

# 태양광전원이 연계된 배전계통 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘에 관한 연구

권순환, 태동현, 이후동, 노대석\*  
한국기술교육대학교 전기공학과

## A Study on Searching Algorithm for Malfunction Pattern of Protection Devices in Distribution System with PV Systems

Soon-Hwan Kwon, Dong-Hyun Tae, Hu-Dong Lee, Dae-Seok Rho\*  
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**요약** 최근, 기후변화와 미세먼지 등에 의한 지구규모적인 환경문제를 해결하기 위하여, 정부에서는 RE 3020 정책을 시행하고 있으며, 이에 따라 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되고 있다. 하지만, 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, 리클로저(recloser, 이하 R/C)의 설치개소에 따라 보호협조기기가 동작하지 않는 부동작 메커니즘을 제시하고, 이를 바탕으로 다양한 시나리오에 기반한 보호협조기기의 부동작 패턴탐색 알고리즘을 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 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘 및 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, R/C의 설치개소 및 태양광전원의 연계 패턴에 따라 부동작 현상이 발생함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

**Abstract** Recently, the Korean government developed the RE3020 (renewable energy) policy to overcome environmental problems, such as fine dust, climate change, and large-scale PV systems interconnected with a distribution system. When a large-scale PV system is interconnected in the distribution system, however, a malfunction can occur, and the protection devices may not be operated because of the dividing effect depending on the magnitude and direction of fault current as well as connection types and location of the PV system. Therefore, this paper proposes a search algorithm for the malfunction pattern of protection devices based on various scenarios, when large-scale PV systems are operated and interconnected in a distribution system. This paper presents a malfunction mechanism of protection devices according to the installation locations of recloser (R/C). Furthermore, the modeling of a distribution system with large-scale PV systems was performed using Off-DAS S/W, and the malfunction patterns of protection devices were analyzed based on a range of scenarios. From the simulation results with the proposed model and algorithm for searching for protection devices, it was confirmed that they are useful and effective in identifying a malfunction phenomenon depending on the installation location of the R/C and connection type of PV system.

**Keywords** : Distribution System, Malfunction Mechanism, Off-DAS S/W, Over Current Ground Relay(OCGR), Photovoltaic(PV) System, Protection Devices

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090)에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)  
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received August 6, 2020

Revised August 31, 2020

Accepted September 4, 2020

Published September 30, 2020

## 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[1-3]. 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[4-7].

따라서, 본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 보호협조기기가 동작하지 않는 부동작 메커니즘을 제시하고, 이를 바탕으로 부동작 패턴탐색 알고리즘을 제안한다. 즉, 리클로저(R/C)의 설치개소와 사고지점 등 다양한 조건에 따라 보호협조기기의 부동작 현상이 발생할 가능성이 있는 7가지의 부동작 메커니즘을 제시한다. 그리고, R/C의 설치개소와 사고구간, 태양광전원의 연계구간, 연계용량, 연계방식에 따른 다양한 시나리오에 기반하여, 1선 지락사고 발생시 보호협조기기가 부동작하는 패턴을 분석하는 부동작 패턴 탐색 알고리즘을 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 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘 및 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작에 민감함을 알 수 있었다. 또한, 태양광전원 연계 전후 %Z의 변화분 특성에 따라 부동작 현상이 발생함을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

## 2. 보호협조기기 부동작 메커니즘 분석

### 2.1 분류효과에 의한 보호협조기기의 부동작 메커니즘

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 사

고전류의 크기를 검출하여 동작하는 방식을 채용하고 있다. 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-Δ 결선방식으로 인해, 변전소와 태양광전원에서 공급하는 사고전류는 Fig. 1과 같이 %임피던스의 크기에 의하여 분류되어진다. 즉, 태양광전원이 연계되지 않은 경우에는 Fig. 1의 ①번과 같이 모든 사고전류가 배전용변전소에서 고장점으로 단방향으로 공급되지만, 태양광전원이 연계된 경우에는 Fig. 1의 ②번, ③번과 같이 태양광전원용 연계용 변압기의 Yg의 중성선으로 공급되는 사고전류와 태양광전원에서 공급하는 사고전류로 분류되어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 감소하게 된다. 이러한 사고전류의 분류효과는 태양광전원의 연계위치와 연계용 변압기의 용량, 고장지점 등에 따라 다양하게 나타날 수 있어, 보호협조기기를 통과하는 사고전류가 최소동작전류 보다 낮아질 가능성이 있다[8,9].

