

# 에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 보호기기 운용방안에 관한 연구

이나경\*, 김지명\*, 이중선\*, 한병길\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail: naku9908@koreatech.ac.kr

## An Operation Method of Protection Device in Community Micro-grid System Considering Self Energy Supply Rate

Na-Kyung Lee\*, Ji-Myung Kim\*, Joong-Seon Lee\*, Byeong-Gill Han\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 전라남도에서는 지역단위의 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다. 여기서, 마을형 마이크로그리드는 에너지 자립율이 50%이면 계통연계형, 100%이면 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용될 수 있는데, 이때 기존의 방식으로 보호기기의 정정치를 산정할 경우, 독립형으로 운용시 CVCF ESS측 보호기기가 먼저 동작하여 전체 계통에 정전이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 계통연계형으로 운용되면 배전계통 측 보호기기와 마이크로그리드 측 보호기기가, 독립형으로 운용되면 CVCF ESS 측 보호기기와 사고지점 측 보호기기가 최소 협조시간차를 유지하는 보호기기 운용방안을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 CVCF ESS부, 태양광전원부, 지열발전기부, 수요관리용 ESS부 등으로 구성된 마을형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링과 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 바탕으로, 고압 배전선로의 1선 지락사고 시 보호기기 동작특성을 평가한 결과, 모든 시나리오에서 보호기기가 필요한 최소 협조시간차 이상을 유지할 수 있어, 본 논문에서 제시한 보호기기 운용방안이 유용함을 알 수 있다.

## 1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 분산에너지 생산 및 소비 체계 구축을 위한 마을형 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다. 이러한 마을형 마이크로그리드는 에너지 자립율이 50%인 경우 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있으며, 100%인 경우 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다. 이때, 기존의 방식으로 보호기기를 운용할 경우, 독립형 마이크로그리드에서 CVCF ESS 측으로부터 유입되는 사고전류를 고려하지 않았기 때문에, 사고 발생 시 CVCF ESS 측 보호기기가 먼저 동작함으로써 전체 계통으로 정전 구간이 확대되어 주변 수용가 또는 민간 발전사업자에게 설비 손상이나 재산적 피해를 줄 가능성이 있다. 이를 해결하기 위해, CVCF ESS 측의 보호기기가 모든 상정사고 시나리오에서 사고지점의 보호기기와 최소 협조시간차 이상을 유지하는 보호협조 운용방안이 요구되고 있다[1].

## 2. 마을형 마이크로그리드의 보호기기 운용방안

### 2.1 계통연계형 마이크로그리드의 보호기기 정정방안

#### 2.1.1 변전소 계전기의 정정치 산정

일반적으로 배전용 변전소 계전기의 OCR과 OCGR은 한전의 보호협조 정정치침에 따라 동작시간이 결정되는데, CT비, 순시탭, 한시탭, 레버에 의하여 정정치를 산정한다. 먼저, 계전기의 CT비는 선로용량에 대한 정격전류에 1.5배, 단락과 지락에 대한 순시탭은 전위 보호기기(리클로저) 설치지점의 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락전류의 1.4배 이상으로 산정하며, 이를 나타내면 식 (1)과 식 (2)와 같다. 한편, 단락과 지락에 대한 한시탭은 회선당 운전전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 산정하며, 이를 나타내면 식 (3)과 같다. 또한, 레버(ⅡL)는 식 (4)와 같은 특성곡선을 바탕으로, 변압기 2차측 3상 단락전류에서 0.6초(36cycle) 이하, 최대 1선 지락전류에 0.2초(12cycle) 이하에 동작하도록 산정한다.

