독립형 마을단위 마이크로그리드의 보호협조기기 운용방안에 관한 연구

이나경, 이예빈, 이민행, 박찬욱, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail: naku9908@koreatecah.ac.kr

A Study on Operation Method of Protection Coordination Device in Off-grid Micro-grid System

Na-Kyung Lee, Ye-bin Lee, Min-Haeng-Lee, Chan-Wook Park, Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율 확보를 위한 마을단위 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다. 여기서, 에너지 자립율이 100%인 경우 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있는데, 이때 사고 발생 위치와 유형에 따라 사고전류의 공급원과 방향이 상이하기 때문에, 상정사고 시나리오에 따른 적정한 보호협조기기의 운용방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 고압 배전선로에서 3상 단락 및 1선 지락사고가 발생할 경우와 ESS측 LVDC 선로에서 단락사고가 발생하는 경우의 사고특성을 분석하여, 독립형 마을단위 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위한 보호협조기기의 운용방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC 및 Off-DAS를 이용하여 CVCF용 ESS, 태양광전원, 지열발전, 수요관리용 ESS 등으로 구성된 독립형 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 보호협조 특성을 분석한 결과, 고압 배전선로에서 3상 단락사고시 필요한 최소 협조시간차인 8 cycle 이상이 확보되어, 마이크로그리드의 보호협조 운용이 가능하지만, 1선 지락사고시에는 최소 협조시간차가 확보되지 않아 불완전협조 특성이 나타남을 알 수 있다.

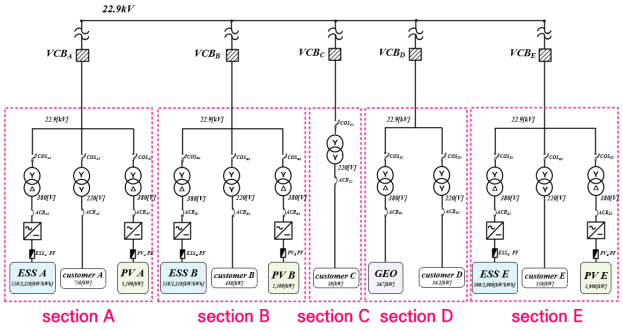
1. 서 론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율 확보를 위한 마을단위 마이크로그리드의 실증 연구가 수행되고 있다. 여기서, 에너지 자립율이 100%인 경우 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있는데, 이때 사고 발생위치와 유형에 따라 사고전류의 방향과 공급원이 상이하기 때문에, 상정사고 시나리오별로 사고특성을 분석하여 이에 따른 보호협조 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 고압 배전선로에서 사고가 발생할 경우와 ESS측 LVDC 선로에서 단락사고가 발생하는 경우의 독립형 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위한 보호협조 운용방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC 및 Off-DAS를 이용하여 CVCF용 ESS, 태양광전원, 지열발전, 수요관리용 ESS 등으로 구성된 독립형 마을단위 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 보호협조 특성을 분석한 결과, 고압 배전선로에서 3상 단락사고시 필요한 최소 협조시간차인 8 cycle 이상이 확보되어, 마이크로그리드의 보호협조 운용이 가능하지만, 1선 지락사고시에는 최소 협조시간차가 확보되지 않아 불완전협조 특성이 나타남을 알 수 있었고, ESS측 LVDC 선로에서 단락사고시에는 ESS fuse가 가장 먼저 동작하여 배터리를 보호하고, 그 후 ACB가 동작하여 사고구간을 분리할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 독립형 마을단위 마이크로그리드의 구성

지역 단위의 신재생에너지의 생산 및 소비 체계를 구축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을단위 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용될 수 있다. 여기서, 독립형 마이크로그리드는 에너지 자립율이 100%인 경우이며, 그림 1과 같이 CVCF용 ESS와 수용가 부하, 신재생에너지 전원, 수요관리용 ESS 등으로 다양하게 구성된다. 또한, 각 수용가의 신재생에너지 전원은 태양광전원 및 지열발전 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 의존도가 높은 신재생에너지 전원을 대신해서 수용가 부하에 에너지를 공급하거나, 피크 부하 시간에 방전하여 경제성을 확보하는 등의 역할을 한다.