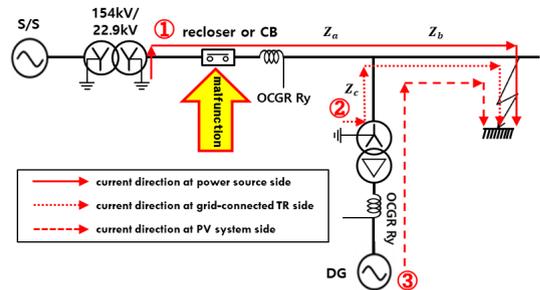


Fig. 1. Concept of fault current with and without PV system

Fig. 1과 같이, 태양광전원이 연계되지 않은 경우, 보호협조기기를 통과하는 사고전류( $I_{OCGR}$ )는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 변전소에서 사고지점까지의 선로 임피던스에 의하여 사고전류의 크기가 산정된다. 한편, 태양광전원이 연계된 경우, 보호협조기기를 통과하는 사고전류( $I_{OCGR, DG}$ )는 임피던스의 분류효과에 의하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 사고지점을 기준으로 변전소측에서 공급되는 선로임피던스와 태양광전원측의 연계용 변압기의 임피던스가 병렬로 연결되어, 분모항의 값이 식 (1)의 경우보다 증가하므로, 보호협조기기를 통과하여 공급되는 사고전류는 감소하게 된다. 따라서, 태양

광전원의 연계로 인한 배전계통의 임피던스 병렬화에 의하여, 보호협조기기가 동작하지 않는 부동작 현상이 발생할 가능성이 있다.

$$I_{OCGR} = \frac{1}{Z_a + Z_b} [PU] \quad (1)$$

$$I_{OCGR,DG} = \frac{1}{\frac{Z_a Z_b}{Z_c} + Z_a + Z_b} [PU] \quad (2)$$

여기서,  $I_{OCGR}$  : S/S 계전기가 감지하는 사고전류,  $Z_a$  : S/S에서 PV 연계점까지의 임피던스,  $Z_b$  : 연계점에서 사고점까지 임피던스,  $Z_c$  : PV에서 연계점까지의 임피던스,  $I_{OCGR,DG}$  : PV 연계 후 S/S 계전기가 감지하는 사고전류

### 2.2 R/C 1개소 계통의 부동작 메커니즘

일반적으로 20[km] 정도의 공장을 가진 중거리 배전계통에서는 1개의 R/C를 설치하여, 계통으로부터 사고지점을 분리해 진전한 구간을 보호하고 있다. 그러나, 태양광전원이 연계되는 경우, 태양광전원의 연계용변압기에 의해 분류효과가 발생하여, 보호협조기기 측으로 흐르는 사고전류가 감소될 가능성이 있다. 이에 따른 R/C 1개소 계통에서 보호협조기기의 부동작 메커니즘을 나타내면 Fig. 2와 같다. 여기서, Fig. 2(a)는 태양광전원이 집중적으로 연계된 경우이고, Fig. 2(b)는 분산적으로 배치된 경우를 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 2(a)의 ㉑구간에서 사고가 발생하면, 변전소계전기와 사고지점까지의 거리가 매우 가까워, 분류효과가 크게 발생하지 않으므로 이 경우에 대해서는 고려하지 않는다. 또한, Fig. 2(a)의 ㉒구간에서 사고가 발생하면, 변전소계전기와 사고지점의 거리에 따라 선로임피던스가 증가하기 때문에, 태양광전원의 사고전류는 태양광전원의 연계용변압기의 임피던스 크기에 따라 분류하여 흐르게 된다. 즉, 태양광전원의 용량과 연계지점에 의하여 임피던스의 크기가 변하므로, 사고전류의 분류효과는 다양하게 발생할 수 있으므로 보호협조기기가 부동작할 가능성이 있다.

한편, Fig. 2(b)와 같이, 다수의 태양광전원이 분산배치되는 경우, 변전소측과 태양광전원측의 임피던스 병렬화에 의하여 사고전류의 분류효과가 증가하여 보호기기의 부동작이 발생할 가능성이 커진다. 따라서 태양광전원의 분산배치에 대한 보호협조기기의 부동작 특성에 대한 분석이 요구된다.

