

# 에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 사고전류 특성에 관한 연구

김경화, 이후동, 최형석, 이수용, 노대석  
한국기술교육대학교 전기공학과  
e-mail:kyunghwa316@koreatech.ac.kr

## A Study on Fault Current Characteristics of Community Micro-grid Considering Self Energy Supply Rate

Kyung-Hwa Kim, Hu-Dong Lee, Hyoung-Seok Choi, Soo-Yong Lee and 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. 이러한 마을형 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 마이크로그리드의 형태와 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다. 그러나, 이러한 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 배전계통과 연계되거나 분리되어 운용되면서 사고전류의 특성이 상이할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고, 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위한 에너지 자립율에 따른 1선 지락사고 및 3상 단락사고 전류의 특성을 제시한다. 이를 바탕으로 상정사고 시나리오 별 사고전류의 특성을 비교한 결과, 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기가 계통연계형 마이크로그리드의 사고전류에 비해 크게 감소하여, 보호기기를 정정함에 있어서 사고전류의 특성을 고려해야 함을 알 수 있다.

### 1. 서론

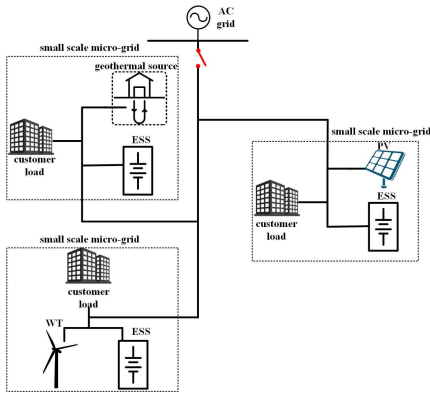
최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS의 도입이 확대되면서, 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율 확보를 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 연구가 진행되고 있으며, 마을형 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 마이크로그리드의 형태와 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다[1]. 그러나, 이러한 마이크로그리드에서 에너지 자립율에 따라 배전계통과 연계되거나 분리되어 운용되면서 사고전류의 크기가 상이할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 자립율에 따라 1선 지락사고 및 3상 단락사고 전류의 크기를 비교한다. 이를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 상정사고 시나리오 별 사고전류의 크기를 비교한 결과, 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기가 계통연계형 마이크로그리드의 사고전류에 비해 크게 감소하여, 보호기기 선정에 유의해야함을 알

수 있다.

### 2. 에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 운용 특성

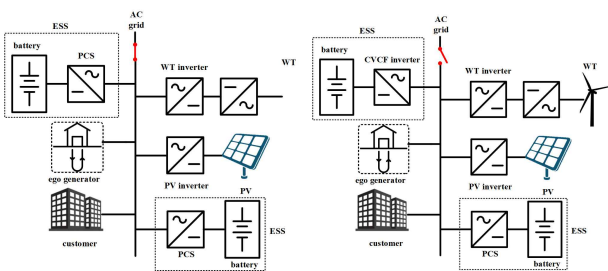
지역 단위의 신재생에너지의 생산 및 소비 체계를 구축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을형 마이크로그리드의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 마을형 마이크로그리드는 각각 수용가 부하와 신재생에너지 전원, ESS 등으로 다양하게 구성되며, 신재생에너지 전원의 에너지 자립율에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용될 수 있다. 또한, 각 소규모 마이크로그리드의 신재생에너지 전원은 태양광전원 및 지열 발전 등으로 이루어지며, 수용가 부하에 전원을 공급하거나 잉여전력을 ESS에 충전하여, 마이크로그리드의 에너지 자립율을 확보한다. 한편, ESS는 신재생에너지 전원의 발전용량에 따라, 충전 및 방전 동작을 수행하여 과전압 및 저전압 현상을 해결하고, 마을 마을형 마이크로그리드가 독립형으로 운용하는 경우, CVCF(constant voltage constant frequency) 기능에 의하여 전압 및 주파수

를 제어하는 역할을 한다.



[그림 1] 마을형 마이크로그리드의 구성

에너지 자립율에 따른 마을형 마이크로그리드의 정상상태 운용특성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2의 (a)와 (b)는 에너지 자립율이 50%, 100%인 경우의 운용특성을 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, 그림 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 수요관리용으로 운용하여 각 수용가의 전압을 안정적으로 유지시킨다.



(a) 계통연계형 마이크로그리드 (b) 독립형 마이크로그리드  
[그림 2] 마을형 마이크로그리드의 운용특성

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 마을형 마이크로그리드의 모델링

#### 3.1 계통연계형 마이크로그리드의 모델링

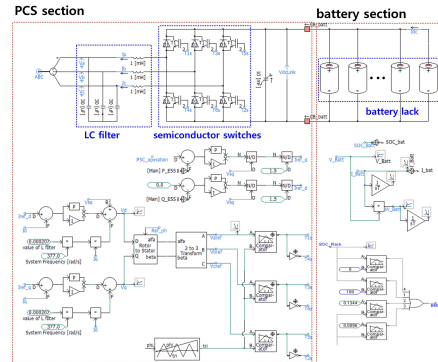
ESS부는 그림 3과 같이 PCS와 배터리로 모델링 할 수 있

다. 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. 즉, 기준전류는 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전기능을 수행한다.

