ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 12, pp. 1595~1601, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1595

# 마이크로그리드의 비상상황시 자율 대처 운전 방안에 관한 실증적 연구

## An Empirical Study on Autonomous Operation in Emergency Situation of Microgrids

홍 지 송* · 김 현 우* · 안 선 주* · 최 준 호* · 윤 상 윤†
(Ji-Song Hong · Hyun-Woo Kim · Seon-Ju Ahn · Joon-Ho Choi · Sang-Yun Yun)

**Abstract** - The biggest obstacle to the commercialization of small and medium size microgrid (MG) is the reliability and economics of MG operation and maintenance. In this paper, we propose an autonomous operation method that is implemented as an application program installed in the MG operating system in emergency situations. The proposed algorithm consists of four steps of distinction, recognition, determination and control of emergency situations that can occur in MG. A fuzzy-based situation decision algorithm has been proposed to eliminate the barriers of autonomous operation in actual emergency situation such as occurrence of bad data and communication delay. In addition, countermeasures have been suggested for cases where multiple emergency situations have occurred in combination. The proposed algorithm was tested in a 500kW actual microgrid site of a university. Through the test, the validity of the proposed method and its applicability to practical MG operation are verified.

**Key Words** : Microgrids, emergency situation, Autonomous operation, Fuzzy logic, Emergency controller, EMS

## 1. 서 론

최근 신재생에너지의 보급 증대 정책과 배전계통 운영의 신뢰도 및 경제성 증대 등의 요구는 마이크로그리드(microgrid, MG) 보급을 가속화 시키고 있다. 일반적으로 MG는 크게 두가지 목적으로 구축된다. 첫째, MG 내부 전력사용량 및 피크전력의 감소를 통해 직접적인 경제적 이익을 얻기 위한 것으로 주로 에너지 저장장치(energy storage system, ESS) 등의 제어 전원 최적 스케쥴 수립과 수요반응(demand response, DR) 자원을 이용한 시장 참여를 통해 이러한 목적을 달성한다. 둘째, MG 외부에서의 외란 발생시 독립적인 운영을 통해 전력공급의 지속성(resiliency)을 증가시키기 위한 것이다. 그러나 중소규모 MG의 경우 구축비용, 운영 및 유지보수 등을 고려한 다양한 비즈니스 모델의 확보가 필요하다[1]. 특히 일반적인 계통운영과 같이 상시 근무 운영원을 두는 경우 운영비용의 과다로 인해 그 경제성이 크게 떨어지게 되는 문제점이 있다.

마이크로그리드의 비상상황의 대응방안에 대한 선행연구로는 첫째, 마이크로그리드의 외란 검출 및 계전기 정정방식에 관한 연구가 있다[2-4]. Brearley 등은 기존 배전계통의 보호협조 알고리즘을 MG에 적용하기 힘든 이유와 해결방안을 제안하였다. Lin 등은 MG외부에서 발생하는 외란 검출 방안을 제안하였다. El-khattam 등은 선형 최적화 방식을 이용한 분산전원 연계시 배전계통의 계전기 최적 정정방식을 제안하였다. 둘째, 중앙집중식 제어에 의한 적응형 보호방식을 다루는 연구가 있다 [5-10]. Zamani 등은 master 제어기와 slave 제어기간의 통신을 이용한 마이크로그리드의 고장 처리방안 및 강제 독립운전을 이용한 복구방안에 대해 다루고 있다. Ustun 등은 마이크로그리드 중앙제어기와 보호기기 및 DG와의 통신을 이용한 계전기 고장전류의 간략계산 및 적응형 보호기기 설정 방식에 대해 다루었다. Kato 등은 외란 발생 시 부하/발전량 제어를 통한 독립운전 전략을 제안하였다. Oliverira 등은 마이크로그리드 독립운전 시 과거 이력 데이터를 이용하여 독립운전 가능시간 결정 및 부하제어 스케쥴을 수립하였다. Kyriakarakos 등은 독립형 MG의 상시 운영시의 발전원 기동정지 스케쥴 수립을 위해 계층적 퍼지로직 기반의 운영시스템(energy management system, EMS)을 제안하였다. 또한 Swathika 등은 마이크로그리드 토폴로지 변화에 따른 적응형 보호협조 수행방식 및 퍼지로직을 이용한 고장 식별방안을 제시하였다. 셋째, 분산형 제어에 의한 보호방식을 다루는 연구가 있다[11,12]. Liu 등은 Agent 방식을 이용한 배전계통의 적응형 계전기 정정방식에 대해 제안하였다. 또한 Coffele 등은 Multiagent 기반 배전계통의 적응형 보호방식을 제안하였으며 HILS 환경에서 효용성 검증을 수행하였다.

