

# 리클로저 설치 개소별 보호협조기기의 부동작 패턴탐색에 관한 연구

권순환\*, 태동현\*, 강갑석\*, 이세연\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:sniperno@naver.com

## A Study on Pattern Searching Method of Malfunction for Protection Devices Based on Location Units of Recloser

Soon-Hwan Kwon\*, Dong-Hyun Tae\*, Kab-Seok Kang\*,  
Se-Yeon Lee\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education

### 요약

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 분석하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 보호협조 전용 해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여, 다수의 태양광전원이 연계된 배전계통 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 보호협조기기 부동작 특성을 분석한다. 제안한 모델링 및 알고리즘을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, R/C의 설치개소 및 태양광전원의 연계 패턴에 따라 부동작 현상이 발생함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

### 1. 서론

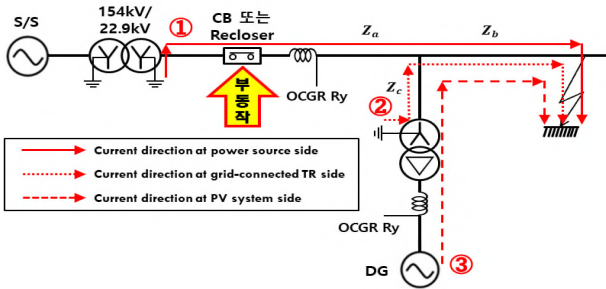
최근, 정부는 기후변화와 미세먼지 등에 의한 지구규모적인 환경문제를 해결하기 위하여, 석탄 발전원의 비중을 줄이고, 2030년까지 청정에너지의 발전량 20%를 목표로 하는 RE 3020 정책을 시행함에 따라, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되고 있다. 하지만, 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 태양광전원의 연계위치와 용량, 연계방식 및 고장지점에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하게 되어, 지락사고가 발생하여도 분류효과에 의하여 보호협조기기가 동작하지 않는 부동작 현상이 발생할 가능성이 있다[1-2]. 따라서, 본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 보호협조기기의 부동작 패턴을 분석하기 위하여, 다양한 시나리오에 기반하여, 1선 지락사고 발생시 보호협조기기가 부동작하는 패턴을 분석하는 부동작패턴 탐색기법을 제안한다. 또한, 보호협조 전용 해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여 다수의 태양광전원이 연계된 배전계통 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 다양한 시나리오에 따른 보호협조기기 부동작 패턴을 분석한다. 제안한 배전계통 모델링을 바탕으로

시뮬레이션을 수행한 결과, 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작에 민감함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

### 2. 보호협조기기의 부동작 문제점 분석

배전계통에서는 사고발생 시 정전구간을 최소화하고, 고장이 확산하는 것을 방지하기 위하여, 변전소 차단기를 포함하여 적어도 한 대 이상의 보호협조기기를 설치하도록 규정하고 있다. 대표적인 배전계통의 보호협조기기는 변전소 차단기(Circuit Breaker), 리클로저(Recloser, R/C), 퓨즈(Fuse), 수용가 차단기 등이 있으며, 주로 사고전류의 크기를 검출하여 동작하는 방식을 채용하고 있다[3]. 따라서, 배전계통에서 사고가 발생하면, 배전용변전소에서 사고지점으로 매우 큰 사고전류가 공급되며, 보호협조기기는 사고전류의 크기에 따라 동작하여 선로 및 배전설비를 보호한다. 그러나, 최근 대용량 태양광전원이 배전계통에 활발히 연계되고 있는데, 연계용 변압기의 Yg- $\Delta$  결선방식으로 인해, 변전소와 태양광전원에서 공급하는 사고전류는 그림 1과 같이 %임피던스의 크기에 의하여 분류되어진다. 즉, 태양광전원이 연계되지 않은 경우에는 그림 1의 ①번과 같이 모든 사고전