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

$$\text{순시탭} = I_{fault} \times K_1 \times CT\text{비} \quad (2)$$

$$\text{한시탭} = \frac{P_{MG}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times K_2 \times CT\text{비} \quad (3)$$

$$TL = t \times \frac{(I_{fault}/I_{pickup})^B - 1}{A} \quad (4)$$

여기서,  $P_{MG}$ : 마이크로그리드의 배전용 변전소의 정격용량,  $I_{fault}$ : 보호기기 설치지점의 사고전류(3상 단락전류, 1선 지락전류),  $K_1$ : 사고 종류에 따른 순시탭 계수(단락: 1.5, 지락: 1.4),  $K_2$ : 사고 종류에 따른 한시탭 계수(단락: 1.5, 지락: 0.3),  $TL$ : 레버,  $I_{pickup}$ : 픽업 전류,  $A, B$ : 특성곡선 상수

### 2.1.2 배전선로 리클로저의 정정치 산정

순시동작과 지연동작 특성을 가지는 리클로저의 단락시 최소동작전류는 식 (5)와 같이 최대부하전류의 2.8배 이상 4배 이하로 산정한다. 또한, 지락에 대한 최소 동작전류는 식 (6)과 같이 최대부하전류의 0.3배로 산정하지만, 선로의 부하 불평형 전류를 고려하여 정정치를 산정한다.

$$I_{OP}(P) = 2.8 \times I_{MAX} \leq I_{OP} \leq 4 \times I_{MAX} \quad (5)$$

$$I_{OP}(G) = I_{MAX} \times 0.3 \quad (6)$$

여기서,  $I_{OP}$ : 보호기기 최소동작전류,  $I_{MAX}$ : 최대 공급전류

### 2.1.3 마이크로그리드 고객계전기의 정정치 산정

마이크로그리드의 각 고객계전기의 OCR과 OCGR도 CT비와 단락과 지락에 대한 순시탭 및 한시탭과 레버를 산정해야 한다. 먼저, 계전기의 CT비는 식 (7)과 같이 소규모 마이크로그리드의 정격용량을 기준으로 정격전류의 1.5배로 산정할 수 있다. 또한, 단락과 지락에 대한 순시탭은 식 (8)과 같이 수전변압기 2차측 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락전류의 1.4배로 산정한다. 한편, 단락과 지락에 대한 한시탭은 최대부하전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 정정하며, 이를 나타내면 식 (9)와 같다. 또한, 마이크로그리드 고객계전기 레버( $TL$ )는 식 (10)과 같은 특성곡선을 바탕으로, 변압기 2차측 3상 단락전류에서 0.6초(36cycle) 이하, 최대 1선 지락전류에 0.2초(12cycle) 이하에 동작하도록 산정한다. 이때, 순시탭 및 한시탭과 레버의 정정치 사용되는 사고전류는 계통연계형과 독립형 모두에서 보호기기가 동작하도록, 사고전류가 비교적 낮은 독립형일 때의 3상 단락 및 1선 지락전류를 기준으로 산정한다.

$$CT\text{비} = \frac{P_{MG,Section}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times 1.5 \quad (7)$$

$$\text{순시탭} = I_{fault} \times K_1 \times CT\text{ratio} \quad (8)$$

$$\text{한시탭} = \frac{P_{MG,Section}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times K_2 \times CT\text{ratio} \quad (9)$$

$$TL_{B \sim E} = t \times \frac{(I_{fault}/I_{pickup})^B - 1}{A} \quad (10)$$

여기서,  $P_{MG,section}$ : 각 Section의 정격용량,

### 2.2 독립형 마이크로그리드의 보호기기 정정치 방안

독립형 마이크로그리드의 각 고객계전기의 OCR과 OCGR의 CT비와 단락과 지락에 대한 순시탭 및 한시탭도 마찬가지로, 식 (7)~식 (9)와 같이 산정한다. 또한, CVCF 기능이 없는 각 Section B~E 고객계전기의 레버는 기존의 방식인 식 (10)을 바탕으로 산정한다. 한편, CVCF ESS가 있는 Section A의 고객계전기 레버는 사고 발생 시 Section A가 사고지점으로 대부분의 사고전류를 공급하기 때문에 가장 가까운 Section B와의 보호협조를 고려하여 산정해야 한다. 먼저, 레버( $TL$ )에 대한 식 (10)을 사고전류에 대한 동작시간( $t(I)$ )으로 나타내면 식 (11)과 같다. 이 식을 바탕으로, 계통연계형에서 리클로저와 보호협조를 고려하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있고, 독립형에서 Section B와 보호협조를 고려하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 최소 협조시간차( $CTI_S$ )는 한전의 보호협조 지침에 따라 6cycle 이상이다. 따라서, Section A 고객계전기의 레버는 식 (14)와 같은 범위 내에서 산정한다.