위의 선행연구들은 주로 고장발생시의 인지방법과 고장제거를 위한 보호기기의 설정 방법 및 통신을 이용한 보호기기간의 협조운전등을 제시하고 있다. 그러나, 앞서 언급한바와 같이 MG의 운영상의 경제성을 확보하기 위한 자율 운영을 위해서는 두가지

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea.
E-mail: drk9034@jnu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea.
Received : September 21, 2018; Accepted : November 15, 2018

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고려가 필요하다. 첫째, 경험많은 운영원과 같이 비상상황 판단을 저해하는 오류데이터와 통신 트래픽에 의해 불규칙적으로 데이터가 발생했을 때 정확한 인지 및 대처를 할 수 있는 알고리즘이 반드시 필요하다. 둘째, 실제 현장에서 발생하는 비상상황은 1건씩 독립적이지 않을 수 있으며 복합적인 경우가 많다. 따라서 이와 같은 복합적 상황의 인지 및 대처 기술 개발이 필요하다.

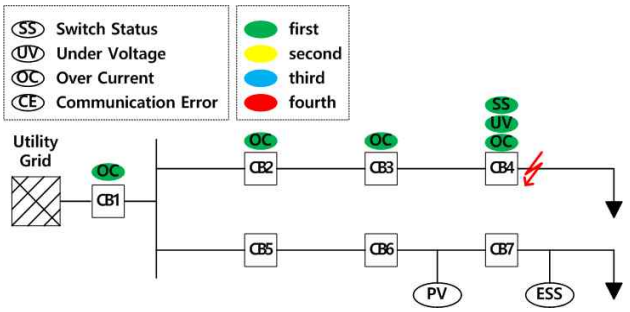
본 논문에서는 MG의 비상상황에 대한 자율적 대처 운영방안을 제안하였으며 이를 MG 운영시스템에 탑재할 수 있는 응용프로그램 형태로 개발하였다. 제안한 알고리즘은 비주기성을 가진 알람데이터를 사용하였으며 크게 두 가지 특성을 가지고 있다. 첫째, 실제 운영과 같이 비순차적으로 발생되는 알람데이터를 통해 비상상황을 인지하고 기기제어 및 유지보수원 메시지 출력과 같은 자율적 대처를 수행한다. 둘째, 비상상황과 연관성이 없는 오류데이터가 발생하였을 경우 퍼지로직을 적용하여 실제 운영원과 유사한 판단을 통해 오류데이터 처리를 수행한다. 또한, MG에서 발생하는 복합적 비상상황을 대응하기 위해 부하복구 중심의 룰을 적용하여 비상상황에 대한 우선순위를 부여하였다. 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 대학교 구내에 구축된 캠퍼스 MG사이트 중 500kW 규모의 사무형 MG에 실증시험을 수행하여 알고리즘의 실제 적용성 여부를 검증하였다.

## 2. 제안한 MG 비상상황의 자율운전 알고리즘

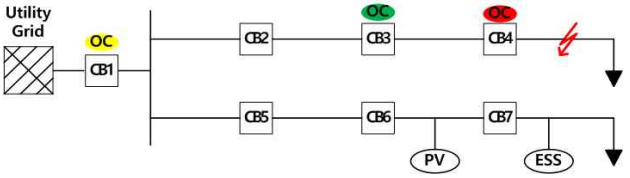
### 2.1 비상상황시 MG의 자율운전 필요성 및 문제점

기존 배전계통 및 대규모 마이크로그리드는 비상상황이 발생할 경우 운영센터에 상주하는 운영원이 계통에서 발생하는 과전류, 저전압 등과 같은 알람데이터와 계측데이터를 기반으로 비상상황에 대한 인지, 판단 및 조치를 수행한다. 알람데이터는 주기성을 가지는 일반적인 계측데이터와 달리 비주기적이며 비순차적으로 발생하게 된다. 본 논문에서 비상상황을 판단하기 위해 가정한 알람데이터는 개폐기기의 투입/개방 상태 변화, 저전압, 과전류, 통신장애이며 개폐기기의 현재 상태 계측치를 함께 사용한다.

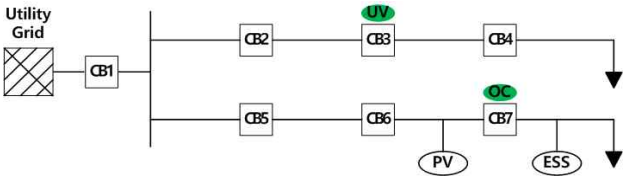
실제 운전상황에서의 알람 기반의 비상상황 판단 문제를 그림 1을 통해 설명한다. 본 논문에서는 보호기기는 방향성 판별기능을 가지고 있다고 가정하였다. 그림 1(a)는 비상상황을 판단할 수 있는 모든 알람데이터가 동시에 정상적으로 발생된 경우를 나타내며, 이러한 경우 CB4 하단에 고장이 일어난 것을 즉시 인지할 수 있다. 그림 1(b)는 그림 1(a)의 상황에서 알람데이터가 불규칙적으로 발생하며 일부데이터가 누락된 상황을 나타내고 있다. 운전원이 있는 경우 알람데이터가 추가적으로 발생하는지 여부를 기다리면서 확인하며, 일정시간동안 데이터가 추가 발생하지 않을 경우 발생된 알람데이터를 기반으로 비상상황을 판단하게 된다. 그림 1(c)는 비상상황과 연관성이 없는 엉뚱한 알람데이터가 발생한 상황을 나타내고 있다. 운전원이 있는 경우라면 추가 알람데이터 발생 여부를 일정 시간동안 확인하고 만일 추가 알람데이터가 발생하지 않거나 발생된 데이터가 나머지 데이터들과의 연관성이 없는 경우 오류데이터로 처리하게 된다. 마지막으로, 그림 1(d)와 같이 비상상황이 복합적으로 일어나게 될 경우 비상상황에 대한 정확한 인지가 어렵고, 사고 구간에 대한 중요도를 판단하여 우선순위에 따라 고장처리를 수행하게 된다. 이와 같은 예에서 볼 수 있는 것처럼 운전원 없이 MG의 비상상황에 대한 자율 운전을 실현하기 위해서는 알람데이터의 누락, 오류 데이터의 발생 및 다중 이벤트의 발생 등과 같은 현실적인 문제들을 고려한 알고리즘의 개발이 필요함을 알 수 있다.