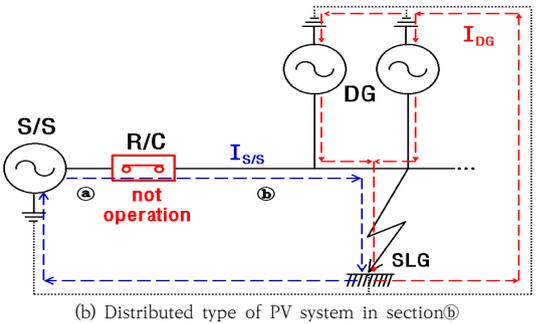
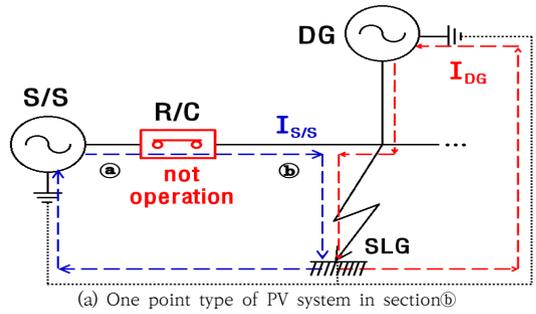


Fig. 2. Malfunction mechanism in case of 1 R/C with fault in section ㉒

### 2.3 R/C 2개소 계통의 부동작 메커니즘

일반적으로 30[km] 이상의 장거리 배전선로에서 2개의 R/C가 설치될 경우, 1개의 R/C에 비하여 보호협조기기가 부동작할 가능성이 있는 경우의 수가 증가하는데, 이 경우의 부동작 메커니즘을 나타내면, Fig. 3과 같다. 여기서, Fig. 3(a)는 태양광전원이 ㉑구간에 집중적으로 연계된 경우이고, Fig. 3(b)는 ㉑구간에서만 분산적으로 배치된 경우이며, Fig. 3(c)는 ㉑구간과 ㉒구간에 분산적으로 배치된 경우를 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 3(a)에서와 같이 태양광전원이 ㉑구간에 설치되고 이 구간에서 사고가 발생하면, 사고전류는 1번 R/C측과 태양광전원측에서 공급되므로, 연계되는 태양광전원의 용량과 연계지점에 따라, 1번 R/C의 사고전류가 감소하여 부동작이 발생할 가능성이 있다.

또한, Fig. 3(b)와 같이 ㉑구간에 다수의 태양광전원이 분산배치되는 경우, 변전소측과 태양광전원측의 임피던스 병렬화에 의하여 사고전류의 분류효과가 증가하여 보호기기의 부동작이 발생할 가능성이 커진다. 한편, Fig. 3(c)에서와 같이 태양광전원이 ㉑구간과 ㉒구간에 분산배치되는 경우, ㉑구간에서 사고가 발생하면, 연계되는 태양광전원의 용량과 연계지점에 따라 1번 R/C의 사고전류가 감소하여, 부동작이 발생할 수 있지만, ㉒구간에

서 사고가 발생하는 경우, 2번 R/C가 동작하여 부동작이 일어날 가능성이 낮아진다.

