

태양광전원이 연계된 배전계통 보호협조기기의 최적운용에 관한 연구

권순환*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교
e-mail:sh.kwon@kopo.ac.kr

A Study on Optimal Operation of Protection Devices in Distribution Systems With PV System

Soon-Hwan Kwon*, Dae-Seok Rho**

*Korea College of Polytechnic, **Korean University of Technology and Education

요 약

보호협조기기의 부동작은 사고전류의 분류효과에 의해, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 최소동작전류 보다 낮아져 발생하는 현상이다. 즉, 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 태양광전원의 연계위치와 용량, 연계방식 및 고장지점에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하게 되고, 지락사고가 발생하여도 분류효과에 의하여 보호협조기기가 동작하지 않는 부동작 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, R/C의 설치개소와 사고구간, 태양광전원의 연계구간, 연계용량, 연계방식에 따른 다양한 시나리오에 기반하여, 1선 지락사고 발생시 보호협조기기가 부동작하는 패턴을 추정하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여, 배전계통 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 보호협조기기의 부동작 패턴을 분석한다. 제안한 모델링 및 알고리즘을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 보호기기의 정정치 운용무드의 운용이 태양광전원이 연계된 배전계통 보호기기간의 협조시간을 안정적으로 확보할 수 있음을 알 수 있었고, R/C의 설치개소 및 태양광전원의 연계 패턴에 따라 부동작 현상이 발생함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근, 정부는 기후변화와 미세먼지 등에 의한 환경문제를 해결하기 위하여, 2030년까지 청정에너지의 발전량 20%를 목표로 하는 RE 3020 정책을 시행함에 따라, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되고 있다. 하지만, 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계된 배전계통은 기존의 단방향과 달리 양방향의 조류가 발생하고, 태양광전원의 연계 및 고장위치에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하게 된다[1]. 그러나, 태양광전원의 운용특성을 고려하지 않은 상황에서 기존의 보호기기 정정치를 그대로 적용하고 있어, 보호기기간의 협조시간차를 확보하기 어려운 상황이 발생하고 있으며, 지락사고가 발생하여도 분류효과에 의해 보호협조기기가 동작하지않는 부동작 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원이 연계된 배전선로에서 고려할 수 있는 3가지 Case의 보호기기 정정치 운용모드를 제시하고 보호기기간의 협조시간차 특성을 분석한다.

한편, 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 리클로저의 설치개소와 사고구간, 태양광전원의 연계구간, 연계용량, 연계방식에 따른 다양한 시나리오에 기반하여, 1선 지락사고 발생시 보호협조기기가 부동작하는 패턴을 추정하는 부동작 패턴탐색 알고리즘을 제안한다. 또한, 보호협조

해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여 배전계통 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 보호협조기기의 부동작 패턴을 분석한다. 제안한 배전계통 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 보호기기의 정정치 운용모드의 운용이 태양광전원이 연계된 배전계통 보호기기간의 협조시간을 안정적으로 확보할 수 있음을 알 수 있었고, 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작에 민감함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

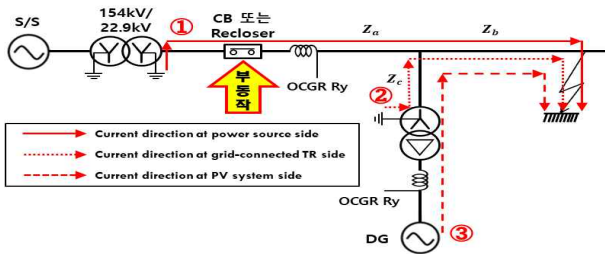
2. 태양광전원이 연계된 배전계통의 보호협조 특성분석

2.1 보호협조기기 협조시간차 특성

대용량의 태양광전원이 연계된 배전계통은 기존의 단방향과 달리 양방향의 조류가 발생하고, 태양광전원의 연계 및 고장위치에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하게 된다. 그러나, 태양광전원의 운용특성을 고려하지 않은 상황에서 기존의 보호기기 정정치를 그대로 적용하고 있어, 보호기기간의 협조시간차를 확보하기 어려운 상황이 발생하고 있다.