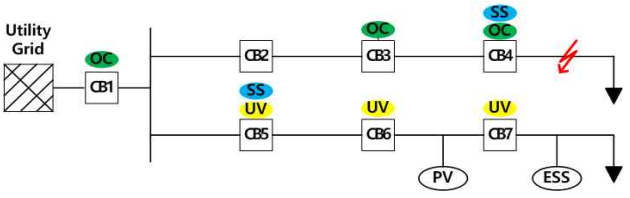

(a) 정상적 데이터 발생




(b) 데이터 누락 및 불규칙적 데이터 발생




(c) 오류데이터의 발생




(d) 다중 비상상황의 발생

**그림 1** 알람 데이터를 이용한 비상상황 판단의 고려사항

**Fig. 1** Considerations for emergency situation using alarm data

### 2.2 자율운전 알고리즘의 운영 전략

유인운전의 경우 앞서 설명한 바와 같이, 비순차적으로 발생되는 알람데이터의 종류 및 발생위치 등을 이용하여 비상상황에 대한 판단을 수행한다. 또한, 공급되는 데이터의 변화에 따라 임시

적 판단에서 확정적 판정으로 진행되는 일련의 과정을 수행할 것이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 MG 비상제어(emergency controller, EMC) 알고리즘도 운영원이 수행하는 과정과 유사한 비상상황의 가 판정 및 확정단계를 수행하도록 제안되었다.

본 논문에서는 MG 내 선로 및 설비고장에 따른 내부고장, 보호기기의 오동작, 외부고장(fault)에 따른 MG 이용불가 상태, 계측정보 전송장치(remote terminal unit, RTU)오류에 따른 통신장애를 비상상황으로 정의하였다. 제안한 EMC 알고리즘은 크게 4개의 모듈로 구성되어 있으며, 그림 2에는 EMC의 전체적인 흐름도를 도시하였다. 첫째, 비상상황 식별 모듈은 계통에서 발생한 알람데이터를 수집하고 비상상황을 식별할 수 있는 형태로 데이터를 구성한다. 구성된 데이터 셋을 통해 비상상황 종류와 위치에 대한 가(provisional) 판정을 수행한다. 둘째, 퍼지 모듈에서는 가 판정된 비상상황에 대한 확신도(certainty factor, CF)를 산출하여 최종 확정 또는 비상상황 식별 모듈의 재수행 여부를 결정한다. 또한, 산출된 확신도를 통해 비상상황과의 연관성을 판단하여 오류데이터 검출을 수행한다. 셋째, 다중비상상황 처리 모듈에서는 비상상황이 복합적으로 발생하였을 경우 설정된 룰에 의해 비상상황에 대한 우선순위를 부여한다. 마지막으로 자율 처리 모듈에서는 판정된 비상상황에 대한 유지 보수원 메시지 출력 및 기기 제어와 같은 실질적인 대처를 수행한다.

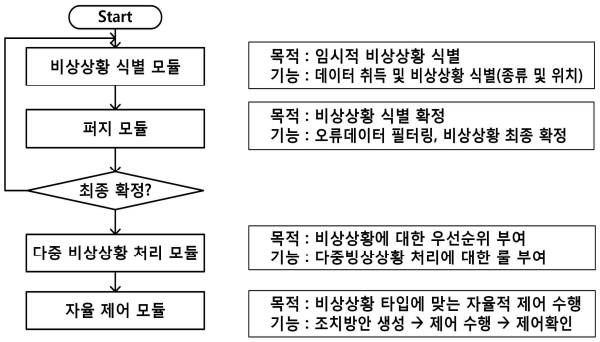



**그림 2** EMC의 전체적인 운영 전략
**Fig. 2** Operation strategy of the EMC

### 2.3 자율운전 알고리즘의 모듈별 세부 전략

#### 2.3.1 비상상황 식별 모듈

본 논문에서는 연계형 마이크로그리드의 시작점 보호기기부터 부하 또는 설비의 말단지점까지를 하나의 경로(path)로 설정하고 각 경로 및 경로간 알람 발생 상황을 고려하여 비상상황의 인지 및 식별을 수행한다.

