과 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 바탕으로 보호기기의 동작특성을 분석한 결과, 모든 시나리오에서 배전용 변전소의 과전류계전기(over current relay, OCR), 및 지락과전류계전기(over current ground relay, OCGR)와 배전선로 리클로저 간의 협조 시간차를 10cycle 이상 유지하며, 배전선로 리클로저와 마이크로그리드 고객계전기 간의 협조 시간차를 6cycle 이상 확보하여, 본 논문에서 제시한 보호협조 운용방안에 의하여 계통연계형 마이크로그리드를 안정적으로 운용할 수 있음을 알 수 있다.

2. 계통연계형 마이크로그리드의 구성

지역 단위의 신재생에너지의 생산 및 소비 체계를 구

축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을단위 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용될 수 있다[10]. 여기서, 계통연계형 마이크로그리드는 에너지 자립율이 50%인 경우이며 Fig. 1과 같이, 4개의 소규모 마이크로그리드 등으로 구성된다. 이때, Section A와 B, E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, Section C는 수용가부만으로 이루어지며, Section D는 수용가부와 지열발전기부로 구성된다. 한편, 태양광전원 및 지열발전기는 수용가 부하의 소비를 대체하고 잉여전력을 ESS에 충전하거나 타 수용가에 공급하는 등의 역할을 하여, 배전계통으로부터 마이크로그리드의 에너지 자립율을 확보한다. 또한, ESS는 신재생에너지 전원이거나 배전계통으로부터 수전하는 전력으로 충전하여 기후 의존도가 높은 신재생에너지 전원을 대신해서 수용가 부하에 에너지를 공급하거나, 피크 부하 시간에 방전하여 경제성을 확보하는 등의 역할을 한다. 한편, 이러한 계통연계형 마이크로그리드에서는 사고 위치와 유형에 따라 사고전류의 크기와 방향이 상이하기 때문에, 이를 고려한 적절한 보호기기의 운용방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 계통연계형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 상정사고 시나리오를 바탕으로 사고전류의 크기와 방향을 고려한 보호협조 운용방안을 제시한다.

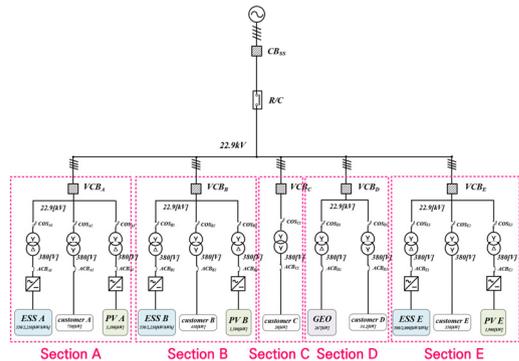


Fig. 1. Configuration of grid-connected micro-grid

3. 계통연계형 마이크로그리드의 보호협조 운용방안

3.1 고압 배전선로 사고전류 특성

계통연계형 마이크로그리드의 고압 배전선로에서 사고가 발생할 경우의 사고전류 흐름을 나타내면 Fig. 2와

같다. 여기서, 사고발생 지점(F_B)으로 유입되는 전류는 배전용 변전소에서 공급되는 사고전류(①), 사고가 발생하지 않은 Section(A,D,E)에서 공급되는 사고전류(②), 사고가 발생한 Section B의 ESS와 태양광전원에서 공급되는 사고전류(③)로 구성된다. 이때, 배전용 변전소에서 대부분의 사고전류가 공급되기 때문에, 변전소와 고압 배전선로의 보호협조를 고려하지 않는 경우, 고압 선로 측 보호기기가 먼저 동작하여, 정전구간이 확대될 가능성이 있다. 따라서, 배전용 변전소 측의 OCR 및 OCGR과 고압 배전선로 측의 리클로저는 각 설치지점의 사고전류의 크기와 방향을 고려하여 정정치를 산정해야 한다. 또한, 한전의 기술기준에 의하면, 전위 보호기기가 리클로저이고 후비 보호기기가 변전소 계전기일 경우, 최소 협조 시간차는 10cycle 이상을 유지해야 하며, 전위 보호기기가 고객계전기, 후비 보호기기는 리클로저일 경우, 최소 협조 시간차는 6cycle 이상 유지하도록 정정치를 산정해야 한다[11].