2.2 보호협조기기의 부동작 문제점 분석

최근 대용량 태양광전원이 배전계통에 활발히 연계되고 있는데, 연계용 변압기의 Yg-Δ 결선방식으로 인해, 변전소와 태양광전원에서 공급하는 사고전류는 그림 1과 같이 %임피던스의 크기에 의하여 분류되어진다. 즉, 태양광전원이 연계되지 않은 경우에는 그림 1의 ①번과 같이 모든 사고전류가 배전용 변전소에서 고장점으로 단방향으로 공급되지만, 태양광전원이 연계된 경우에는 그림 1의 ②번, ③번과 같이 태양광전원용 연계용변압기의 Yg의 중성선으로 공급되는 사고전류와 태양광전원에서 공급하는 사고전류로 분류되어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 감소하게 된다. 이러한 사고전류의 분류 효과는 태양광전원의 연계위치와 연계용변압기의 용량, 고장 지점 등에 따라 다양하게 나타날 수 있어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 최소동작전류 보다 낮아질 가능성이 있다.

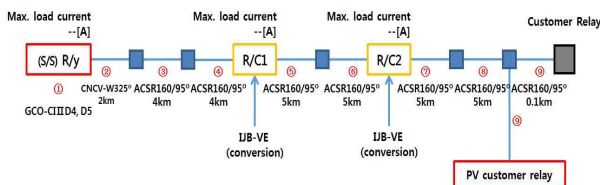


[그림 1] PV 연계 전, 후 사고전류 개념도

3. Off-DAS를 이용한 배전계통 및 보호협조기기 모델링

3.1 Off-DAS를 이용한 협조시간차 모델링

태양광전원의 용량에 따른 각 보호기간의 협조특성을 분석하기 위하여, 보호협조 해석 소프트웨어인 Off-DAS를 이용하여, 태양광전원이 연계된 배전계통을 그림 2와 같이 모델링 하였다. 여기서, 배전계통은 장거리 선로인 총 30[km]의 선로 공장을 기준으로 변전소계전기 및 리클로저, 고객계전기, 태양광전원 고객계전기로 구성된다. 또한, 변전소 및 고객계전기는 강반한시 TC커브특성을 갖는 GCO-CI II D4를 사용하였고, 리클로저는 전위에 N1, N3, 후비에 N2, N4곡선을 사용하였다.

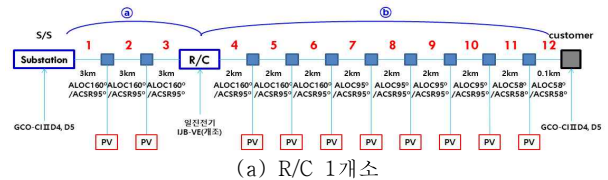


[그림 2] Off-DAS를 이용한 배전계통 모델링

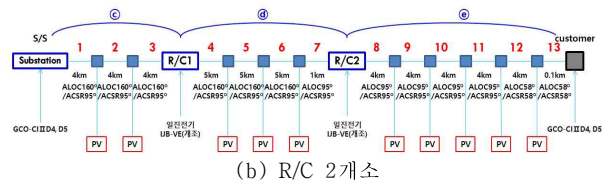
3.2 Off-DAS를 이용한 부동작 모델링

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경

우 보호협조기기의 부동작 특성을 분석하기 위하여, 보호협조기기 해석 소프트웨어인 Off-DAS를 이용하여, 그림 3과 같이 R/C의 설치 수량에 따른 배전계통 모델링을 수행한다. 즉, 그림 3(a)는 25[km] 정도의 중거리 배전선로에서 1개의 R/C가 설치된 경우이며, 변전소계전기와 수용가계전기, 태양광전원으로 구성되며, 그림 3(b)는 30[km] 이상의 장거리 배전선로에서 2개의 R/C가 설치된 경우이며, 변전소계전기와 수용가계전기, 태양광전원으로 구성된다.