비상상황 식별 모듈은 단일 또는 복합적 비상상황 발생시 계통에서 발생하는 비순차적 알람데이터를 수집하고 비상상황에 대한 종류와 위치를 가식별하는 단계이다. 예를 들어, 어떤 경로에서 과전류 알람, 저전압 알람 및 보호기기 동작상태 알람 등이 동시에 수집된 경우 비상상황의 식별여부를 판단하는 식별자(ESCM_flag)가 1로 처리되며 이는 가식별이 되었음을 나타낸다. 만일 위의 동일한 예에서 어떤 시간대에 수집된 알람데이터가 가식별을 하기에 부족한 상태라면 식별자는 0으로 처리될 것이다. 이는 가식별이 완료되지 않았음을 의미한다. 이렇게 처리된 식별정보는 다음 항에 설명될 퍼지 모듈에서 가속요소 결정을 위해 사용된다.

#### 2.3.2 퍼지 모듈

앞서 설명한 바와 같이 가 판단된 비상상황 식별 모듈의 결과를 운영원과 유사한 판단을 내리기위해, 시간이 지남에 따라 추가로 발생하는 알람 데이터 처리와 오류데이터 필터링 등을 수행할 수 있는 방안이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위해 퍼지 기반의 판정 알고리즘을 사용하였다.

제안한 퍼지 모듈은 앞서 2.1절에서 설명한바와 같이 계통에서 발생하는 알람데이터를 기반으로 비상상황의 개연성을 판단하고 최종확정 및 오류데이터를 검출한다. 앞서 설명한 바와 같이 본 논문에서 정의한 MG의 비상상황은 내부고장, 외부고장, 내부 기기오동작, 통신장애이다. 이 중에 통신장애는 기기에서 발생한 알람을 그대로 사용하여 판정하므로 퍼지 로직에서는 고려하지 않는다. 나머지 3개의 비상상황은 공통적으로 저전압과 과전류 현상이 알람으로 발생하게 되므로 제안한 퍼지 모듈에서는 앞서 비상상황 식별 모듈에서 가판단된 정보와 구분된 경로에서 발생하는 저전압과 과전류 알람 갯수를 종합하여 최종 판정을 수행한다. 그림 3은 퍼지 모듈의 저전압과 과전류 알람에 대한 멤버쉽 함수를 나타내었다. 중소 규모 MG의 경우 각 경로 당 보호기기의 직렬 개수는 최대 4대로 가정하고 그 이상일 경우는 동일한 값을 가진다고 가정하였다. 또한, 해당 모듈에서 퍼지화를 통해 비상상황을 판단할 수 있는 규칙은 표 1과 같으며, 비상상황에 대한 확정, 재식별, 없음으로 구분하였다.

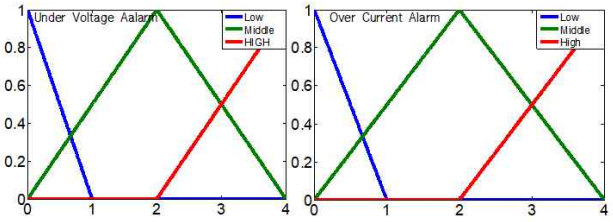



**그림 3** 퍼지모듈의 멤버쉽 함수
**Fig. 3** Membership function of Fuzzy module

**표 1** 제안한 퍼지모듈의 규칙
**Table 1** Rules of fuzzy module

| 과전류 \ 저전압 | 낮음 | 중간 | 높음 |
|---|---|---|---|
| 낮음 | 없음 | 재식별 | 확정 |
| 중간 | 재식별 | 재식별 | 재식별 |
| 높음 | 재식별 | 확정 | 확정 |

그림 4는 제안한 퍼지 모듈의 알고리즘을 나타내고 있다. 제안한 퍼지 모듈에서는 MG 내 모든 경로에 대한 확신도를 산출하여 비상상황에 대한 최종 판정 및 오류 데이터 검출을 수행한다. 확신도가 작은 경로는 알람데이터를 재 수집하여 비상상황 식별 모듈을 재 수행하며, 최종적으로 확신도가 설정 값 보다 작아지게 될 경우 해당 경로의 알람을 비상상황과의 연관성이 없는 오류데이터로 검출하게 된다. 확신도가 설정 값 보다 큰 경로의 경우 비상상황 식별 모듈에서 얻어진 가 판정 결과를 최종적으로 확정하게 된다. 하지만, 알람데이터가 초기 발생 후 추가적으로 발생하지 않을 경우 확신도가 일정 값에 고정되는 문제가 발생한다. 이러한 문제와 비상상황 식별 연산을 촉진시키기 위해 가식별 결과 여부에 따라 가속 요소(acceleraion factor, ACF)를 적용하여 해당 문제를 해결하였다. 제안한 퍼지 모듈의 확신도 계산은 식 (1)과 같다.

$$CF_{path} = \frac{\sum_{i=1}^{n} f(CF_i) \times CF_i}{\sum_{i=1}^{n} f(CF_i)} \times ACF_{path} \quad (1)$$

여기서, $CF_{path}$는 해당 경로의 확신도, $ACF_{path}$는 경로의 가속요소, x축은 CF의 범위, $CF_i$는 i번째CF 값, $f(CF_i)$는 i번째 CF의 소속도, n은 CF 범위를 분할한 갯수를 나타낸다. $ACF_{path}$의 결정은 식 (2)와 같다.

$$ACF_{path} = \begin{cases} ACF_{path} + 20\% & ESCM_flag_{path} = 1 \\ ACF_{path} + 20\% & ESCM_flag_{path} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, 초기치는 100%이며, $ESCM_flag_{path}$는 비상상황 식별 모듈에서 수행된 각 경로의 가식별 판단 여부이다.