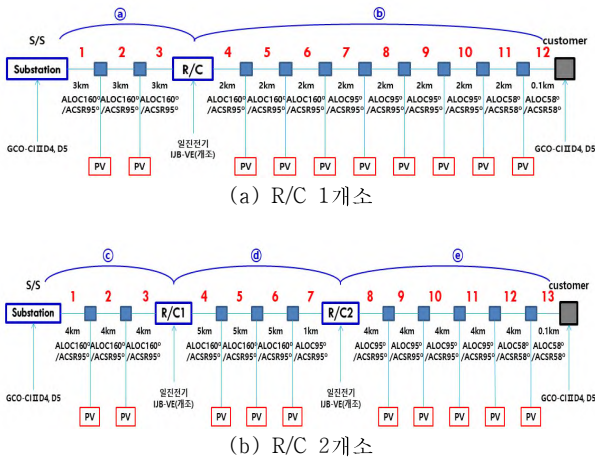
류가 배전용변전소에서 고장점으로 단방향으로 공급되지만 태양광전원이 연계된 경우에는 그림 1의 ②번, ③번과 같이 태양광전원용 연계용변압기의 Yg의 중성선으로 공급되는 사고전류와 태양광전원에서 공급하는 사고전류로 분류되어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 감소하게 된다. 이러한 사고전류의 분류효과는 태양광전원의 연계위치와 연계용변압기의 용량, 고장 지점 등에 따라 다양하게 나타날 수 있어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 최소동작전류 보다 낮아질 가능성이 있다.



[그림 1] PV 연계 전, 후 사고전류 개념도

### 3. Off-DAS를 이용한 보호기기 부동작 모델링

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



[그림 2] 모델 배전계통

### 4. 리클로저 설치 개소별 보호협조기기의 부동작 패턴탐색 알고리즘

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 2(a)의 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_1$ )를 산정한다. 또한, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\beta_1$ )를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율( $\epsilon_{c,1}$ ,  $\epsilon_{d,1}$ )이 기준치( $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ) 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 2(b)의 ④구간에 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_2$ )를 산정한다. 또한, ④구간 그리고 ④구간과 ⑤구간에 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\beta_2$ )를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율( $\epsilon_{c,2}$ ,  $\epsilon_{d,2}$ )이 기준치( $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ ) 이하이면, 부동작 검토를 수행한다. 한편, ③구간에만 태양광전원이 연계된 경우, [STEP 5]로 진행한다.

[STEP 5] 그림 2(b)에서 ③구간에 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ③구간에 사고가 발생한 경우, 식 (1)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_3$ )를 산정한다. 또한, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ③구간에 사고가 발생한 경우, 식 (2)와 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\beta_3$ )를 산정하고, PV연계로 인한 임피던스 변화율( $\epsilon_{c,2}$ ,  $\epsilon_{d,2}$ )이 기준치( $\alpha_3$ ,  $\beta_3$ ) 이하이면, 부동작 검토를 수행한다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우 상기에서 제시한 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘에 따라, 보호협조기기의 부동작 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, R/C 설치 개소에 따라 사고구간과 PV 연계구간, PV 연계방식에 따른 시뮬레이션 조건을 상정한다. 또한, 대상 배전계통의 구간별 선종 및 공장은 표 2와 같다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	사고구간	PV연계구간	PV 연계방식
R/C 1개소	R/C~고객계전기 (㉞구간)	R/C~고객계전기 (㉞구간)	집중
R/C 2개소	전위 R/C~후비 R/C (㉠구간)	전위 R/C~후비 R/C (㉠구간)	분산
		전위 R/C~고객계전기 (㉠, ㉡구간)	집중
	전위 R/C~고객 (㉡구간)	전위 R/C~고객계전기 (㉠, ㉡구간)	분산
		전위 R/C~고객계전기 (㉡구간)	집중

[표 2] 모델 배전계통 구간별 데이터

구간 번호	선 종	정상분임피던스 [%Ω/km]	영상분임피던스 [%Ω/km]	길이 [km]
S/S	-	0.272	37.65	0
1	ALOC160	13.88	29.84	47.96
2	ALOC160	13.88	29.84	117.04
3	ALOC160	13.88	29.84	117.04
4	ALOC160	17.35	37.3	59.95
5	ALOC160	17.35	37.3	146.3
6	ALOC160	17.35	37.3	59.95
7	ALOC 95	29	42.05	67.5
8	ALOC 95	23.2	33.64	54
9	ALOC 95	23.2	33.64	54
10	ALOC 95	23.2	33.64	54
11	ALOC 58	37.92	35.08	63.4
12	ALOC 58	0.948	0.877	1.585