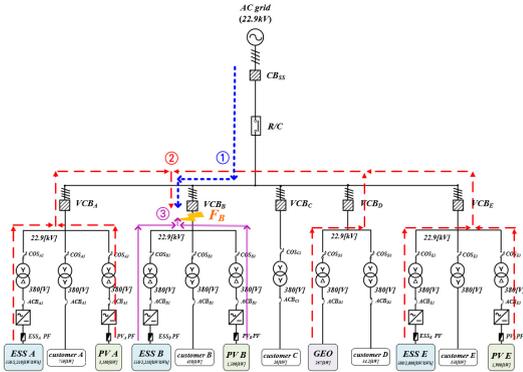
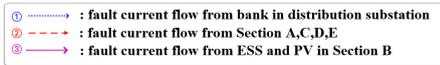


Fig. 2. Flow of fault current in distribution line

3.2 배전계통 보호기기 정정방안

3.2.1 변전소 계전기의 정정치 산정

일반적으로 배전용 변전소 계전기의 OCR과 OCGR은 한전의 보호협조 정정지침에 따라 동작시간이 결정되는데, CT 비, 순시탐, 한시탐에 의하여 정정치를 산정한다[12]. 먼저, 계전기의 CT비는 선로용량에 대한 정격전류에 1.5배를 하여 계산할 수 있는데, 이를 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$CTratio = \frac{P_{MG}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times 1.5 \quad (1)$$

Where, P_{MG} : rated capacity of distribution substation

또한, 단락과 지락에 대한 순시탐은 전위 보호기기(리클로저) 설치지점의 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락전류의 1.4배 이상으로 산정하며, 이를 나타내면 Eq. (2)와 같다.

$$instantaneous = I_F \times K \times CTratio \quad (2)$$

Where, I_F : fault current(short circuit, single line ground), K : constant value of instantaneous tap by fault types (short circuit: 1.5, single line ground fault: 1.4)

한편, 단락과 지락에 대한 한시탐은 회선당 운전전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 산정하며, 이를 나타내면 Eq. (3)과 같다.

$$time\ delay\ tap = \frac{P_{MG}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times K \times CTratio \quad (3)$$

Where, K : constant value of time delay tap by fault types (short circuit: 1.5, single line ground fault: 1.4)

3.2.2 배전선로 리클로저의 정정치 산정

순시동작과 지연동작 특성을 가지는 리클로저의 단락시 최소동작전류는 Eq. (4)와 같이 최대부하전류의 2.8배 이상 4.0배 이하로 산정한다. 또한, 지락에 대한 최소동작전류는 Eq. (5)와 같이 최대부하전류의 0.3배로 산정하지만, 선로의 부하 불평형 전류를 고려하여 정정치를 산정한다.

$$I_{OP}(P) = 2.8 \times I_{MAX} \leq I_{OP} \leq 4 \times I_{MAX} \quad (4)$$

$$I_{OP}(G) = I_{MAX} \times 0.3 \quad (5)$$

Where, I_{OP} : minimum operation current of protection device, I_{MAX} : maximum current

3.2.3 마이크로그리드 고객계전기의 정정치 산정

마찬가지로, 마이크로그리드의 각 고객계전기의 OCR과 OCGR도 단락과 지락에 대한 순시탭 및 한시탭을 산정해야 한다. 먼저, 계전기의 CT비는 Eq. (6)과 같이 소규모 마이크로그리드의 정격용량을 기준으로 정격전류의 1.5배로 산정할 수 있다. 또한, 단락과 지락에 대한 순시탭은 Eq. (7)과 같이 보호기기 설치지점의 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락전류의 1.4배로 산정한다. 한편, 단락과 지락에 대한 한시탭은 최대부하전류의 0.15배 및 3배를 기준으로 정정하며, 이를 나타내면 Eq. (8)과 같다.

$$CTratio = \frac{P_{MG,section}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times 1.5 \quad (6)$$

$$instantaneous = I'_F \times K \times CTratio \quad (7)$$

$$time\ delay\ tap = \frac{P_{MG,section}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times K \times CTratio \quad (8)$$

Where, $P_{MG,section}$: rated capacity of section in each micro-grid

3.3 보호협조 운용알고리즘

상기에서 제시한 보호기기 정정 방법을 바탕으로 계통연계형 마이크로그리드의 보호협조 운용알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 계통연계형 마이크로그리드의 사고특성을 분석하기 위하여, 계통해석 프로그램을 이용하여 배전용변전소, 배전선로, ESS, 신재생에너지 전원 등으로 구성된 마이크로그리드의 모델링을 수행한다.