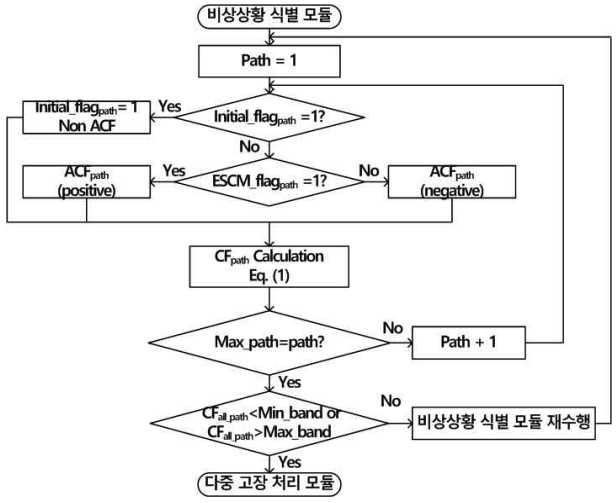



**그림 4** 퍼지 모듈의 흐름도
**Fig. 4** Flowchart of fuzzy module

### 2.3.3 다중비상상황 처리 모듈

다중 비상상황 처리 모듈은 자율 운전 알고리즘에서 비상상황이 복합적으로 일어날 경우 비상 상황의 중요도에 따라 우선순위를 부여하는 모듈이다. 제안한 다중비상상황 모듈에서는 부하 복구를 우선 시하는 룰(rule)을 설정하였다. 표 2는 본 논문에서 가정하는 비상상황에 대한 전체적인 룰을 나타내고 있다. 표2에서 ①→②는 ①가 ②의 우선순위를 나타내고 있다. MG 내(①내부고장, ②기기오동작) 비상상황이 발생하였을 경우 부하 중요도에 따라 우선순위를 부여한다. MG 내부와 외부(③외부고장)의 비상상황이 동시에 발생하였을 경우 MG내 모든 부하가 off 상태이므로 외부 비상상황에 우선순위를 부여한다. 통신장애(④)와 MG 내 비상상황이 발생한 경우는 MG내 비상상황에 우선순위를 부여하여 부하 복구를 우선적으로 수행한다. 외부 비상상황과 통신장애가 발생하였을 경우 통신장애 발생으로 인해 자율적 기기 제어를 수행할 수 없기 때문에 MG 내부통신장애를 우선적으로 처리한다.

**표 2** 다중비상상황을 위한 규칙
**Table 2** Processing rules for multiple emergency

| 종류 | ① | ② | ③ | ④ |
|---|---|---|---|---|
| ① | 부하 우선순위 | 부하 우선순위 | ③→① | ①→④ |
| ② | 부하 우선순위 | 부하 우선순위 | ③→② | ②→④ |
| ③ | ③→① | ③→② | ③ | ④→③ |
| ④ | ①→④ | ②→④ | ④→③ | ④ |

### 2.3.4 자율 제어 모듈

자율 제어 모듈은 최종 확정된 비상상황의 종류에 따라 기기제어 및 유지보수원 메시지 출력과 같은 실질적 대응을 수행한다. 자율제어 모듈의 수행은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째, MG 내(내부 고장, 기기오동작, 통신장애) 발생 비상상황에 대해서는 앞서 최종 확정된 비상상황 정보를 지정된 유지보수원에게 메시지로 출력한다. 둘째, 외부외란 발생시 MG의 운전 모드 전환(연계 운전 ↔ 독립운전), 독립운전 수행(부하제어)과 같은 실질적 기기제어를 수행을 통해 비상상황을 대응한다. 부하제어는 중요부하에 대한 독립운전 시간을 증대시키는 것을 목적으로 하며, 현재 부하에 대한 예상 독립운전 가능시간이 중요부하에 대한 최소 독립운전 시간 T보다 작을 경우 수행된다. 부하 제어를 결정하는 산식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{(\frac{SOC - SOC_{\min}}{100}) * Bat_{Capcity}}{Load} * 60 < T \quad (3)$$

여기서, $SOC$는 현재 ESS의 충전 상태를 나타내며, $SOC_{\min}$은 ESS의 최소 운영 SOC, $Bat_{capacity}$는 배터리의 정격 용량, T는 운영자에 의해 설정된 중요부하의 최소 독립운전 수행 시간을 나타낸다.