(a) R/C 1개소



[그림 3] 모델 배전계통

4. 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘

다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[STEP 1] 선로의 종류 및 공장, 보호협조기기의 정정치 등의 배전계통 데이터와 태양광전원의 용량 및 연계용변압기의 임피던스를 입력한다.

[STEP 2] 리클로저의 설치 개소(RCn)를 확인하여, 1개의 리클로저가 설치된 경우 [STEP 3]으로 이동하고, 2개의 리클로저가 설치된 경우 [STEP 4]로 진행한다.

[STEP 3] 태양광전원이 집중연계된 계통에서 그림 3(a)의 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(α_k)를 산정한다. 또한, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(β_k)를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율($\epsilon_{c,1}$, $\epsilon_{d,1}$)이 기준치(α_k , β_k) 이하이면, 부동작 검토를 수행한다.

$$\epsilon_{c,n} = \frac{(Z_1 \parallel (Z_2 + Z_{PV}))}{Z} \leq \alpha_k \quad (1)$$

$$\epsilon_{d,n} = \frac{(Z_1 \parallel Z_2 \parallel Z_3)}{Z} \leq \beta_k \quad (2)$$

[STEP 4] 그림 3(b)의 ④구간에 태양광전원이 집중연계된

계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(α_2)를 산정한다. 또한, ④구간 그리고 ④구간과 ⑤구간에 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(β_2)를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율($\epsilon_{c,2}$, $\epsilon_{d,2}$)이 기준치(α_2 , β_2) 이하이면, 부동작 검토를 수행한다. 한편, ⑤구간에만 태양광전원이 연계된 경우, [STEP 5]로 진행한다.

[STEP 5] 그림 3(b)에서 ⑤구간에 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ⑤구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(α_3)를 산정한다. 또한, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ⑤구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치(β_3)를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율($\epsilon_{c,2}$, $\epsilon_{d,2}$)이 기준치(α_3 , β_3) 이하이면, 부동작 검토를 수행한다.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 보호협조기기의 정정치 산정 조건

태양광전원의 용량에 따른 각 보호기기의 협조특성을 분석하기 위하여, 태양광전원의 연계용량을 0[MW], 1[MW], 3[MW], 5[MW]의 4가지 경우로 가정하여, 보호기기의 정정치 운용모델에 따라 변전소계전기와 리클로저, 리클로저와 고객계전기 그리고 변전소계전기와 고객계전기에 대한 동작 시간차를 분석한다.

5.2 보호협조기기의 부동작패턴 탐색 조건

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우 상기에서 제시한 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘에 따라, 보호협조기기의 부동작 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	사고구간	PV연계구간	PV 연계방식
R/C 1개소	R/C-고객계전기 (④구간)	R/C-고객계전기 (④구간)	집중
			분산
R/C 2개소	전위 R/C-후비 R/C (④구간)	전위 R/C-후비 R/C (④구간)	집중
		전위 R/C-고객계전기 (④, ⑤구간)	분산
	전위 R/C-고객 (⑥구간)	전위 R/C-고객계전기 (⑥구간)	집중
		전위 R/C-고객계전기 (⑥구간)	분산

5.3 보호기기간의 협조시간차 특성

5.3.1 변전소계전기와 리클로저간의 협조시간차

상기의 Off-DAS 모델링을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 후비 보호기기인 변전소계전기와 전위 보호기기인 리클로저 사이의 협조시간차는 10Cycle(아날로그 타입 10Cycle, 디지털 타입: 3Cycle) 이상으로 확보되어야 한다. 따라서 보호기기간의 적절한 협조여부를 판단하기 위하여, Off-DAS의 모델

링을 바탕으로 OCR과 OCGR에 대한 변전소계전기와 고객계전기간의 협조시간차를 보호기기 정정치 운용모드(Case I, Case II, Case III)별로 분석하면 표 2와 같다. 즉, 변전소 OCR과 리클로저 OCR간의 협조시간차는 37.6Cycle이고, 변전소 OCGR과 리클로저 OCGR의 협조시간차는 26.2Cycle이므로, 정정치준에 적합함을 알 수 있었다. 따라서, 모든 태양광전원 도입용량에 대하여 변전소계전기와 리클로저간의 협조시간차는 만족함을 알 수 있었다.