[Step 2] 계통연계형 마이크로그리드에서 발생할 수 있는 다양한 사고에 대한 보호기기의 동작 특성을 분석하기 위하여, 다음과 같이 사고종류(*fault k*)를 상정한다.

- *fault* 1~5 : 마이크로그리드 고압 배전선로의 $F_A \sim F_E$ 의 3상 단락사고
- *fault* 6~7 : 마이크로그리드 고압 배전선로의 $F_A \sim F_E$ 의 1선 지락사고

[Step 3] 상기의 모델링을 바탕으로 사고종류별(*fault k*)로 배전용 변전소 측 보호기기($d_{dl,p}$)와 마이크로그리드측 보호기기($d_{MG,q}$)에서 나타나는 사고전류($I_{k,p}$, $I_{k,q}$)를 각각 산정한다.

[Step 4] 상기의 사고전류를 바탕으로 배전용 변전소, 배전선로 리클로저, 마이크로그리드 고객계전기의 OCR 및 OCGR 등에 대하여, CT비, 순시탭, 한시탭, 레버, 최소 동작전류, 동작 특성곡선 등의 보호기기 정정치를 산정한다.

[Step 5] 각 보호기기($d_{dl,p}$, $d_{MG,q}$) 설치지점의 사고전류($I_{k,p}$, $I_{k,q}$)가 설정된 최소 동작전류보다 큰 경우, 해당 사고에 대하여 Eq. (9)와 같이 배전계통 측 보호기기 동작시간(T_p^k)과 마이크로그리드 측 보호기기 동작시간(T_q^k)에 의하여 협조 시간차($T_{p,q}^k$)를 산정하고, 보호협조 운용의 적정성을 평가한다.

$$T_{b,q}^k = T_p^k - T_q^k \quad (9)$$

Where, T_p^k : operation time of the backup relay, T_q^k : operation time of the forward relay, $T_{p,q}^k$: coordination time interval

[Step 6] [Step 5]에서 협조 시간차를 만족하지 못하는 경우, [Step 4]로 가서 보호기기의 정정치를 재산정한다. 따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

4. PSCAD/EMTDC에 의한 계통연계형 마이크로그리드의 모델링

4.1 ESS부

ESS부는 Fig. 4와 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 비

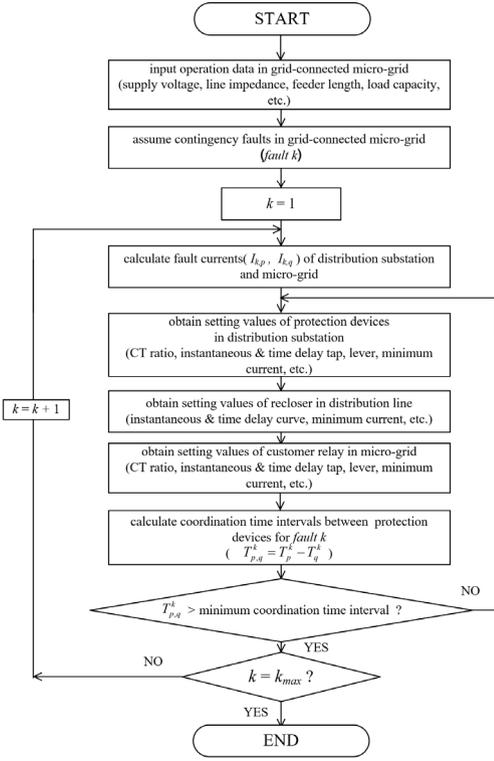


Fig. 3. Operation algorithm of protection devices in grid-connected micro-grid

교하여 오차를 구한 후, 이를 비례적분하여 목표로 하는 dq축의 기준전류를 산정할 수 있다. 즉, 기준전류는 Eq. (10)과 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있고, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전기능을 수행한다.