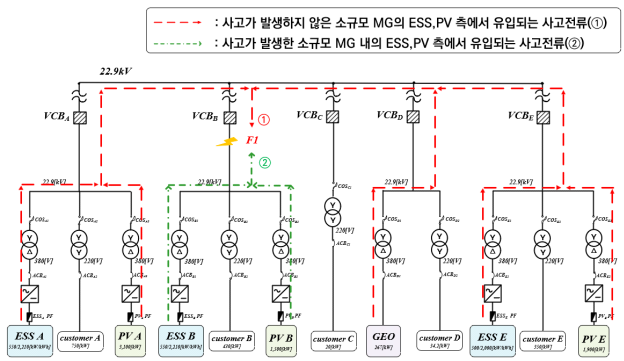


[그림 1] 독립형 마을단위 마이크로그리드의 구성

3. 독립형 마을단위 마이크로그리드의 보호기기 운용 방안

3.1 고압 배전선로 사고 시 보호협조 운용방안

독립형 마을단위 MG의 고압 배전선로에서 사고가 발생할 경우, 사고전류 흐름을 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 사고발생 지점($F1$)으로 흐르는 전류는 사고가 발생한 소규모 MG 내의 ESS와 PV에서 유입되는 사고전류, 사고가 발생하지 않은 소규모 MG의 ESS와 PV, 지열발전에서 공급되는 사고전류로 구성된다. 따라서, 각 소규모 MG의 고압 배전선로 OCR 및 OCGR은 사고지점으로 향하는 사고전류의 값과 방향을 고려하여 정정해야한다.



[그림 2] 고압 배전선로 사고 시, 사고전류 특성

일반적으로 OCR과 OCGR은 한전의 보호협조 정정지침에 따라 동작시간이 결정되는데, CT비, 순시탭, 한시탭에 의하여 정정치가 산정된다. 먼저, 계전기의 CT비는 선로용량 기준의 정격전류에 1.5배를 하여 계산할 수 있는데, 이를 나타내면 식 (1)과 같다.

$$CT\,ratio = \frac{P_L}{\sqrt{3}\times 22.9kV}\times 1.5 \qquad (1)$$

여기서, P_L: 회선당 정격용량

또한, 상과 지락에 대한 순시탭은 전위 보호기기 설치점의 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락전류의 1.4배 이상으로 산정되며, 이를 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\text{순시 } Tap = I_F\times K\times CT\,ratio \qquad (2)$$

여기서, I_F: 사고전류(3상 단락전류, 1선 지락전류), K: 사고종류에 따른 순시탭 계수(단락: 1.5, 지락: 1.4)

한편, 상과 지락에 대한 한시탭은 회선당 운전전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 산정하며, 이를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\text{한시 } Tap = \frac{P_L}{\sqrt{3}\times 22.9kV}\times X\times CT\,ratio \qquad (3)$$

여기서, X: 사고 종류에 따른 한시탭 계수(단락: 1.5, 지락: 0.3)

이에 따라, 독립형 마이크로그리드의 고압 배전선로의 OCR과 OCGR을 정정하면 표 1과 같다.