[표 2] 변전소계전기와 리클로저간의 협조시간차

PV 연계용량(MW)		보호기기간 협조 시간차(cycle)								
		0	1			3			5	
운용 모드		Case I	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II
변전소계전기-R/C	OCR	39.5	38.9	38.9	39.5	37.6	37.6	39.5	36.4	36.4
	OCGR	159.9	111.4	111.4	132.8	82.4	26.2	29.1	66.3	25.0

5.3.2 리클로저와 고객계전기간의 협조시간차

후비 보호기기인 리클로저와 전위 보호기기인 고객계전기 사이의 협조시간차는 정정치침에 따라 6Cycle 이상이 확보되어야 한다. 따라서 보호기기 간의 협조여부를 판단하기 위하여, Off-DAS의 모델링을 바탕으로 OCR과 OCGR에 대한 리클로저와 고객계전기간의 협조시간차를 보호기기 정정치 운용모드(Case I, Case II, Case III)별로 산정하면 표 3과 같다. 이 표에서와 같이, 태양광전원이 3[MW]까지 연계되는 경우에는 모든 조건에서 보호협조에 문제가 없음을 알 수 있었다. 하지만, 태양광전원이 5[MW] 이상이 연계되면, 기존의 정정치 산정방식인 Case I에서 리클로저-고객계전기 OCGR과 리클로저-태양광전원 고객계전기 OCGR 간의 협조시간이 각각 5.3Cycle, 4.7Cycle로 산정되어, 보호협조가 불완전하게 됨을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제안한 태양광전원이 고려된 정정치 운용모드(Case II, Case III)를 적용하는 것이 안정적인 협조를 확인할 수 있었다.

[표 3] 변전소계전기와 리클로저간의 협조시간차

PV 연계용량(MW)		보호기기간 협조 시간차(cycle)								
		0	1			3			5	
운용 모드		Case I	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II
R/C-고객계전기	OCR	41.3	37.9	37.9	42.4	31.4	31.4	40.1	25.6	25.6
	OCGR	16.9	9.3	17.4	21.6	11.8	11.8	19.7	5.3	9.0
R/C-고객계전기	OCR	37.9	37.9	41.3	31.4	31.4	31.4	40.1	25.6	25.6
	OCGR		9.3	17.4	21.2	11.4	11.4	19.1	4.7	8.4

5.3.3 변전소계전기와 고객계전기간의 협조시간차

후비 보호기기인 변전소계전기와 전위 보호기기인 고객계전기 사이의 협조시간차는 17Cycle 이상이 확보되어야 한다. 따라서 보호기기 간의 적절한 협조여부를 판단하기 위하여, Off-DAS의 모델링을 바탕으로 OCR과 OCGR에 대한 변전소계전기와 고객계전기간의 협조시간차를 보호기기 정정치 운용모드(Case I, Case II, Case III)별로 분석하면, 표 4와 같다. 이 표에서와 같이, 태양광전원의 연계용량에 상관없이 변

전소계전기와 고객계전기간의 협조시간차는 확보되고 있음을 알 수 있었다.

[표 4] 변전소계전기와 리클로저간의 협조시간차

PV 연계용량(MW)	보호기기간회 협조 시간차(cycle)									
	0	1			3			5		
운용모드	Case I	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
변전소계전기	OCR	361.6	324.2	324.2	375.4	272.6	272.6	361.6	231.3	231.3
고객계전기	OCGR	263.7	140.6	140.6	59.8	100.1	44.2	56.9	80.7	39.6

5.4 R/C 1개소 설치 계통의 보호협조기기 부동작 패턴분석

상기의 Off-DAS 모델링을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 부동작 패턴을 분석한다. ㉔구간에 태양광전원 9,200[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류가 69[A]까지 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 또한, ㉔구간에 태양광전원의 합계용량 6,900[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 상기의 결과를 종합적으로 나타내면 표 5와 같다. 따라서, R/C 1개소 계통에서는 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 더 작은 연계용량에서 부동작이 발생함을 알 수 있다.