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (1)$$

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (2)$$

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



[그림 3] ESS 모델링

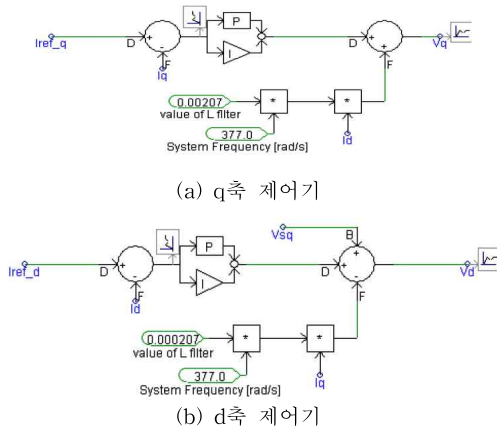
태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (3)과 식 (4)와 같고, 이 제어기를 모델링하면 그림 4와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (3)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (4)$$

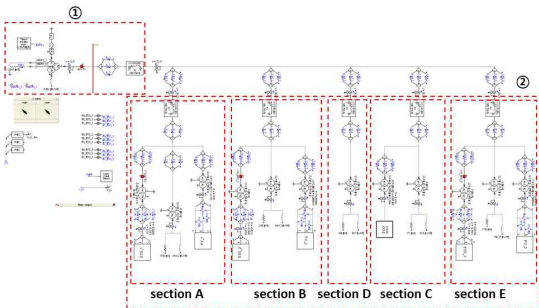
여기서,  $V_d$ ,  $V_q$ : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압,  $I_{ref-dq}$ : 인버터 출력의 기준전류,  $I_q$ ,  $I_d$ : d-q동기좌표계에 의한 계통전

류(직류),  $V_{sq}$ : 계통의 순시전압



[그림 4] 태양광전원의 제어기 모델링

상기의 내용을 바탕으로 계통연계형 마이크로그리드는 그림 5와 같이, 배전계통부와 마을형 마이크로그리드로 구성된다. 여기서, 그림 5의 ① 부분은 배전계통부, ② 부분은 마을형 마이크로그리드를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, ① 부분은 배전용 변전소와 고압배전선로로 구성되고, ② 부분은 4개의 소규모 마이크로그리드와 수용가 부하로 구성된다. 여기서, 그림 5의 ②부분에서 Section A와 B, E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, Section C는 수용가부 만으로 이루어지며, Section D는 수용가부와 지열발전부로 구성된다.

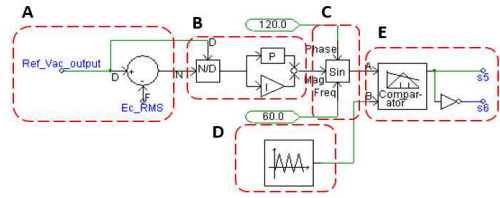


[그림 5] 계통연계형 마이크로그리드 모델링

### 3.2 독립형 마이크로그리드의 모델링

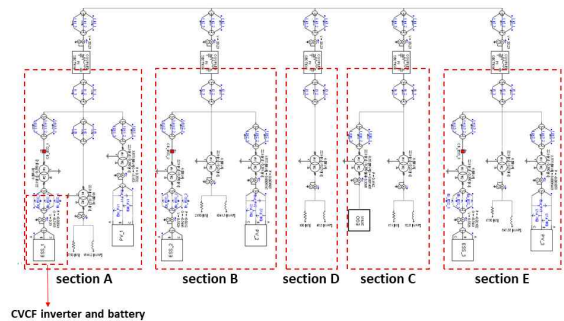
CVCF 인버터부는 제어기와 인버터로 구성된다. 구체적으로, 제어기에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성을 빠르게 수행하기 위하여, PI제어 알고리즘을 이용한다. 또한, CVCF 인버터의 한 상에 대한 제어부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 6과 같다. 여기서, A부분은 목표전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차값을 산정하는 것이고, B부분은 오차 값에 대하여 각각 PI제어를 수행하는 것이며, C부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 것을 나타낸다. 또한, D부분은 삼각

파의 반송파를 출력하고, E부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환하는 것을 나타낸다.



[그림 6] CVCF 인버터부 모델링

상기의 내용을 바탕으로 독립형 마이크로그리드는 그림 7과 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.