### 5.2 R/C 1개소 설치 계통의 보호협조기기 부동작 패턴분석

상기의 보호협조기기 부동작 메커니즘을 검증하기 위하여, Off-DAS 모델링을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 부동작 패턴을 분석한다. 그림 2 (a)의 ㉠구간은 변전소계전기와 사고 지점까지의 거리가 매우 가까워, 분류효과가 거의 발생하지 않으므로 ㉞구간에 대해서만 고려한다. 한편, ㉞구간에 태양광전원 2,000[kW], 4,000[kW], 6,000[kW], 8,000[kW]가 집중연계되면, 중성선에 214[A], 134[A], 98[A], 78[A]의 전류가 흐르며, 9,200[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류가 69[A]까지 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 또한, ㉠구간에 태양광전원의 합계용량 2,000[kW], 4,000[kW], 6,000[kW]가 분산연계되면, 중성선에 202[A], 117[A], 80[A]의 전류가 흐르며, 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 3과 같다. 따라서, R/C 1개소 계통에서는 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 더 작은 연계용량에서 부동작이 발생함을 알 수 있다.

[표 3] 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

### 5.3 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 2 (b)의 ㉠, ㉡구간에 대해서만 고려한다. 먼저, ㉠구간에 태양광전원 2,000[kW], 4,000[kW], 6,000[kW], 8,000[kW]가 집중연계되면, 중성선에 209[A], 130[A], 95[A], 76[A]의 전류가 흐르며, 8,900[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 또한, ㉡구간에 태양광전원의 합계용량 1,000[kW], 2,000[kW], 3,000[kW]가 집중연계되면 중성선에 121[A], 76[A], 55[A]의 전류가 흐르며, 3,500[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 49[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 한편, ㉠구간에 태양광전원의 합계용량이 2,000[kW], 4,000[kW]가 연계되면 중성선에 187[A], 102[A]의 전류가 흐르며, 5,800[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다.

또한, ㉡구간에 태양광전원의 합계용량 1,000[kW], 2,000[kW]가 분산연계되면 중성선에 115[A], 67[A]의 전류가 흐르며, 2,800[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 49[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 그리고, ㉠구간과 ㉡구간에 태양광전원의 합계용량 2,000[kW], 4,000[kW], 6,000[kW], 8,000[kW]가 분산연계되면 중성선에 224[A], 136[A], 98[A], 77[A]의 전류가 흐르며, 9,200[kW]가 연계될 경우, 중성선의 전류는 69[A]로 감소하여 R/C의 정정치 이하가 되어 부동작할 가능성이 있다. 한편, 여기서는 분산연계 시, ㉡구간에 태양광전원이 조금이라도 연계되거나, ㉡구간에 사고가 발생하고 ㉠구간에 연계될 경우, R/C 전단에 연계된 태양광전원측으로도 사고전류가 흘러, 부동작현상이 발생하지 않는다. 또한, ㉠구간에 사고가 발생하고 ㉡구간에 연계될 경우 S/S와 사고지점 사이의 선로 %임피던스가 감소하여, 부동작현상이 발생하지 않는다. 상기의 결과를 종합적으로 나타내면 표 4와 같다. 따라서, R/C 2개소 계통에서도 R/C 1개소 계통에서와 같이 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 부동작현상에 더 민

감함을 알 수 있다.

[표 4] 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 방식	PV 연계용량 [kW]	사고 전류 [A]		
①	④	집중	2,000	209	④	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	4,000	380		
			4,000	102			6,000	364		
			5,800	69			8,000	358		
			10,000	353			10,000	355		
	④, ⑤	분산	2,000	224	④, ⑤	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		
		④, ⑤	분산	2,000		224	④, ⑤	분산	2,000	457
				4,000		136			4,000	521
				6,000		98			6,000	592
				8,000		77			8,000	666
②	④	집중	1,000	121	②	분산	2,000	156		
			2,000	76			4,000	197		
			3,000	55			6,000	259		
		3,500	49	8,000			327			
		10,000	399	10,000			399			
		분산	1,000	115			④, ⑤	분산	2,000	238
	2,000		67	4,000		350				
	2,800		49	6,000		486				
				8,000		329				
				10,000		775				