[표 5] R/C 1개소 계통의 변전소계전기 사고전류 특성

PV 연계방식	PV 연계용량 [kW]	S/S계전기 사고전류 [A]
집중	2,000	214
	4,000	134
	6,000	98
	8,000	78
	9,200	69
분산	2,000	202
	4,000	117
	6,000	80
	6,900	69

5.5 R/C 2개소 설치 계통의 보호협조기기 부동작 패턴분석

상기에서 제안한 모델링을 바탕으로 R/C 2개소 계통에서 부동작 패턴을 분석한다. 여기서 분류효과에 의해 부동작이 발생할 가능성이 있는 그림 3(b)의 ㉔, ㉔구간에 대해서만 고려한다. 먼저, ㉔구간에 태양광전원 8,900[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 또한, ㉔구간에 태양광전원의 합계용량 3,500[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 49[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 한편, ㉔구간에 태양광전원의 합계용량이 5,800[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다.

또한, ㉔구간에 태양광전원의 합계용량 2,800[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 49[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 그리고, ㉔구간과 ㉔구간에 태양광전원의 합계용량 9,200[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 한편, 분산연계 시, ㉔구간에 태양광전

원이 조금이라도 연계되거나, ㉔구간에 사고가 발생하고 ㉔구간에 연계될 경우, R/C 전단에 연계된 태양광전원측으로도 사고전류가 흘러, 부동작현상이 발생하지 않는다. 또한, ㉔구간에 사고가 발생하고 ㉔구간에 연계될 경우 S/S와 사고지점 사이의 선로 %임피던스가 감소하여, 부동작현상이 발생하지 않는다. 상기의 결과를 종합적으로 나타내면 표 6과 같다. 따라서, R/C 2개소 계통에서도 R/C 1개소 계통에서와 같이 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 부동작 현상에 더 민감함을 알 수 있다.

[표 6] R/C 2개소 계통의 변전소계전기 사고전류 특성

사고 구간	PV 연계 구간	PV 연계 방식	PV 연계용량 [kW]	사고 전류 [A]	사고 구간	PV 연계 구간	PV 연계 방식	PV 연계용량 [kW]	사고 전류 [A]
㉔	㉔	집중	2,000	209	㉔	㉔	집중	2,000	394
			4,000	130				4,000	383
			6,000	95				6,000	378
			8,000	76				8,000	376
			8,900	69				10,000	375
		분산	2,000	187			분산	2,000	380
			4,000	102				4,000	364
			5,800	69				6,000	358
								8,000	355
								10,000	353
	㉔, ㉔	분산	2,000	224		㉔, ㉔	분산	2,000	478
			4,000	136				4,000	540
			6,000	98				6,000	612
			8,000	77				8,000	685
			9,200	69				10,000	759
㉔	㉔	집중	1,000	121	㉔	㉔	집중	2,000	156
			2,000	76				4,000	197
			3,000	55				6,000	259
			3,500	49				8,000	327
								10,000	399
	㉔, ㉔	분산	1,000	115		㉔, ㉔	분산	2,000	238
			2,000	67				4,000	350
			2,800	49				6,000	486
								8,000	329
								10,000	775

6. 결 론

본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 태양광전원의 연계 여부에 따라 3가지의 보호기기 정정치 운용모드를 제안하였고, 보호협조기기의 부동작 메커니즘과 부동작 패턴탐색 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이를 바탕으로 Off-DAS의 모델링에 의하여 보호기기간의 협조시간차 특성과 부동작 특성을 분석한 결과, 태양광전원이 연계되는 위치와 용량에 따라 부동작현상이 나타남을 확인하였고, R/C 1개소 계통과 2개소 계통 모두 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작에 민감함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 남양현, 최성식, 강민관, 이후동, 박지현, 노대석, “전기저장장치를 이용한 태양광전원이 연계된 배전계통 수용성 향상 방안”에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, , pp. 1031-1039, 8월, 2018년.