[그림 7] 독립형 마이크로그리드 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

마을형 마이크로그리드의 운용 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전선로의 선종은 ACSR 160 [mm<sup>2</sup>], 공장은 5 [km]로 상정한다. 한편, 마이크로그리드는 5개의 Section으로 구성하며, 각 Section의 수용가 부하 및 태양광전원, ESS, 지열발전, 등의 용량은 실증 모델계통을 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역
배전용 변전소	정격용량	100[MVA]
	결선방식	Yg-Yg-Δ
배전선로	선종	ACSR 160 [mm <sup>2</sup> ]
수용가 1	수용가 부하 (부하 1)	750 [kW], 363.2 [kvar]
	태양광전원 (PV 1)	3,100 [kW]

	ESS (ESS 1)	550/2,210 [kW/kWh]
수용가 2	수용가 부하 (부하 2)	430 [kW], 208.3 [kvar]
	태양광전원 (PV 2)	1,500 [kW]
	ESS (ESS 2)	450/1,743 [kW/kWh]
수용가 3	수용가 부하 (부하 3)	20 [kW], 9.7 [kvar]
수용가 4	수용가 부하 (부하 4)	34.2 [kW], 16.6 [kvar]
	지열 발전 (EGO 1)	267 [kW]
수용가 5	수용가 부하 (부하 5)	350 [kW], 169.5 [kvar]
	태양광 전원 (PV 3)	1,900 [kW]
	ESS (ESS 3)	500/2,000 [kW/kWh]

#### 4.2 마을형 마이크로그리드의 사고전류 특성

상기의 모델링을 바탕으로 마을형 마이크로그리드의 고압 배전선로에서의 1선지락 사고전류 특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 계통연계형 마이크로그리드와 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기는 각각 3.2[kA]와 0.18[kA]가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 계통연계형 마이크로그리드의 경우, 배전용 변전소 측에서 유입되는 사고전류의 크기가 2.2[kA]로 가장 크며, 독립형 마이크로그리드는 배전용 변전소 측에서 유입되는 사고전류가 없으므로 크게 감소함을 알 수 있다.

[표 2] 1선지락 사고전류 특성

	사고전류[kA]						총 사고전류
	배전용 변전소	수용가 1	수용가 2	수용가 3	수용가 4	수용가 5	
계통연계형	2.2	부하 1 : 0	부하 2 : 0	부하 3 : 0	부하 4 : 0	부하 5 : 0	3.2
		PV 1 : 0.77	PV 2 : 0.24			PV 3 : 0.1	
		ESS 1 : 0.02	ESS 2 : 0.02			ESS 3 : 0.02	
독립형	0	부하 1 : 0	부하 2 : 0	부하 3 : 0	부하 4 : 0	부하 5 : 0	0.18
		PV 1 : 0.11	PV 2 : 0.07			PV 3 : 0.05	
		ESS 1 : 0.02	ESS 2 : 0.02			ESS 3 : 0.02	

한편, 마을형 마이크로그리드의 고압 배전선로에서의 3상 단락 사고전류 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 계통연계형 마이크로그리드와 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기는 각각 2.3[kA]와 0.15[kA]가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 계통연계형 마이크로그리드의 경우, 배전용 변전소 측에서 유입되는 사고전류의 크기가 2.23[kA]로 가장 크며, 독립형

립형 마이크로그리드는 배전용 변전소 측에서 유입되는 사고전류가 없으므로 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서, 에너지 자립율에 따라 다르게 운용되는 마을형 마이크로그리드에 있어서, 계통연계형 마이크로그리드에 비해 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기가 매우 감소하므로, 보호기기 선정에 있어서 유의해야함을 알 수 있다.

[표 3] 3상단락 사고전류 특성

	사고전류[kA]						총 사고전류
	배전용 변전소	수용가 1	수용가 2	수용가 3	수용가 4	수용가 5	
계통연계형	2.23	부하 1 : 0	부하 2 : 0	부하 3 : 0	부하 4 : 0	부하 5 : 0	2.3
		PV 1 : 0.11	PV 2 : 0.08			PV 3 : 0.09	
		ESS 1 : 0	ESS 2 : 0			ESS 3 : 0	
독립형	0	부하 1 : 0	부하 2 : 0	부하 3 : 0	부하 4 : 0	부하 5 : 0	0.15
		PV 1 : 0.10	PV 2 : 0.06			PV 3 : 0.04	
		ESS 1 : 0.02	ESS 2 : 0.02			ESS 3 : 0.02	

## 5. 결 론

본 논문에서는 마을형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 자립율에 따라 1선 지락사고 및 3상 단락사고 전류의 크기를 비교한다. 이를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 상정사고 시나리오 별 사고전류의 크기를 비교한 결과, 독립형 마이크로그리드의 사고전류 크기가 계통연계형 마이크로그리드의 사고전류에 비해 크게 감소하여, 보호기기 선정에 유의해야함을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] 김지명 외 3인, "5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 해석 모델링에 관한 연구", 전기학회 논문지, 71(1), 45-54, 2022.1