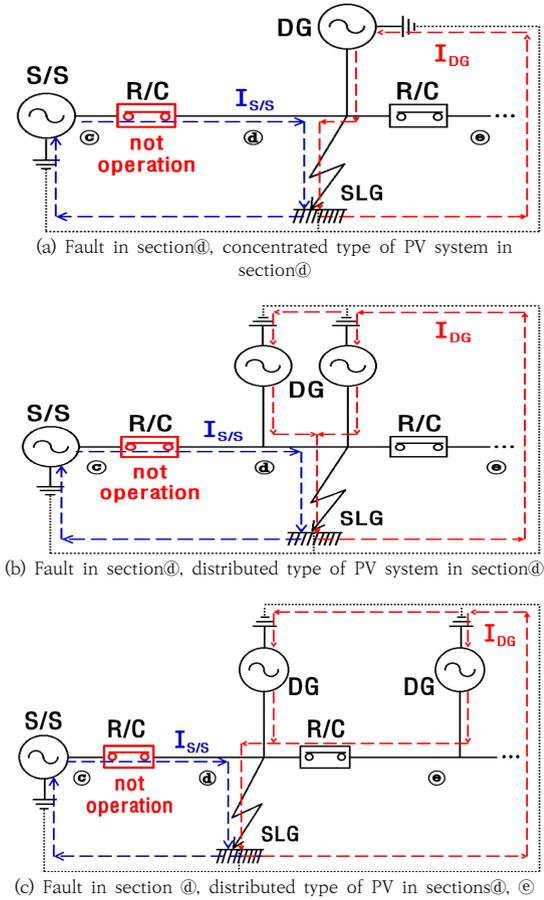


Fig. 3. Mechanism of malfunction in distribution system with 1EA R/C

한편, 2개의 R/C가 설치된 계통에서 ㉔구간에 사고가 발생한 경우, 보호기기의 부동작 메커니즘을 나타내면 Fig. 4와 같다. 여기서, Fig. 4(a)는 태양광전원이 ㉔구간에 집중적으로 연계된 경우이고, Fig. 4(b)는 ㉔구간에 분산적으로 배치된 경우를 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 4(a)에서와 같이 ㉔구간에서 사고가 발생하면, 사고전류는 2번 R/C측과 태양광전원 측으로 분류하여 흐르게 된다. 여기서, 2번 R/C가 1번 R/C보다 정정치 값이 작게 운용되므로, 2번 R/C의 동작여부만 확인하면 된다. 따라서, 태양광전원이 ㉔구간에 설치되고 이 구간에서 사고가 발생하면, 사고전류는 2번 R/C측과 태양광전원측에서 공급되므로, 연계되는 태양광전원의 용량과 연계지점에 따라, 2번 R/C의 사고전류가 감소하여 부동작이 발생할

가능성이 있다. 또한, Fig. 4(b)와 같이 ㉔구간에 다수의 태양광전원이 분산배치되는 경우, 변전소측과 태양광전원측의 임피던스 병렬화에 의하여, 사고전류의 분류효과가 증가하여, 보호기기의 부동작이 발생할 가능성이 커진다. 한편, 태양광전원이 ㉔구간에서 연계되고 ㉔구간에서 사고가 발생하는 경우, 2번 R/C가 동작하여 부동작이 일어날 가능성이 낮아진다.

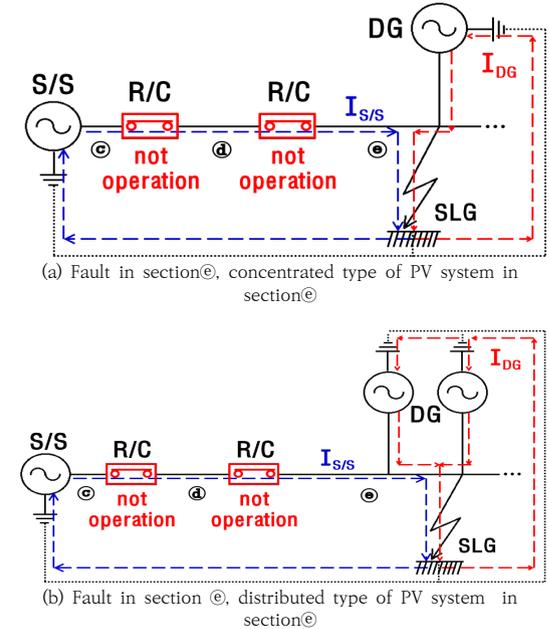


Fig. 4. Mechanism of malfunction in distribution system in case of fault section ㉔ with 2EA R/Cs

### 3. 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘

상기에서 제한한 보호협조기기의 부동작 메커니즘을 바탕으로 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( $RC_n$ )를 확인하여, 1개의 리클로저가 설치된 경우 [STEP 3]의

로 이동하고, 2개의 리클로저가 설치된 경우 [STEP 4]로 진행한다.

[STEP 3] Fig. 2(a)와 같이 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (3)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_1$ )를 산정한다. 또한, Fig. 2(b)와 같이 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ⑥구간에 사고가 발생한 경우, 식 (4)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.

$$\epsilon_{c,n} = \frac{(Z_1 \parallel (Z_2 + Z_{PV}))}{Z} \leq \alpha_k \quad (3)$$

$$\epsilon_{d,n} = \frac{(Z_1 \parallel Z_2 \parallel Z_3)}{Z} \leq \beta_k \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_{c,n}$ ,  $\epsilon_{d,n}$  : PV 집중 및 분산배치 시, R/C 설치 수량에 따른 임피던스 변화율,  $Z$  : PV 연계 전 임피던스,  $Z_1$  : S/S에서 사고지점까지 임피던스,  $Z_2$  : 사고지점에서 직하 PV까지의 임피던스,  $Z_3$  : 사고지점으로부터 말단 PV까지 임피던스,  $Z_{PV}$  : PV 임피던스,  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$  : 집중 및 분산배치 시, 패턴별 부동작 발생 기준치

[STEP 4] Fig. 3(a)와 같이, ④구간에 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (3)과 같이 임피던스 병렬화에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_2$ )를 산정한다. 또한, Fig. 3의 (b), (c)와 같이, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ④구간에 사고가 발생한 경우, 식 (4)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, ②구간에만 태양광전원이 연계된 경우, [STEP 5]로 진행한다.