$$t(I) = \frac{A}{(I/I_{pickup})^B - 1} \times TL \quad (11)$$

$$t(I_{E_A}) < t_{R/C} - CTI_S \quad (12)$$

$$t(I_{E_B}) < t_B + CTI_S \quad (13)$$

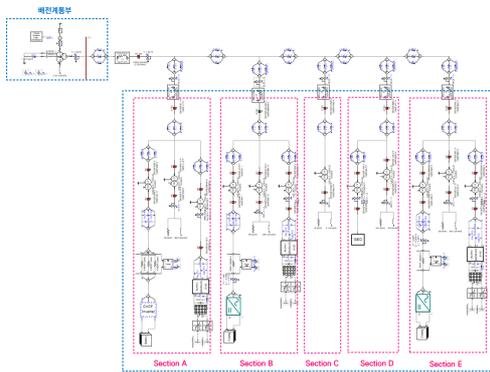
$$\begin{cases} TL_A \geq (t_{R/C} - CTI_S) \times \frac{(I_{E_A}/I_{pickup})^B - 1}{A} \\ TL_A \leq (t_B + CTI_S) \times \frac{(I_{E_B}/I_{pickup})^B - 1}{A} \end{cases} \quad (14)$$

여기서,  $t(I)$ : 보호기기 동작시간,  $I_{E_A}$ : 계통연계형에서 Section A 사고 시 Section A의 전류,  $I_{E_B}$ : 독립형에서 Section B 사고 시 Section A의 전류,  $t_{R/C}$ : 배전선로 리클로저 동작시간,  $t_B$ : Section B 고객계전기 동작시간,  $CTI_S$ : 최소 협조시간차(6cycle),  $TL_A$ : 제안한 방식에서 Section A 고객계전기 레버

### 3. PSCAD/EMTDC에 의한 마을형 마이크로그리드의 모델링

#### 3.1 계통연계형 마이크로그리드의 모델링

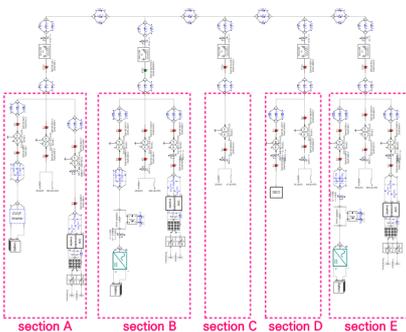
계통연계형 마이크로그리드는 그림 1과 같이, 배전계통부와 마을형 마이크로그리드로 구성된다. 여기서, 배전계통부는 배전용 변전소와 고압 배전선로, 마을형 마이크로그리드는 4개의 소규모 마이크로그리드 등으로 구성된다. 여기서, Section A와 B, E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, Section C는 수용가부 만으로 이루어지며, Section D는 수용가부와 지열발전기부로 구성된다.



[그림 1] 계통연계형 마이크로그리드의 모델링

#### 3.2 독립형 마이크로그리드의 모델링

독립형 마이크로그리드는 그림 2와 같이, 한전 계통과 독립적으로 마을형 마이크로그리드만으로 구성된다. 여기서, section A는 CVCF ESS부, 태양광전원부, 수용가부, 등으로 구성되어 마이크로그리드의 전압을 안정적으로 유지한다. 또한, section B ~ section E는 상기의 계통연계형 마이크로그리드와 동일하게 구성된다.



[그림 2] 독립형 마이크로그리드의 모델링

### 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 4.1 시뮬레이션 조건

상기의 모델링을 바탕으로 마을형 마이크로그리드의 사고

해석을 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 각 Section의 수용가 부하 및 태양광전원, ESS, 지열발전기, 등의 용량과 변압기는 실증 사이트를 바탕으로 상정하며, 계통연계형의 경우 에너지 자립율을 50%, 독립형의 경우 에너지 자립율을 100%를 고려한다.