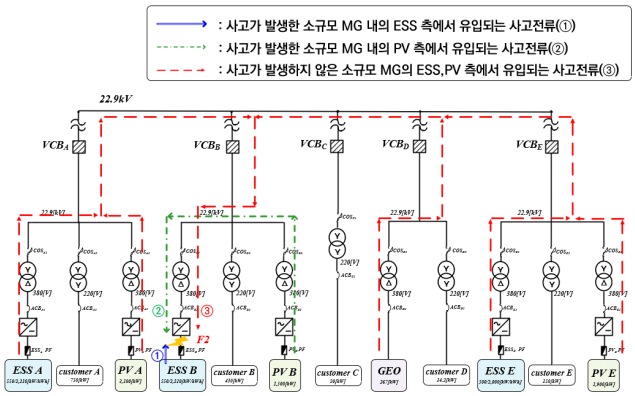
[표 1] 독립형 마을단위 마이크로그리드의 보호기기 정정

보호기기 설치지점		CT비	OCR			OCGR		
			한시 tap	순시 tap	레버	한시 tap	순시 tap	레버
소규모 MG	CB A	40/5	3.75	37.5	2.0	0.75	31.5	1
	CB B	20/5	4.69	138.8	1.5	0.94	133	1
	CB C	40/5	4.125	52.5	1.5	0.83	52.5	1
	CB D	20/5	2.34	138.8	1.8	0.94	108.5	1.1
	CB E	40/5	3.75	41.25	1.5	0.75	57.75	1

3.2 ESS 측 LVDC 선로 단락사고 시 보호협조 운용방안

독립형 마을단위 MG의 ESS에서 배터리와 인버터 사이인 LVDC 선로에서 단락사고가 발생할 경우, 사고전류 흐름을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 사고발생 지점($F2$)으로 흐르는 전류는 사고지점에서 가장 근접한 ESS에서 공급되는 사고전류와 사고가 발생한 소규모 MG내의 PV, 사사고가 발생하지 않은 소규모 MG의 ESS와 PV, 지열발전에서 공급되는 사고전류로 구성된다. 이때, LVDC 선로에서 발생하는 사고전류의 특성은 사고가 발생한 지점과 근접한 ESS의 배터리 외부단락으로 인하여 높은 사고전류가 공급될 수 있다. 따

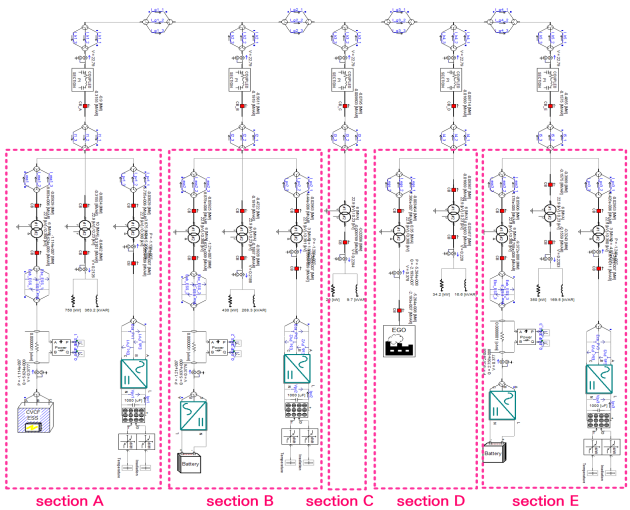
라서, 배터리를 보호하기 위하여 설치된 ESS 퓨즈(PF)는 사고전류 ①를 차단하기 위한 용량으로 산정되어야 한다. 또한, 사고구간을 분리하기 위하여 ACB는 사고전류 ②와 사고전류 ③을 고려하여 산정되어야 한다. 따라서, 가장 먼저 사고전류 ①에 대한 보호로 ESS 퓨즈가 동작하며, 사고전류 ②와 사고전류 ③에 대한 보호는 먼저 ACB가 동작하고, VCB가 순서대로 동작하도록 구성한다.



[그림 3] ESS 측 LVDC 선로 단락사고 시, 사고전류 특성

4. PSCAD/EMTDC에 의한 독립형 마을단위 마이크로그리드의 모델링

독립형 마이크로그리드 전체 시스템 모델링은 그림 4와 같이, 한전 계통과 독립적으로 마을단위 마이크로그리드만으로 구성된다. 여기서, Section A는 CVCF 인버터부와 CVCF용 배터리부로 구성되고, Section B와 E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성된다. 한편, Section C는 수용가부만으로 이루어지며, Section D는 수용가부와 지열발전부로 구성된다.