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (10)$$

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (11)$$

where, $I_{d,ess}^*$: d component of reference current of ESS, $I_{q,ess}^*$: q component of reference current of ESS, K_p : proportional gain, K_i : integral gain, P_d^* : d component of reference active power, $P_d(t)$: d component of actual active power, Q_q^* : q component of reference reactive power, $Q_q(t)$: q component of actual reactive power

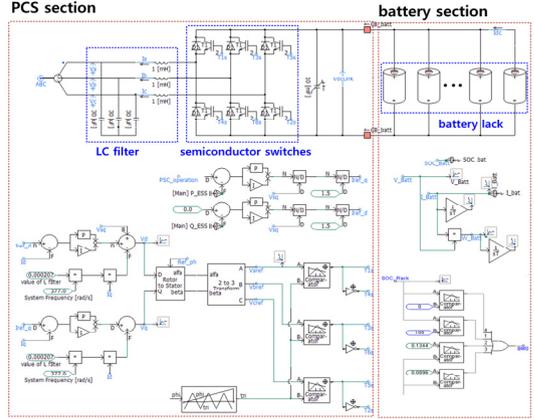


Fig. 4. Modeling of ESS

4.2 태양광전원부

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 Eq. (12)와 Eq. (13)과 같고, 이 제어기를 모델링하면 Fig. 5와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (12)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (13)$$

Where, V_d, V_q : output voltage of d-q axis, I_{ref-dq} : reference current of inverter in d-q axis, I_q, I_d : output current of d-q axis, V_{sq} : instantaneous voltage of output terminal

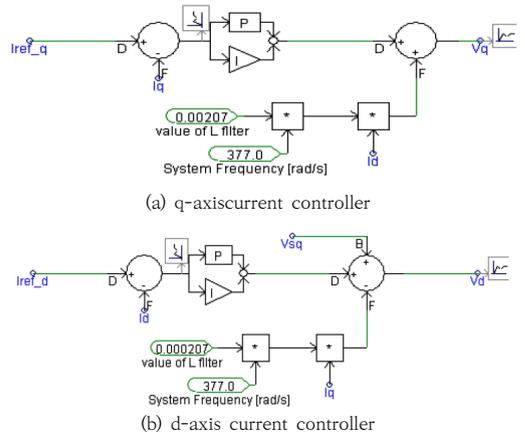
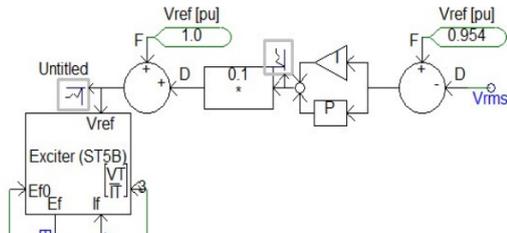


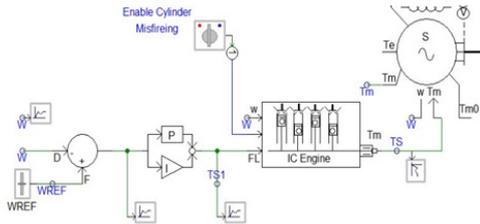
Fig. 5. Modeling of current controller in PV system

4.3 지열발전기부

지열발전기부는 Fig. 6과 같이, 여자기와 조속기, 등으로 구성된다. 먼저, 여자기를 모델링하면 Fig. 6의 (a)와 같고, 목표로 하는 무효전력을 제어하기 위한 세부적인 전압제어는 Eq. (14)과 같이 나타낼 수 있다. 한편, 조속기를 모델링하면 Fig. 6의 (b)와 같고, 터빈의 속도를 제어하여 유효전력의 출력을 결정하는 PI 제어를 이용한 세부적인 속도제어는 Eq. (15)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) voltage controller of exciter



(b) speed controller of governor

Fig. 6. Modeling of voltage and speed controller in geothermal plant

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

$$\omega_{ref} = (P_{ref} - P_{out}) \cdot (K_p + \frac{K_i}{s}) \quad (15)$$

Where, V_{ref} : reference voltage, Q_{ref} : reference reactive power, Q_{out} : reactive power output, V_{out} : generator output voltage, ω_{ref} : reference turbine speed, P_{ref} : reference active power, P_{out} : active power output

4.4 전체 시스템

계통연계형 마이크로그리드는 Fig. 7과 같이, 배전계통부와 마을단위 마이크로그리드로 구성된다. 여기서, 배전계통부는 배전용 변전소와 고압 배전선로, 마을단위 마이크로그리드는 4개의 소규모 마이크로그리드 등으로

구성된다. 한편, Section A와 B, E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, Section C는 수용가부만으로 이루어지며, Section D는 수용가부와 지열발전기부로 구성된다.