[표 1] 마을형 마이크로그리드의 시뮬레이션 조건

items		contents	
배전용 변전소	정격용량	60[MVA]	
	결선방식	Yg-Yg-Δ	
배전선로	선종	ACSR 160 [mm <sup>2</sup> ]	
	길이	7[km]	
Section A	수용가 부하	용량	750 [kW], 363.2 [kvar]
		변압기	Yg-Yg, 22.9/0.38[kV]
	태양광전원	용량	700 [kW]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
	ESS	용량	550/2,210 [kW/kWh]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
Section B	수용가 부하	용량	430 [kW], 208.3 [kvar]
		변압기	Yg-Yg, 22.9/0.38[kV]
	태양광전원	용량	400 [kW]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
	ESS	용량	450/1,743 [kW/kWh]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
Section C	수용가 부하	용량	20 [kW], 9.7 [kvar]
		변압기	Yg-Yg, 22.9/0.38[kV]
Section D	수용가 부하	용량	34.2 [kW], 16.6 [kvar]
		변압기	Yg-Yg, 22.9/0.38[kV]
	지열 발전기	용량	267 [kW]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
Section E	수용가 부하	용량	350 [kW], 169.5 [kvar]
		변압기	Yg-Yg, 22.9/0.38[kV]
	태양광전원	용량	300 [kW]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]
	ESS	용량	500/2,000 [kW/kWh]
		변압기	Yg-Δ, 22.9/0.38[kV]

#### 4.2 배전계통 및 마이크로그리드 보호기기의 정정치 산정

2장의 보호기기 정정치 산정방안에 의하여, 배전용 변전소 계전기와 배전선로 리클로저, 마이크로그리드 고객계전기의 OCR 및 OCGR 등의 정정치를 구하면 표 2와 같다. 여기서, 계전기는 CT비, 한시탭, 순시탭, 레버(TL) 값을 산정하고, 리클로저는 N2, N4 곡선을 대상으로 산정한 값이다.

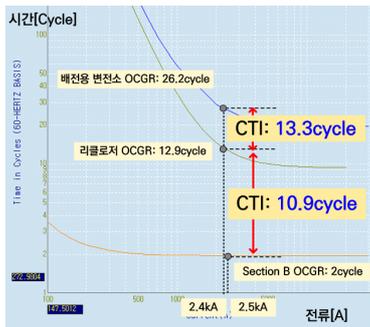
[표 2] 보호기기의 정정치 산정 내역

보호기기 설치지점	CT비	OCR			OCGR			
		한시 tap	순시 tap	TL	한시 tap	순시 tap	TL	
배전용 변전소	1200/5	4.5	81	1.5	0.9	61.6	3.0	
배전선로 리클로저	minimum current: 400[A], 180[A]							
MG Section	A	100/5	3.75	37.5	1.5	0.75	31.5	1.0
	B	75/5	4.69	138.8	0.5	0.94	133	0.3
	C	5/5	4.13	52.5	0.5	0.83	52.5	0.3
	D	20/5	2.34	138.8	0.5	0.94	108.5	0.3
	E	100/5	3.75	41.25	0.5	0.75	57.75	0.3