[그림 4] 독립형 마을단위 마이크로그리드의 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

독립형 마을단위 마이크로그리드의 보호협조기기 간 운용특성을 평가하기 위한 각 section의 수용가 부하 및 태양광전원, ESS, 지열발전, 등의 용량은 표 2와 같이, 실증 모델계통을 바탕으로 상정한다.

[표 2] 독립형 마을단위 마이크로그리드 모델링의 시뮬레이션 조건

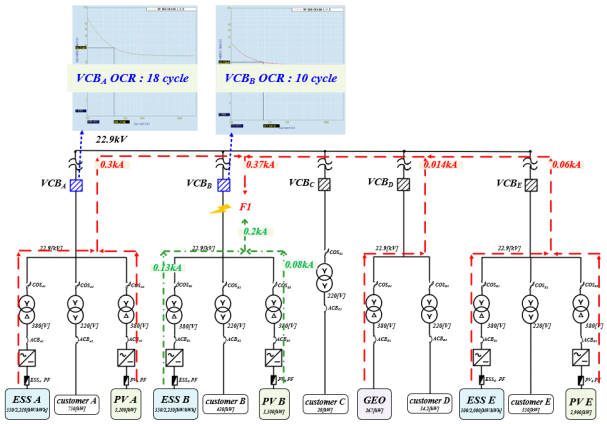
items		contents
배전선로	선종	ACSR 160 [mm2]
section A	수용가 부하	750 [kW], 363.2 [kvar]
	태양광전원	3,100 [kW]
	ESS	550/2,210 [kW/kWh]
section B	수용가 부하	430 [kW], 208.3 [kvar]
	태양광전원	1,500 [kW]
	ESS	450/1,743 [kW/kWh]
section C	수용가 부하	20 [kW], 9.7 [kvar]
section D	수용가 부하	34.2 [kW], 16.6 [kvar]
	지열 발전	267 [kW]
section E	수용가 부하	350 [kW], 169.5 [kvar]
	태양광전원	2,000 [kW]
	ESS	500/2,000 [kW/kWh]

5.2 보호협조기기 간 보호협조 운용특성

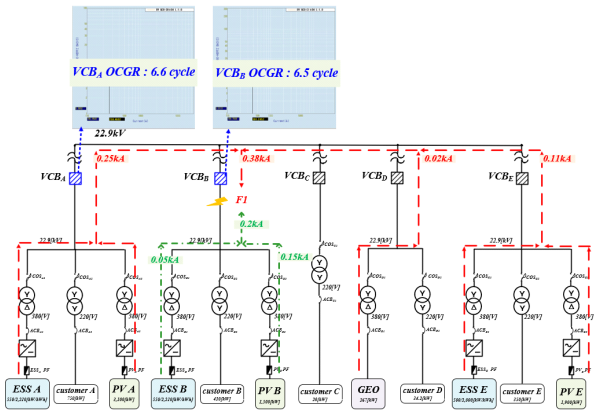
5.2.1 고압 배전선로 사고 시 보호협조 운용특성

그림 1의 section B의 고압 배전선로에서 3상 단락사고와 1선 지락사고가 발생하는 경우, 마이크로그리드 보호협조 운용특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5의 (a)와 같이, *F*1에서 3상 단락사고가 발생한 경우, 사고가 발생하지 않은 소규모 MG에서 0.37kA의 사고전류가 유입되는 것을 알 수 있고, 사고가 발생한 소규모 MG에서는 0.2kA의 사고전류가 유입되는 것을 알 수 있다. 이때, 상기에서 제시한 보호협조기기 정정치에 따라 CB_A의 계전기는 18 cycle에 동작하고 CB_B의 계전기는 10cycle에 동작함을 알 수 있다. 또한, 그림 3의 (b)와 같이, *F*1에서 1선 지락사고가 발생한 경우, 사고가 발생하지 않은 소규모 MG에서 0.38kA의 사고전류가 유입되는 것을 알 수 있고, 사고가 발생한 소규모 MG에서는 0.2kA의 사고전류가 유입되는 것을 알 수 있다. 이때, 상기에서 제시한 보호협조기기 정정치에 따라 CB_A의 계전기는 6.6 cycle에 동작하고 CB_B의 계전기는 6.5 cycle에 동작함을 알 수 있다. 한편, 보호협조기기간 보호협조 동작을 위한 최소 협조시간차는 8 cycle 이상이 요구된다. 따라서, 고압 배전선로인 *F*1지점의 3상 단락사고의 경우 협조시간차가 8 cycle로 안정적으로 보호협조가 가능함을 알 수 있고, 1선 지락사고의 경우, 협조시간차가 1 cycle 이하로 불완전 협조 특성이 나타남

을 알 수 있다.