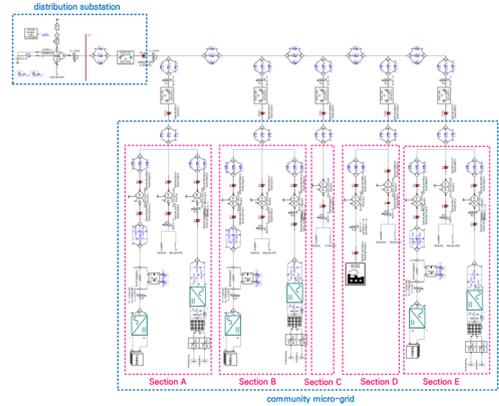


Fig. 7. Modeling of entire system

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

상기의 모델링을 바탕으로 계통연계형 마이크로그리드의 사고해석을 위한 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 여기서, 배전용 변전소의 용량과 배전선로, 각 Section의 수용가 부하 및 태양광전원, ESS, 지열발전기, 등의 용량은 실제계를 바탕으로 상정하고, 에너지 자립율은 50%를 고려한다. 또한, 사고 시나리오는 Fig. 8과 같이 각 Section의 고압 배전선로인 $F_A \sim F_E$ 지점의 3상 단락 및 1선 지락사고로 상정한다.

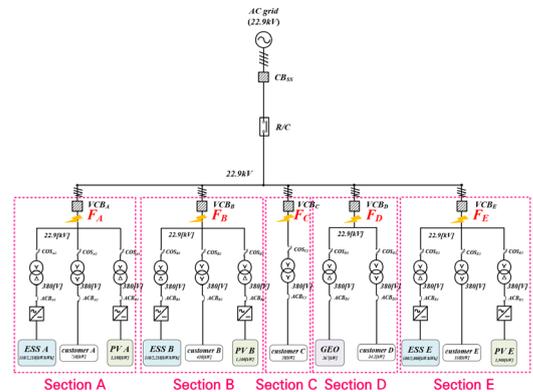


Fig. 8. Contingency fault scenarios

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

items		contents
distribution substation	rated capacity	60[MVA]
	winding connection	Yg-Yg-Δ
distribution feeder	type	ACSR 160 [mm ²]
Section A	customer load	750 [kW], 363.2 [kvar]
	PV system	700 [kW]
	ESS	550/2,210 [kW/kWh]
Section B	customer load	430 [kW], 208.3 [kvar]
	PV system	400 [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 resource	267 [kW]
Section E	customer load	350 [kW], 169.5 [kvar]
	PV system	300 [kW]
	ESS	500/2,000 [kW/kWh]

5.2 배전계통 및 마이크로그리드 보호기기의 정정치 산정

3.2의 보호기기 정정치 산정방안에 의하여, 배전용 변전소 계전기와 배전선로 리클로저, 마이크로그리드 고객 계전기의 OCR 및 OCGR 등의 정정치를 구하면 Table 2와 같다. 여기서, 계전기는 CT비, 한시탭, 순시탭, 레버 값을 산정하고, 리클로저는 N2, N4 곡선을 대상으로 산정한 값이다.

Table 2. Setting values of protection devices

installation location	CT ratio	OCR			OCGR		
		time delay tap	instantaneous tap	lever	time delay tap	instantaneous tap	lever
distribution substation	100/5	4.5	81	6.5	0.9	61.6	6.5
recloser	minimum current: 400[A], 180[A]						
Section A	40/5	3.75	34.8	2	0.75	25.5	0.4
Section B	40/5	3.75	34.8	2	0.75	25	0.4
Section C	5/5	7.5	4.4	2	1.5	1.6	0.4
Section D	15/5	3.5	13.4	2	0.7	5.2	0.4
Section E	30/5	3.75	25.5	2	0.75	18.8	0.4

5.3 계통연계형 마이크로그리드의 사고전류 특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건 및 상정사고 시나리오를 바탕으로, Section B의 F_B 지점에서 3상 단락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성은 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소에서 2.7[kA]의 사고전류가 공급되어 전체 사고전류의 대부분을 차지하고, 사고가 발생한 Section B의 ESS와 태양광전원에서 0.24[kA], 사고가 발생하지 않은 Section(A,D,E)에서 0.18[kA]의 사고전류가 공급되어, 전체적으로 3.12[kA]의 사고전류가 F_B 지점으로 유입됨을 알 수 있다.