## 3. 사례연구

### 3.1 기능시험

본 논문에서 제안한 비상상황 식별 모듈과 퍼지모듈에 대한 타당성을 검증하기 위해 임의의 시험 계통에서 기능시험을 수행하였다. 그림 5는 기능시험 계통도를 나타내고 있다.

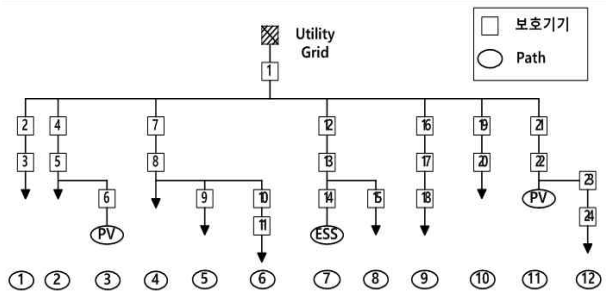



**그림 5** 기능시험 계통도
**Fig. 5** Network diagram for functional test

사례 1) 비순차적 알람발생 및 복합 비상상황 식별

사례 1은 시험계통에서 복합적 비상상황 발생과 알람데이터의 누락, 비순차적 발생시 정확한 비상상황 식별 기능에 대한 시험을 수행하였다. 사례1에서는 위 기능을 시험하기 위해 그림 5의 계통에서 보호기기 9번 하단의 내부고장 및 12번 보호기기의 오동작을 모의하였다. 표 3은 이 경우의 입력 알람데이터를 나타내었다.

**표 3** 사례 1의 입력 알람데이터
**Table 3** Input alarm data of case1

| 알람 타입 | 알람 발생 | | |
|---|---|---|---|
| | Iteration 1 | Iteration 2 | Iteration 3 |
| UV | 10, 11, 12, 13, 15 | 7 | 9 |
| OC | 1, 9 | 7 | |
| SS | 12 | | |

그림 6은 사례 1의 퍼지모듈 결과를 나타내고 있다. max, min_band는 운영자 설정에 의해 비상상황을 최종확정할 수 있는 범위를 나타낸다. 설정된 범위가 좁을 경우 퍼지 연산이 빨라지는 장점이 있지만 비순차적으로 발생하는 알람에 대한 대처가 어렵다. 따라서 본 논문에서 퍼지 모듈의 범위를 그림과 같이(max: 0.8, min:0.2) 설정하였다. y축(CF_path)은 해당 경로의 비상상황 확신도, x축(Iteration)은 퍼지 모듈의 반복횟수를 나타낸다. 퍼지 모듈 결과, 경로 5는 초기 알람데이터 발생시 비상상황을 식별하지 못하지만 퍼지모듈 수행 중 신규 알람데이터가 발생하여 보호기기 9하단의 내부고장을 가식별하고 반복횟수 6에서 최종확정하는 것을 확인할 수 있다. 경로 7은 초기 알람데이터를 통해 보호기기 12의 기기오동작을 가식별하고 반복횟수 3에서 최종확정하는 것을 확인할 수 있다. 경로 1, 4, 6 등은 비상상황과 개연성이 없는 데이터로 판단하여 해당데이터를 의미 없는 데이터로 처리하게 된다. 결과적으로, 복합 비상상황 인지 및 비순차적 알람데이터 발생에 대한 문제를 해결하는 것을 확인하였다.

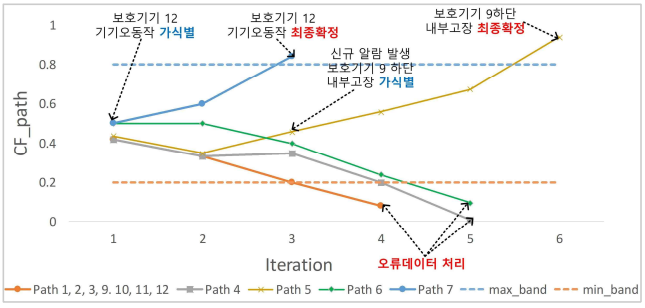



**그림 6** 사례 1의 퍼지 모듈 결과
**Fig. 6** Results of fuzzy module in case1

사례 2) 오류데이터 필터링

사례 2는 비상상황 식별과정 중 판단 중간에 발생하는 오류데이터에 대한 처리 기능을 시험하였다. 사례 2에서 해당 기능을 검증하기 위해 보호기기 6, 13 하단 내부고장 및 오류데이터 발생 상황을 모의하였다. 표 4는 이 경우의 입력 알람데이터를 나타내었으며 그림 7은 사례 2의 퍼지모듈 수행 결과를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 경로 2, 12등은 초기 알람 발생시 가식별된 정보가 없으며, 퍼지모듈이 진행됨에 따라 최종적으로 오류데이터로 처리된다. 또한, 경로 1은 퍼지 모듈 수행 중 발생한 알람데이터로 경로 2와 동일하게 가식별된 정보가 없으며 오류데이터로 처리되었다. 경로 3과 7은 사례 1과 같이 6, 13의 하단의 내부고장을 식별하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 비상상황 식별 과정 중 발생하는 비상상황과 연관성이 없는 데이터는 최종적으로 오류데이터 처리가 되는 것을 확인하였다.