[STEP 5] Fig. 4(a)와 같이, ②구간에 태양광전원이 집중연계된 계통에서 ②구간에 사고가 발생한 경우, 식 (3)과 같이 임피던스 병렬화

에 따른 부동작 발생 기준치( $\alpha_3$ )를 산정한다. 또한, Fig. 4(b)와 같이, 태양광전원이 분산연계된 계통에서 ②구간에 사고가 발생한 경우, 식 (4)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.

#### 4. Off-DAS를 이용한 보호협조기기 모델링

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우 보호협조기기의 부동작 특성을 분석하기 위하여, 보호협조기기 해석 소프트웨어인 Off-DAS를 이용하여, Fig. 5와 같이 R/C의 설치 수량에 따른 배전계통 모델링을 수행한다. 즉, Fig. 5(a)는 25[km] 정도의 중거리 배전선로에서 1개의 R/C가 설치된 경우이며, 변전소계전기와 수용가계전기, 태양광전원으로 구성되며, Fig. 5(b)는 30[km] 이상의 장거리 배전선로에서 2개의 R/C가 설치된 경우이며, 변전소계전기와 수용가계전기, 태양광전원으로 구성된다.

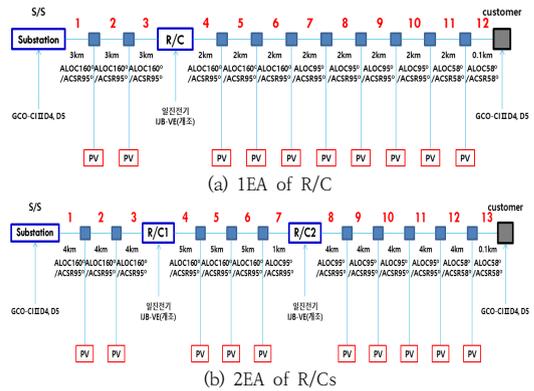


Fig. 5. Modeling of distribution system

또한, Fig. 6은 태양광전원용 고객계전기의 정정치를 나타낸 것으로, 강반한시 TC 커브특성을 갖는 GCO-CI II D4, GCO-CI II D5의 OCR과 OCGR을 적용하여 모델링한 것이다. 여기서, CT비는 600/5, 연계용 변압기의 %임피던스는 5%, 결선방식은 Yg-Δ, 인버터를 통한 연계방식을 적용한다. 그리고 변전소계전기도 태양광전원용 고객계전기와 동일한 모델을 적용하며, CT비는

600/5, OCR 탭과 Lever는 각각 4, 3.8 그리고 OCGR의 탭과 Lever는 각각 0.5, 4.5를 적용한다. 한편, 1번 R/C는 IJB-VE(개조)의 N2, N4 곡선을 적용하고, 단락과 지락의 최소동작전류는 400A, 70A, 2번 R/C는 IJB-VE(개조)의 N1, N3 곡선을 적용하고 단락과 지락의 최소동작전류는 250A와 50A를 적용한다.

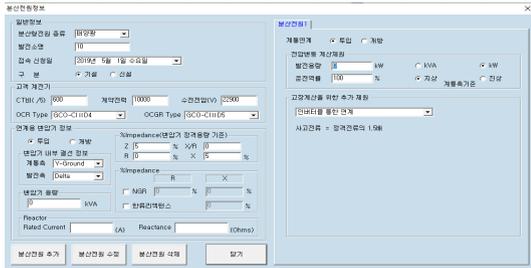
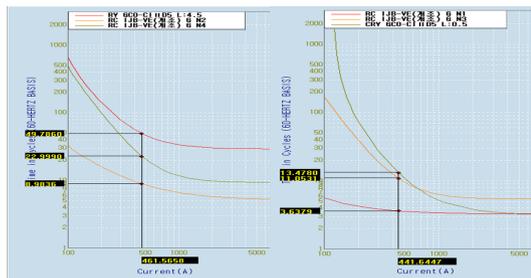


Fig. 6. Modeling for setting values of relay at PV customer

한편, 상기의 변전소계전기와 1번, 2번 R/C, 고객계전기, 태양광전원 고객계전기의 정정치를 바탕으로 구간별 OCGR 협조시간차 곡선을 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서, 변전소계전기와 1번 R/C의 협조시간차는 26.8cycle이고, 1번 R/C와 2번 R/C의 협조시간차는 13.1cycle, 2번 R/C와 고객계전기의 협조시간차는 7.4cycle, 2번 R/C와 태양광전원 고객계전기의 협조시간차는 7.4cycle로 산정되어, 보호협조 기준을 만족함을 알 수 있다.