5.4 임피던스 특성에 의한 보호협조기기 부동작 패턴분석

상기의 내용을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 태양광전원 연계시 부동작 현상이 발생한 경우에 대하여, %Z의 변화분 특성을 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, 태양광전원이 집중 연계되면 연계 전의 %Z가 1,384.2[Ω]이고, 연계 후에는 565.56[Ω]으로 약 41%로 감소되며, 태양광전원이 분산연계 되면 %Z가 591.11[Ω]으로 약 43%로 감소된다. 즉, 태양광전원 연계방식(집중, 분산)에 따라 %Z의 감소분이 약 41%, 43%이하가 되면, R/C 1개소에 대하여 보호기기의 부동작 현상이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

[표 5] R/C 1개소 계통의 PV연계 전/후의 %Z 특성

connection types	connection of PV system	Z1		Z0		equivalent Z[Ω]
		R[Ω]	jX[Ω]	R0[Ω]	jX0[Ω]	
concentrated	without	117.68	234.37	319.55	799.33	1,384.17
	with	117.68	234.37	2.29	44.47	565.56
	with/without	100%	100%	0.71%	5.56%	40.86%
distributed	without	117.68	234.37	319.55	799.33	1,384.17
	with	117.68	234.37	6.75	70.51	591.11
	with/without	100%	100%	2.11%	8.82%	42.71%

또한, R/C 2개소 계통에서 태양광전원 연계시 부동작 현상이 발생한 경우에 대하여, %Z의 변화분 특성을 나타내면 Table 6과 같다. 여기서, 태양광전원이 집중연계되면 연계 전의 %Z가 1,411.6[Ω], 2,565.8[Ω]이고, 연계 후에는 557.5[Ω], 1,052.7[Ω]으로 약 40%, 42%로 감소되며, 태양광전원이 분산 연계 되면 %Z가 604.4[Ω], 1,107[Ω]으로 약 44%로 감소된다.

또한, 태양광전원이 다른 구간에 분산연계될 경우, %Z가 557.1[Ω]로 약 40%로 감소된다. 즉, 태양광전원 연계방식(집중, 분산)에 따라 %Z의 감소분이 약 42%, 44%이하가 되면, R/C 2개소에 대하여 보호기기의 부동작 현상이 발생할 수 있어, R/C 1개소 계통과 유사한 패턴이 나타남을 알 수 있다.

[표 6] R/C 2개소 계통의 PV연계 전/후의 %Z 특성

connection types	connection sections	connection of PV system	Z1		Z0		equivalent Z[Ω]
			R[Ω]	jX[Ω]	R0[Ω]	jX0[Ω]	
concentrated	④	without	93.96	239.07	323.73	837.41	1,411.55
		with	93.96	239.07	2.28	45.89	557.48
		with/without	100%	100%	0.71%	5.48%	39.49%
	⑤	without	230.48	417.23	616.63	1,494.34	2,565.83
		with	230.48	417.12	4.25	110.04	1,052.66
		with/without	100%	100%	0.69%	7.36%	41.03%
distributed	④	without	93.96	239.07	323.73	837.41	1,411.55
		with	93.96	239.07	8.66	93.43	604.43
		with/without	100%	100%	2.68%	11.16%	42.82%
	⑤	without	230.48	417.12	616.63	1,494.34	2,565.83
		with	230.48	417.12	15.37	165.08	1,107.04
		with/without	100%	100%	2.49%	11.09%	43.15%
④, ⑤	without	93.96	239.07	323.73	837.41	1,411.55	
	with	93.96	239.07	2.45	45.39	557.07	
		with/without	100%	100%	0.75%	5.16%	39.47%

5. 결 론

본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 보호협조기기의 부동작 메커니즘과 부동작 패턴탐색 알고리즘을 제안하였다. 이를 바탕으로 Off-DAS의 모델링에 의하여 부동작 특성을 분석한 결과, 태양광전원이 연계되는 위치와 용량에 따라 부동작현상이 나타남을 확인하였고, R/C 1개소 계통과 2개소 계통 모두 분산연계방식이 집중 연계방식에 비하여 보호기기 부동작에 민감함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 (No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 남양현, 최성식, 강민관, 이후동, 박지현, 노대석, “전기저장장치를 이용한 태양광전원이 연계된 배전계통 수용성 향상 방안에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, , pp. 1031-1039, 8월, 2018년.
- [2] A. Girgis, S. Brahma, “Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System”, Power Engineering, LESCOPE ‘01. 2001 Large Engineering Systems Conference, 11-13. pp. 115-119, July, 2001.
- [3] IEEE 1547.1 “IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System”, J. IEEE June, 2005.