**표 4** 사례 2의 입력 알람데이터
**Table 4** Input alarm data of case2

| 알람 타입 | 알람 발생 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Iteration 1 | Iteration 2 | Iteration 3 | Iteration 4 |
| UV | 13, 14, 15, 23 | | 6 | |
| OC | 5, 12 | 4, 13 | 6 | 3 |
| SS | | 13 | | |

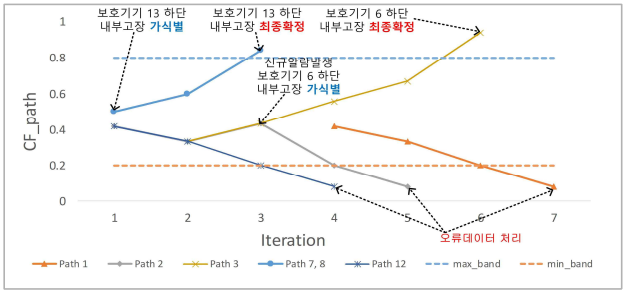



**그림 7** 사례 2의 퍼지 모듈 결과
**Fig. 7** Results of fuzzy module in case2

### 3.2 실증시험

제안한 EMC의 실제 적용성 여부를 판단하기 위해 MG EMS에 응용프로그램 형태로 탑재하여 실계통 적용 시험을 수행하였다. 실증 계통은 대학 구내에 구축된 사무형 마이크로그리드를 대상으로 수행하였다. 사무형 마이크로그리드의 연중 일 최대부하는 약 250kW이며, 전체적인 계통도는 그림 8과 같다. MG 내 구축된 설비는 PV(50kW), 에너지저장장치(500kWh), 제어 가능한 모의부하(100kW)가 설치되어있으며, 사무실과 생활관에서 사용하는 실부하로 구성되었다.

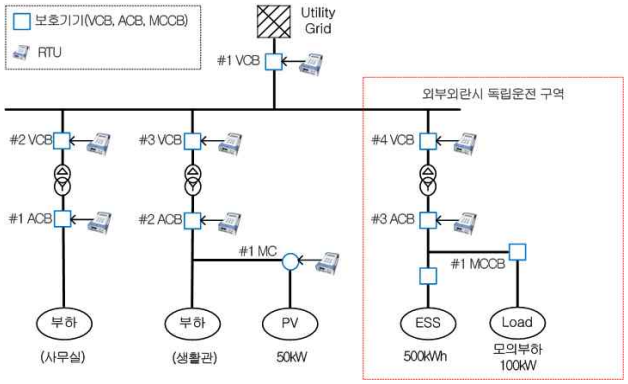



**그림 8** 실증 시험 계통도
**Fig. 8** Network diagram for field test

1) 비상상황 식별 및 메시지 출력을 통한 자율 대응

실증시험 1에서는 앞서 수행했던 기능시험에 대한 식별 정보를 유지보수원에게 메시지로 출력하는 대처 기능에 대한 시험을 수행하였다. 해당 기능을 수행하기 위해 #1 MCCB(LV7)하단의 내부고장, #2ACB(RTU5)의 통신장애 및 오류데이터 발생을 모의하였다. 그림 9는 실증시험 1의 최종 결과를 나타내고 있다. 비상상황 발생시 제안한 EMC를 통해 실제 운영화면상에 식별된 정보를 표기하며 최종적으로 유지보수원에게 #1 MCCB 하단의 내부고장과 #2ACB(RTU5)의 통신장애에 대한 메시지를 출력하는 것을 확인할 수 있다.

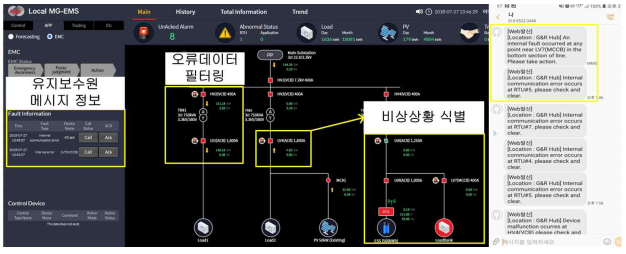



**그림 9** MG 내부 비상상황 발생에 대한 자율운영 결과
**Fig. 9** Operation results for inside emergency

2) 비상상황 식별 및 기기제어를 통한 자율 대응

실증시험 2에서는 MG의 외부고장 발생시 기기제어를 통한 자율적 대응 기능에 대한 시험을 수행을 하였으며, 그림 9는 자율운영 결과를 나타낸다. 제안한 EMC에 의해 외부외란 감지(17:19) 후 독립운전지점의 보호기기 및 발전원 기동과 같은 제어를 통해 독립운전을 수행한다. 또한, 독립운전 수행 중 식 (3)을 통해 부하제어를 수행함에 따라 1단계 부하 제어시 초기 부하대비 약 111%의 전원공급시간 증대, 2단계 부하 제어시 약 171%의 중요부하에 대한 전원공급시간이 증대되는 것을 확인할 수 있다. 해당 시험에서는 T는 120분, 최소 SoC는 0으로 설정하였다. 마지막으로, 외부 계통 복구를 감지(19:29) 후 독립운전 지점의 보호기기, 부하 복원과 같은 계통 재연계를 자율적으로 수행하는 것을 확인할 수 있다.