(a) Relay at substation and R/C (b) R/C and relay at PV customer  
Fig. 7. Modeling of coordination time interval for OCGR

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되

는 경우 상기에서 제시한 보호협조기기의 부동작패턴 탐색알고리즘에 따라, 보호협조기기의 부동작 특성을 분석하기 위하여 Table 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 Table 2와 같다.

Table 1. Simulation conditions

items	fault sections	connection of PV system	connection types of PV system
installation of R/C 1EA	R/C to customer relay (section ㉑)	R/C to customer relay (section ㉑)	concentrated
		R/C to customer relay (section ㉑)	distributed
installation of R/C 2EA	backward R/C to forward R/C (section ㉔)	backward R/C to forward R/C (section ㉔)	concentrated
		backward R/C to customer relay (section ㉔, ㉑)	distributed
	forward R/C to customer relay (section ㉑)	forward to customer relay (section ㉑)	concentrated
			distributed

Table 2. % impedance of distribution system

sections	cable types	Z1[%Ω/km]		Z0[%Ω/km]		length [km]
		%R	%X	%R	%X	
S/S	-	0.272	37.65	0	47.39	TR
1	ALOC160	13.88	29.84	47.96	117.04	3
2	ALOC160	13.88	29.84	47.96	117.04	3
3	ALOC160	13.88	29.84	47.96	117.04	3
4	ALOC160	17.35	37.3	59.95	146.3	2
5	ALOC160	17.35	37.3	59.95	146.3	2
6	ALOC160	17.35	37.3	59.95	146.3	2
7	ALOC 95	29	42.05	67.5	154.25	2
8	ALOC 95	23.2	33.64	54	123.4	2
9	ALOC 95	23.2	33.64	54	123.4	2
10	ALOC 95	23.2	33.64	54	123.4	2
11	ALOC 58	37.92	35.08	63.4	132.48	2
12	ALOC 58	0.95	0.88	1.59	3.31	0.1

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

상기의 보호협조기기 부동작 메커니즘을 검증하기 위하여, 제한한 알고리즘을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 부동작 패턴을 나타내면 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 이 그림에서 ㉑구간은 변전소계전기와 사고지점까지의 거리가 매우 가까워, 분류효과가 거의 발생하지 않으므로 ㉒구간에 대해서만 고려한다. 한편, Fig. 8의 ㉒구간에 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, Fig. 9의 ㉑구간에 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 Table 3과 같다. 따라서, R/C 1개소 계통에서는 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 더 작은 연계용량에서 부동작이 발생함을 알 수 있다.

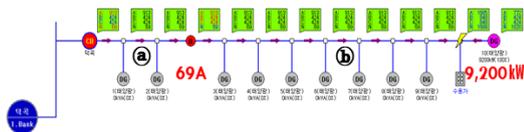


Fig. 8. Characteristics of malfunction at 1 point type of PV system in case of 1EA R/C

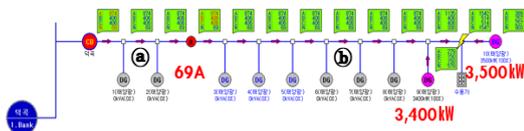


Fig. 9. Characteristics of malfunction at distributed type of PV system in case of 1EA R/C

Table 3. Characteristics of fault current at S/S relay in case of 1 R/C

connection types of PV system	capacity of PV system [kW]	fault current [A]
concentrated	2,000	214
	4,000	134
	6,000	98
	8,000	78
	9,200	69
distributed	2,000	202
	4,000	117
	6,000	80
	6,900	69

### 5.3 R/C 2개소 설치 계통의 보호협조기기 부동작 패턴분석

상기에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 R/C 2개소 계통에서 부동작 패턴을 나타내면 Fig. 10, Fig. 11과 같으며, 여기서 분류효과에 의해 부동작이 발생할 가능성이

있는 ㉑, ㉒구간에 대해서만 고려한다. Fig. 10(a)의 ㉑구간에 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, Fig. 10(b)의 ㉒구간에 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, Fig. 11(a)의 ㉑구간에 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, Fig. 11(b)의 ㉑구간과 ㉒구간에 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. 그리고, Fig. 11(c)의 ㉒구간에 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.