(a) 3상 단락사고의 보호협조 특성

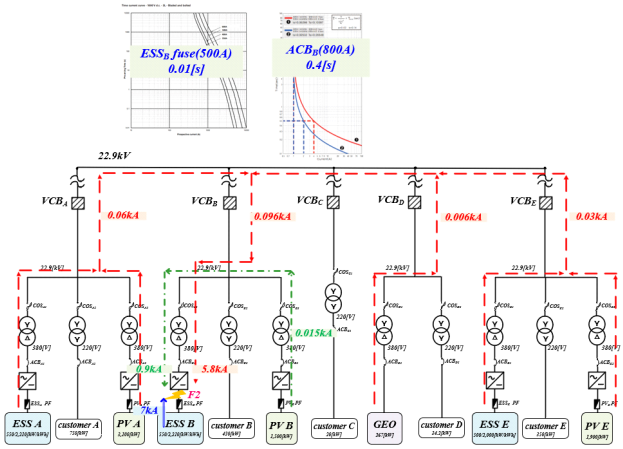


(b) 1선 지락사고의 보호협조 특성

[그림 5] 고압 배전선로 사고시 보호협조 운용특성

5.2.2 ESS 측 LVDC 선로 단락사고 시 보호협조 운용특성

그림 1의 section B의 ESS측의 배터리와 인버터 사이인 LVDC 선로지점에서 단락사고가 발생한 경우에 대하여, 마이크로그리드 보호협조 운용특성을 나타내면 그림 6과 같다. 이때, 사고가 발생하지 않은 소규모 MG에서 5.8kA의 사고전류가 유입되는 것을 알 수 있고, 사고가 발생한 소규모 MG의 PV에서 0.9kA의 사고전류가 유입되며, 사고지점과 가장 근접한 ESS에서 7kA의 사고전류가 유입됨을 알 수 있다. 이때, 상기에서 제시한 보호협조 운용방안에 따라 ESS fuse는 사고 발생 후 약 0.01[s]에 동작하고, ACB는 0.4[s]에 동작함을 알 수 있다. 따라서, ESS fuse가 가장 먼저 동작하여 배터리를 보호하고, 그 다음으로 ACB가 동작하여 사고구간을 분리할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] ESS 측 LVDC 선로 단락사고시 보호협조 운용특성

6. 결 론

본 논문에서는 고압 배전선로에서 사고가 발생할 경우와 ESS측 LVDC 선로에서 단락사고가 발생하는 경우의 독립형 마을단위 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위한 보호협조 운용방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC 및 Off-DAS를 이용하여 CVCF용 ESS, 태양광전원, 지열발전, 수요관리용 ESS 등으로 구성된 독립형 마을단위 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 보호협조 특성을 분석한 결과, 고압 배전선로에서 3상 단락사고시 필요한 최소 협조시간차인 8 cycle 이상이 확보되어, 마이크로그리드의 보호협조 운용이 가능하지만, 1선 지락사고시에는 최소 협조시간차가 확보되지 않아 불완전협조 특성이 나타남을 알 수 있었고, ESS 측 LVDC 선로에서 단락사고시에는 ESS fuse가 가장 먼저 동작하여 배터리를 보호하고, 그 후 ACB가 동작하여 사고구간을 분리할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구 (P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김경화, 에너지 자립율을 고려한 마을형 마이크로그리드의 운용 알고리즘에 관한 연구, 한국산학기술학회 논문지, Vol.23, No.11, pp.885-896, 2022