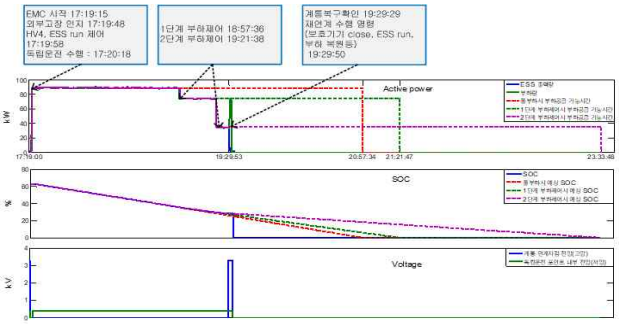



**그림 10** 외부고장에 대한 자율운영 결과
**Fig. 10** Autonomous operation results for external fault

## 4. 결 론

본 논문에서는 중소규모 MG의 비상상황에 대한 자율제어 알고리즘 및 그 실증내용에 대해 다루었다. 본 논문에서 제안한 자율 대응 방안은 실제 계통의 운영자와 유사하게 계통에서 발생하는 알람데이터를 기반으로 비상상황을 인지, 판정, 제어 과정을 수행하도록 고안되었다. 또한, 오류데이터 처리, 비상상황 확정과 같은 자율운전의 취약점을 퍼지로직을 통해 해결하고자 하였으며, 복합적 비상상황 발생시 우선순위를 부여하여 복합 비상상황을 대응한다. 본 논문에서 제안한 자율 대응 방안은 대학 구내에 구축되어 있는 사무형 MG에 EMS의 응용프로그램형태로 적용하여 실제 비상상황에 대응방안과 실제 적용성 여부를 검증하였다. 검증 결과, 비상상황 식별, 기기제어 및 유지보수원 메시지 출력과 같은 기능을 적합하게 수행함을 확인하였다. 본 논문의 연구결과는 향후 중소규모 MG의 운영 시스템에 적용될 수 있을 것으로 생각되며, 운영 및 유지보수 비용 절감 및 계통 운영의 신뢰도 증진 등을 통해 MG의 확대보급에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R18XA04)

## References


[1] Microgrid multi-client study, Navigant, Nov. 2015.

[2] B. J. Brearley and R. R. Prabu, "A review on issues and approaches for microgrid protection", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 988-997, Jan. 2017.

[3] C. Li, C. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, and B. Fang, "A review of islanding detection methods for microgrid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 211-220, Jul. 2014.

[4] W. El-khattam and T.S. Sidhu, "Resolving the impact of distributed renewable generation on directional overcurrent relay coordination: a case study", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 415-425, Dec. 2009.

[5] M. A. Zamani, A. Yazdani, and T. S. Sidhu, "A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2088-2099, Dec. 2012.

[6] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Fault current coefficient and time delay assignment for microgrid protection system with central protection unit", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 598-606, May 2013.

[7] T. Kato et al., "Priority-based hierarchical operational management for multiagent-based microgrids," *Energies*, vol. 7, no. 4, pp. 2051-2078, Mar. 2014.

[8] D. Q. Oliverira et al., "A fuzzy-based approach for microgrids islanded operation", *Electric Power Systems Research*, pp. 178-189, vol. 149, Aug. 2017.

[9] G. Kyriakarakos et al., "A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids", *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 315-327, May 2012.

[10] O. V. G. Swathika et al., "Fuzzy decision and graph algorithms aided adaptive protection of microgrid", *Energy Procedia: 1st International Conference on Power Engineering, india (chennai)*, vol. 117, pp. 1078-1084, Jun. 2017.

[11] Z. Liu et al., "A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 536-545, Feb. 2017.

[12] F. Coffele, C. Booth, and A. Dyśko, "An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 561-568, Apr. 2015.


## 저 자 소 개

**홍 지 송 (Hong Ji-Song)**

2015년 조선대학교 전자공학과 졸업.
2018년 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2018년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
E-mail : lklklkqaz@naver.com

**김 현 우 (Kim hyun-Woo)**

2017년 전남대학교 전기공학과 졸업.
2018년 현재 전남대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
E-mail : qnftkwh0615@naver.com

**안 선 주 (Ahn Seon-Ju)**

2002년 서울대학교 전기공학과 졸업.
2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 부교수.
E-mail : sjahn@jnu.ac.kr

**최 준 호 (Choi Joon-Ho)**

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
현재 전남대학교 전기공학과 교수.
E-mail : joono@chonnam.ac.kr

**윤 상 윤(Yun Sang-Yun)**

2002년 숭실대학교 대학원 졸업(박사).
2009년 LS산전 전력연구소 책임연구원.
2016년 한전 전력연구원 책임연구원.
현재 전남대학교 전기공학과 부교수.
E-mail : drk9034@jnu.ac.kr