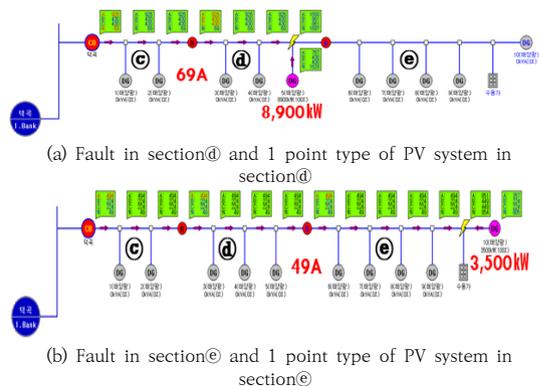


Fig. 10. Characteristics of malfunction at 1 point type of PV system with 2EA R/Cs

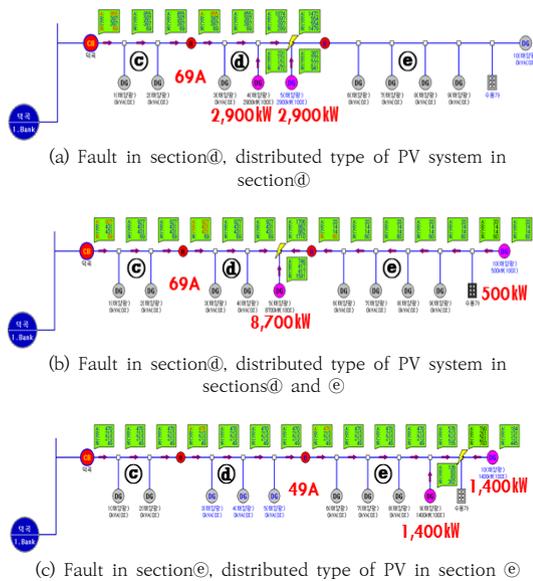


Fig. 11. Characteristics of malfunction at distributed type of PV system with 2EA R/Cs

한편, 상기의 경우를 제외하고 ④구간과 ⑤구간에 사고가 발생하는 경우, 태양광전원이 ③, ④, ⑤구간에 집중 또는 분산연계 되어도, 태양광전원을 통하여 전위 또는 후비 R/C를 통과하여 사고전류가 흘러 R/C가 정상적으로 동작하여, 부동작현상이 발생하지 않는다. 상기의 결과를 종합적으로 나타내면 Table 4와 같다. 따라서, R/C 2개소 계통에서도 R/C 1개소 계통에서와 같이 태양광전원의 집중연계형 방식보다 분산연계형 방식이 부동작현상의 발생 가능성이 높음을 알 수 있다.

Table 4. Characteristics of fault current at S/S relay with 2EA R/Cs

fault locations	connection sections	connection types	capacity of PV [kW]	fault current [A]	fault locations	connection types	connection method	capacity of PV [kW]	fault current [A]
④	④	concentrated	2,000	209	④	③	concentrated	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
			8,900	69				10,000	375
	④, ⑤	distributed	2,000	187		④	distributed	2,000	380
			4,000	102				4,000	364
			5,800	69				6,000	358
			2,000	224				8,000	355
			4,000	136				10,000	353
			6,000	98				2,000	478
⑤	⑤	concentrated	2,000	224	⑤	③, ④	distributed	4,000	540
			4,000	136				6,000	612
			6,000	98				8,000	685
			8,000	77				10,000	759
			9,200	69				2,000	457
			9,200	69				4,000	521
	④, ⑤	distributed	4,000	102		③, ④, ⑤	distributed	6,000	592
			5,800	69				8,000	666
			8,000	77				10,000	740
			9,200	69				10,000	740
			9,200	69				10,000	740
			9,200	69				10,000	740

③	③	concentrated	1,000	121	③	③, ④	distributed	2,000	156
			2,000	76				4,000	197
3,000	55	6,000	259						
3,500	49	8,000	327						
1,000	115	10,000	399						
2,000	67	2,000	238						
2,800	49	4,000	350						
		6,000	486						
		8,000	329						
		10,000	775						

#### 5.4 임피던스 특성에 의한 보호협조기기 부동작 패턴 분석

상기의 내용을 바탕으로 R/C 1개소 계통에서 태양광전원 연계시 부동작 현상이 발생한 경우에 대하여, %Z의 변화분 특성을 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, Fig. 8과 같이 태양광전원이 집중연계되면 연계 전의 %Z가 1,384.2[Ω]이고, 연계 후에는 565.56[Ω]으로 약 41%로 감소되며, Fig. 9와 같이 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.

Table 5. %Z characteristics with and without PV system in case of 1EA R/C

connection types	connection of PV system	Z <sub>1</sub>		Z <sub>0</sub>		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, Fig. 10과 같이 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, Fig. 11 (a), (c)와 같이 태양광전원이 분산연계 되면 %Z가 604.4[Ω], 1,107[Ω]으로 약 44%로 감소된다. 또한, Fig. 11 (b)와 같이 다른 구간에서 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.