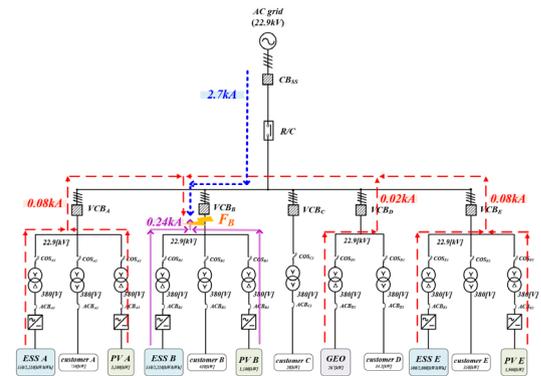


Fig. 9. Flow for short circuit fault in distribution line

또한, F_B 지점에서 1선 지락사고가 발생할 경우의 사고전류 특성은 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소에서 2.15[kA]의 사고전류가 공급되고, 사고가 발생한 Section B의 ESS와 태양광전원에서 0.9[kA], 사고가 발생하지 않은 Section(A,D,E)에서 0.09[kA]의 사고전류가 공급되어, 전체적으로 3.14[kA]의 사고전류가 F_B 지점으로 유입됨을 알 수 있다.

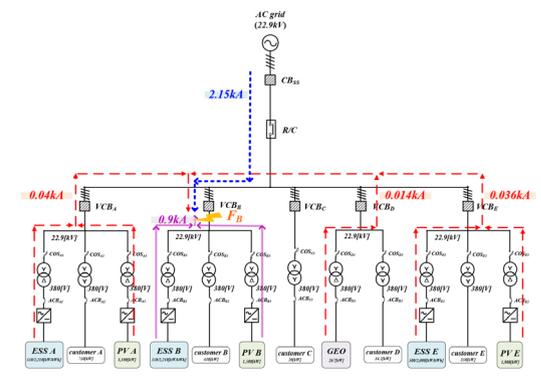
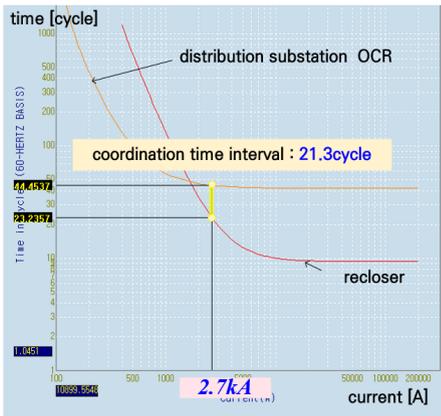


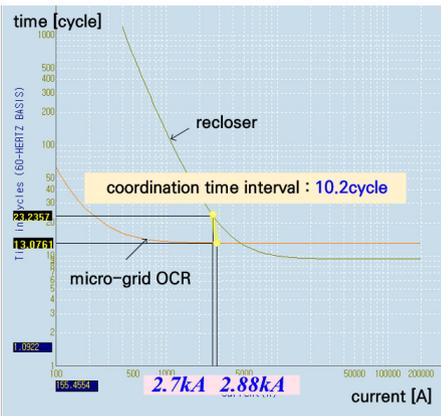
Fig. 10. Flow for single ground fault in distribution line

5.4 계통연계형 마이크로그리드의 보호협조 운용특성

상기의 보호협조 운용방안과 사고전류 특성을 바탕으로 한전에서 사용되고 있는 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 바탕으로, F_B 지점에서 3상 단락사고 시 보호기기의 동작특성을 나타내면 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11의 (a)와 같이, 배전용 변전소에서 공급되는 2.7[kA]의 사고전류에 의하여 변전소 계전기의 OCR은 44.5cycle, 배전선로 리클로저는 23.2cycle의 동작시간이 산정되어, 변전소의 계전기와 리클로저가 21.3cycle의 협조 시간차를 확보하여, 최소 협조 시간차인 10cycle 이상이 유지됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 11의 (b)와 같이, 사고 발생 지점으로 유입되는 2.88[kA]의 사고전류에 의하여 Section B의 고객계전기의 OCR이 13cycle의 동작시간이 산정되어, 배전선로 리클로저와 10.2cycle의 협조 시간차를 확보하여 최소 협조 시간차인 6cycle 이상이 되어, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있다.