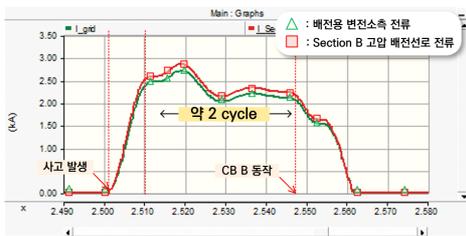
4.3 마을형 마이크로그리드의 보호협조 운용특성

4.3.1 계통연계형 마이크로그리드의 보호협조 운용특성

상기의 보호협조 운용방안과 사고전류 특성을 바탕으로 한 전에서 사용되고 있는 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS와 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 통해,  $F_B$  지점에서 1선 지락사고 시 보호협조 운용특성을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3(a)와 같이 배전용 변전소에서 공급되는 2.4[kA]의 사고전류에 의하여 변전소 계전기의 OCGR은 26.2cycle, 배전선로 리클로저는 12.9cycle의 동작시간이 산정되어, 변전소의 계전기와 리클로저가 13.3cycle의 협조 시간차를 확보하여, 최소 협조 시간차인 10cycle 이상이 유지됨을 알 수 있다. 또한, 사고발생 지점으로 유입되는 2.5[kA]의 사고전류에 의하여 Section B의 고객계전기의 OCR이 2cycle의 동작시간이 산정되어, 배전선로 리클로저와 10.9cycle의 협조 시간차를 확보하여 최소 협조시간차인 6cycle 이상이 되어, 안정적인 보호협조가 가능함을 알 수 있다. 또한, 그림 3(b)와 같이 사고 발생 후 Section B의 차단기가 약 2cycle에 동작하여 사고구간을 분리시킴으로써 배전용 변전소 측 전류가 안정적으로 공급되어 수용가 설비를 보호할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 보호기기 동작 특성



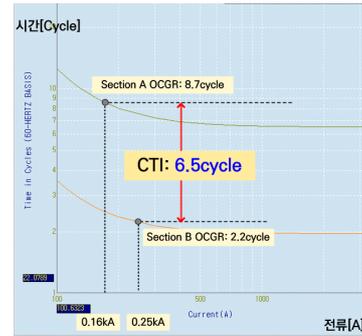
(b) 보호기기 동작에 의한 사고전류 특성

[그림 3] 계통연계형 MG 고압 배전선로 1선 지락사고시 보호협조 운용특성

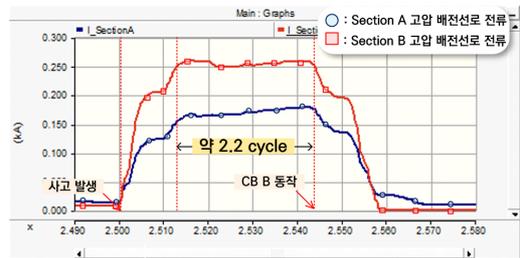
4.3.2 독립형 마이크로그리드의 보호협조 운용특성

$F_B$  지점에서 1선 지락사고 시 보호협조 운용특성을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4(a)와 같이 CVCF ESS측 Section A에서 공급되는 0.16[kA]의 사고전류에 의하여 Section A의 OCGR은 8.7cycle이 산정되고, 사고발생 지점으로 유입되는 0.25[kA]의 사고전류에 의하여 Section B의

OCGR은 2.2cycle의 동작시간이 산정되어, 변전소의 계전기와 리클로저가 6.5cycle의 협조 시간차를 확보하여, 최소 협조 시간차인 6cycle 이상이 유지됨을 알 수 있다. 또한, 그림 4(b)와 같이 사고 발생 후 Section B의 차단기가 약 2.2cycle에 동작하여 사고구간을 분리시킴으로써 CVCF ESS측 Section A의 전류가 안정적으로 공급되어 수용가 설비를 보호할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 보호기기 동작 특성



(b) 보호기기 동작에 의한 사고전류 특성

[그림 4] 독립형 MG 고압 배전선로 1선 지락사고 시 보호협조 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 마을형 마이크로그리드를 안정적으로 운용하기 위하여, 계통연계형에서는 배전계통 측 보호기기와 마이크로그리드 측 보호기기가, 독립형에서는 CVCF ESS 측 보호기기와 사고지점 측 보호기기가 최소 협조시간차를 유지하는 보호기기 운용방안을 제시한다. 이를 바탕으로 보호협조 운용특성을 평가한 결과, 고압 배전선로 1선 지락사고 시 보호기기가 필요한 최소 협조시간차 이상이 유지됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 페레이라 마리토 외 3명, "30kW급 CVCF 인버터 기반 마이크로그리드 시스템의 과도상태 운용특성에 관한 연구". 한국산학기술학회, Vol 22, pp 1-10, 2021