Table 6. %Z characteristics with and without PV system in case of 2EA R/Cs

connection types	connection sections	connection of PV system	Z <sub>1</sub>		Z <sub>0</sub>		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%

## 6. 결론

본 논문에서는 다수의 태양광전원이 배전계통에 연계되어 운용되는 경우, 보호협조기기의 부동작 메커니즘과 부동작 패턴탐색 알고리즘을 제안하였다. 이를 바탕으로 Off-DAS의 모델링에 의하여 부동작 특성을 분석하면 다음과 같다.

- (1) R/C 1개소가 설치된 배전계통에서 R/C와 고객계전기 사이에 1선 지락사고가 발생한 경우, 집중연계방식인 경우 9,600[kW] 이상이 연계되면 부동작 현상이 발생하고, 분산연계방식인 경우 합계 6,900[kW] 이상이 연계되면, 보호기기가 부동작하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작현상의 발생가능성이 높음을 확인할 수 있었다.
- (2) R/C 2개소가 설치된 배전계통에 태양광전원이 집중연계된 경우, 변전소계전기와 후비 R/C 사이에 1선 지락사고 시, 8,900[kW] 이상이 연계되면 부동작 현상이 발생하고, 전위 R/C와 고객계전기 사이에 1선 지락사고 시, 3,500[kW]이상이 연계되면 부동작현상이 발생함을 알 수 있었다.
- (3) R/C 2개소가 설치된 배전계통에 태양광전원이 분

산연계된 경우, 변전소계전기와 후비 R/C 사이에 1선 지락사고 시, 합계 5,800[kW] 이상이 연계되면 부동작 현상이 발생하고, 전위 R/C와 고객계전기 사이에 1선 지락사고 시, 3,500[kW]이상이 연계되면 부동작 현상이 발생함을 알 수 있었다. 따라서, R/C 1개소 계통과 동일하게 분산연계방식이 집중연계방식에 비하여 보호기기 부동작현상의 발생가능성이 높음을 알 수 있었다.

## References

- [1] Soon-hwan Kwon, Hu-dong Lee, Yang-hyun Nam, Dae-seok Rho, "Optimal Operation Algorithm of Protection Devices in Distribution Systems With PV System", The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 5, pp. 17~26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.5.17>
- [2] Byeong-Gi Kim, Jae-Beom Park, Kyeong-Sang You, Dae-Seok Rho, "Optimal Operation Methods of Protection Devices in Distribution Systems with PV Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 8, pp. 1485~1491, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2011.60.8.1485>
- [3] Hu-Dong Lee, Soon-Hwan Kwon, Sung-Sik Choi, Marito Ferreira, Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho, "Optimal Operation Method of Protection Devices in Primary Feeder with Large Scale PV System", International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 129, No. , pp. 127~138, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.33832/ijast.2019.129.11>
- [4] Guideline for Interconnection of Distributed Generation System in Distribution Systems, KEPCO, June, 2012.
- [5] 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/LESCPE.2001.941636>
- [6] Dae-seok Rho, "Countermeasures on bi-directional Protective Device Coordination of smart grid connected to new energy generation". The world of electric, vol 5, No. 9 pp. 39-43, 2010.
- [7] IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", J. IEEE June, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2005.96289>
- [8] Chan-Hyeok Kim, Hyeon-Seok Park, Dae-Seok Rho, Chang-Hoon Shin, Gigab Yoon, "A Study on the

Optimal Method for Mal-function of Re-closer at the Distribution Feeders Interconnected with PV Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 8, pp. 1512~1518, 2009.

- [9] Dong-Yeol Shin, Dong-Hyun Yun, Han-Ju Cha, "The Development of an Algorithm for the Correction of Errors in the Phase Current of the Protective Relay on Distribution System Interconnected with Distributed Generation", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 11, pp. 1604~1609, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.11.1604>

**권 순 환(Soon-Hwan Kwon) [정회원]**



- 2008년 2월 : 한국폴리텍1대학 전기과 (전문학사)
- 2011년 7월 : 국가평생교육진흥원 전기공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 공학대학원 전기공학과 (공학석사)

- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공(박사 수료)

〈관심분야〉  
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 2차전지

**태 동 현(Dong-Hyun Tae) [정회원]**



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉  
배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

**이 후 동(Hu-Dong Lee) [정회원]**



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉  
전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

**노 대 석(Dae-Seok Rho) [종신회원]**



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월: 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

〈관심분야〉  
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석