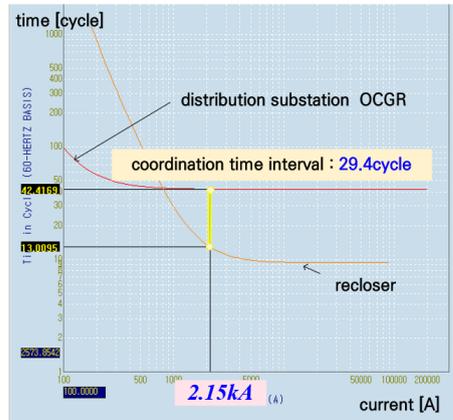
(a) distribution substation side



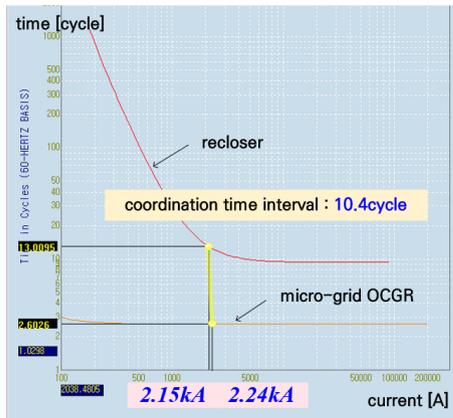
(b) Section B side in micro-grid

Fig. 11. Operation characteristics of protection devices with short circuit fault in distribution line

한편, F_B 지점에서 1선 지락사고 시 보호기기 동작특성은 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 12의 (a)와 같이, 배전용 변전소에서 유입되는 2.15[kA]의 사고전류에 의하여 변전소 계전기의 OCR은 42.4cycle, 배전선로 리클로저는 13cycle의 동작시간이 산정되어 변전소의 계전기와 리클로저가 29.4cycle의 협조 시간차를 확보하여, 최소 협조 시간차인 10cycle 이상이 유지됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 12의 (b)와 같이, 사고발생 지점으로 유입되는 2.24[kA]의 사고전류에 의하여 Section B의 고객계전기의 OCR은 2.6cycle의 동작시간이 산정되어, 배전선로 리클로저와 10.4cycle의 협조 시간차를 확보하여 최소 협조 시간차인 6cycle 이상이 되어, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있다.



(a) distribution substation side



(b) Section B side in micro-grid

Fig. 12. Operation characteristics of protection devices with single ground fault in distribution line

5.5 종합분석

상기와 동일한 방법으로 모든 상정사고 시나리오에 대한 사고전류 특성과 보호기기의 동작특성은 Table 3과 Table 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 모든 시나리오에 대하여 3상 단락 및 1선 지락사고가 발생하는 경우, 배전용 변전소의 OCR 및 OCGR과 배전선로 리클로저 간의 협조 시간차가 10cycle 이상이 유지되고, 배전선로 리클로저와 마이크로그리드 고객계전기 간의 협조 시간차를 6cycle 이상을 확보하여, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있다.

Table 3. Fault current characteristics

fault location	fault current[kA]			
	short circuit		single line ground	
	distribution substation side	micro-grid side	distribution substation side	micro-grid side
F_A	2.7	2.9	2.2	2.28
F_B	2.7	2.88	2.15	2.24
F_C	2.7	2.96	0.84	1.14
F_D	2.7	2.98	0.97	1.24
F_E	2.7	2.8	2.16	2.24

Table 4. Operation characteristics of protection devices

fault location	operation time of protection devices[cycle]					
	short circuit			sing line ground		
	distribution substation OCR	recloser OCR	MG OCR	distribution substation OCGR	recloser OCGR	MG OCGR
F_A	44.5	23.2	13	42.4	12.7	2.6
F_B	44.5	23.2	13	42.4	13	2.6
F_C	44.5	23.2	13	43.1	35.1	2.6
F_D	44.5	23.2	13	42.9	29.1	2.6
F_E	44.5	23.2	13.1	42.4	13	2.6

6. 결론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 계통연계형 마이크로그리드의 사고 위치 및 유형에 따른 사고 전류 특성을 분석하여, 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위한 보호협조 운용방안을 제시하고, 상정사고 시나리오별 보호협조 특성을 분석한다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고압 배전선로(F_B)에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, 배전용 변전소의 계전기와 리클로저가 21.3cycle의 협조 시간차를 확보하고, 리클로저와 고객계전기가 10.2cycle의 협조 시간차를 확보함으로써, 최소 협조 시간차 이상이 유지되어, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있었다.
- (2) 고압 배전선로(F_B)에서 1선 지락사고가 발생하는 경우, 배전용 변전소의 계전기와 리클로저가 29.4cycle의 협조 시간차를 확보하고 리클로저와 고객계전기의 OCGR이 10.4cycle의 협조 시간차를 확보함으로써, 최소 협조 시간차인 이상이 유지되어, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있었다.
- (3) 상정사고 시나리오를 바탕으로 보호기기의 동작특성을 분석한 결과, 모든 시나리오에서 필요한 최소 협조 시간차 이상을 유지할 수 있어서, 본 논문에서 제시한 보호협조 운용방안에 의하여 계통연계형 마이크로그리드를 안정적으로 운용할 수 있음을 알 수 있었다.

References

- [1] V. Khare, P. Chaturvedi, "Design, control, reliability, economic and energy management of microgrid: A review", *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volume 5(100239), ISSN 2772-6711, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100239>
- [2] J. Rao, Y. He, J. Liu, "Standalone versus grid-connected? Operation mode and its economic and environmental assessment of railway transport microgrid", *Sustainable Cities and Society*, Volume 98(104811), ISSN 2210-6707, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104811>
- [3] T. Guo, Q. Guo, L. Huang, H. Guo, Y. Lu, L. Tu, "Microgrid source-network-load-storage master-slave game optimization method considering the energy storage overcharge/overdischarge risk", *Energy*, ISSN 0360-5442, Volume 282(128897), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128897>
- [4] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu, J. M. Guerrero, "Microgrids: A review, outstanding issues and future trends", *Energy Strategy Reviews*, ISSN 2211-467X, Volume 49(101127), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- [5] A. A. kachoe, H. H. Dezaki, A. Ketabi, "Optimized adaptive protection coordination of microgrids by dual-setting directional overcurrent relays considering different topologies based on limited independent

relays' setting groups", *Electric Power Systems Research*, ISSN 0378-7796, Volume 214(108879), Part A, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108879>

- [6] N. K. Lee, S. D. Cho, J. H. Won, C. G. Kwak, D. S. Rho, "A Study on Operation Method of Protection Devices in Grid-connected Community Micro-grid System", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.852-853, 2023.
- [7] H. D. Lee, B. G. Han, J. M. Kim, Y. H. Kim, D. S. Rho, "A Study on Operation Algorithm of Protection Devices in ± 35 kV MVDC Distribution System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.5, pp.209-217, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/kAIS.2023.24.5.209>
- [8] M. Uzair, L. Li, M. Eskandari, J. Hossain, J. G. Zhu, "Challenges, advances and future trends in AC microgrid protection: With a focus on intelligent learning methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ISSN 1364-0321, Volume 178(113228), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113228>
- [9] A. Chandra, G. K. Singh, V. Pant, "Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – A research review and future trends", *Electric Power Systems Research*, ISSN 0378-7796, Volume 193(107036), 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107036>
- [10] K. H. Kim, B. G. Han, S. Y. Lee, K. Y. Kim, D. S. Rho, "An Operation Algorithm of Community Micro-grid Considering Self Energy Supply Rate", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.11, pp.885-896, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/kAIS.2022.23.11.885>
- [11] Korea Electric Power Corporation. Power Distribution Protection Technology. Seoul: Korea Electric Power Corporation Distribution Office, 1995.
- [12] H. D Lee, S. S. Choi, M. 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*, Vol.20, No.10, pp.18-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5762/kAIS.2018.19.9.526>

이 나 경(Na-Kyung Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

마이크로그리드, DC 배전계통, 분산전원연계

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[정회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 윤 호(Yun-Ho Kim)

[준회원]



- 2022년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

DC 배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, ESS

이 일 무(II-Moo Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 홍익대학교 전기공학과 (학사, 석사, 공학박사)
- 1999년 12월 ~ 2004년 7월 : ㈜피에스디테크 연구팀장
- 2004년 8월 ~ 2011년 1월 : 홍익대학교 전기공학부 겸임교수
- 2004년 8월 ~ 2011년 1월 : 마이크로파워 대표이사
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 슈나이더일렉트릭 PQ Expert
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국전기기술인협회 연구팀장

<관심분야>

전기품질해석, 분산전원연계, 전기안전

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/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석