

멀티 에이전트 개념에 기반한 배전계통의 분산 자율적 고장구간 분리 기법

論 文

55A-6-2

Autonomous Separation Methodology of Faulted Section based on Multi-Agent Concepts in Distribution System

高 銳 錫[†] · 洪 大 昇^{*} · 宋 完 錫^{**} · 朴 學 烈^{***}

(Yun-Seok Ko · Dae-Seung Hong · Wan-Seok Song · Hak-Ryeol Park)

Abstract - In this paper, autonomous separation methodology of faulted section based on network is proposed newly, which can minimize the outage effect as compared with the existing center-based faulted section separation method by determining and separating autonomously the faulted section by the free operation information exchange among IEDs on the feeder of distribution system. The all IEDs is designed in network in which client/server function is possible in order to separate autonomously the faulted section using PtP(Peer to Peer) communication. Also, Inference based solution of IED for the autonomous faulted section separation is designed by rules obtained from the analyzing results of distribution system topology. Here, the switch IEDs transmit on network the fault information utilizing on multi-casting communication method, at the same time, determine selfly whether they operates or not by inferencing autonomously the faulted section using the inference-based solution after receiving the transmitted information. Finally, in order to verify the effectiveness and application possibility of the proposed methodology, the diversity fault cases are simulated for the typical distribution system.

Key Words : MA(Multi-Agent), IED(Intelligent Electric Device), Distribution System, Autonomous Separation

1. 서 론

배전계통은 일반 수용가들에게 전력을 공급하기 위해서 면적으로 넓게 분포되어 도심지, 수목지, 염해지 등을 경유하기 때문에 자동차 추돌, 수목접촉, 설비오손 등의 사고로 잦은 정전을 경험하게 된다. 그리고 이러한 정전사고들은 인명피해는 물론 최근 급속히 확산, 보급된 디지털 정밀 제어기기들에 영향을 미쳐 심각한 경제적 피해 및 불편을 초래하고 있다.

전력사업자들은 이러한 사고로 인한 과급효과를 최소화하기 위해 배전계통을 다분할 다연계 구조로 설계, 운영하고 있으며, 동시에 배전자동화 시스템을 도입하여 선로상의 개폐기 등을 원격에서 감시, 제어함으로써 전력공급 신뢰도를 크게 개선하고 있다[1-3]. 초기 배전 자동화 시스템은 선로 CB(Circuit Breaker)나 리클로우저 상태를 감시하여 고장이 감지되면 중앙제어장치내의 FEP(Front End Processor)로 하여금 폴링방식을 기반으로 순차적으로 선로상의 FRU(Feeder Remote Unit)를 통해 고장 표시기 정보를 수집하여 고장구간을 확인하는 방법론을 채택하였다[4,5]. 그러나 고장전류가

CB나 리클로우저의 동작전류보다 작은 HIF(High Impedance Fault)에 대해서는 고장을 감지할 수 없어 수용가로부터의 정전신고에 의존하게 되는 단점을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 기존의 폴링방식의 단점을 보완하고 HIF에 대한 고장확인 능력을 개선하기 위해 DNP3.0 통신 프로토콜을 채택, 개폐기 FRU로 하여금 무전압 정보를 피더 FEP에게 전송하게 하여 신속하고 정확하게 고장을 확인할 수 있는 방법론이 제안되었으며, 배전자동화시스템의 HIF에 대한 고장감지능력을 크게 개선시켰다. 그러나 고장전류가 동작전류보다 큰 일반적인 계통고장의 경우에 대해서 CB나 리클로우저가 영구 고장으로 동작한 후, 중앙에서 고장구간을 확인, 고장구간을 분리한 후 CB나 리클로우저를 재투입하기 때문에 정전 피해 지역과 정전시간이 증가하게 된다. 또한, 무전압 정보만으로는 선로말단구간에 대한 HIF를 확인할 수 없다. 이러한 문제를 해소하기 위해서 임의의 사고로 CB나 리클로우저가 영구 고장으로 발전하기 전에 고장지역을 분리하기 위한 방법론들이 연구되고 있으며, 특히 멀티 에이전트 개념과 네트워크 기반의 IED(Intelligent Electric Device)기술[6-8]을 적용, 설비간 자유로운 정보교환능력을 통한 공급신뢰도 개선 방법론들이 새롭게 연구되고 있다.

본 연구에서는 자동화된 배전계통에서 네트워크를 기반으로 선로상의 개폐기 IED들이 자유로운 운전정보 교환을 통해 고장구간을 자율적으로 판단, 분리함으로써 기존의 중앙제어 방식에 의한 고장구간 분리방식에 비해 정전피해를 최소화할 수 있는 네트워크 기반 자율적 고장구간 분리 방법론을 제안한다. 먼저, 배전계통상에서 발생할 수 있는 고장유형을 분석, 단계적 처리방안을 제시한다. 다음 자율적 고장구간 분

[†] 교신저자, 正會員 : 남서울大學 電子工學科 副教授 · 工博
E-mail : ysko@nsu.ac.kr

^{*} 正會員 : 남서울大學 電子工學科 兼任教授

^{**} 正會員 : 韓電KDN(주) 配電自動化 Team Manager

^{***} 正會員 : 韓電KDN(주) 營配IT그룹 先任研究員

接受日字 : 2006年 3月 3日

最終完了 : 2006年 4月 17日

리시시스템이 설계되는데, 각각의 개폐기 IED들은 PtP(Peer to Peer) 통신실현을 위해 네트워크 기반으로 설계되며, 클라이언트/서버 기능을 가진다. 셋째 배전계통 구조를 분석하여 각 IED들에 대한 추론기반 솔루션이 설계되는데, 기본적으로 각 개폐기 IED들은 멀티캐스팅 방식에 근거하여 고장정보를 네트워크상에 전송하며 동시에 필요정보를 수신, 사고구간을 추정하여 동작여부를 결정한다. 여기서 각 IED들은 선로구간의 연결성 즉 전, 후 구간을 인식하기 위해 MNIS(Multiple Neighbor IED SET) 정보를 포함한다. 끝으로 제안된 방법론의 유효성을 검증하기 위해 대표적인 배전계통에 대해서 네트워크 기반의 시뮬레이터를 구축, 다양한 경우의 고장사례를 모의한다.

2. 중앙제어기반 고장구간 분리기법

2.1 고장유형 분석

배전계통은 구조적, 환경적으로 다양한 고장에 노출되는데, 고장유형에 따라 선단단락, 3상단락, 1선지락, 2선 지락, 단선 등으로 구분할 수 있다. 특히 단선의 경우나 지락고장 중 기존의 상, 지락 과전류 보호 메카니즘에 의해서 감지될 수 없을 만큼 매우 큰 임피던스를 가지는 경우를 HIF라 정의한다. 표 1은 배전계통에 발생할 수 있는 다양한 고장유형과 고장전류를 보인다.

표 1 고장유형 분석
Table 1. Fault Type Analysis

| 동작 유형 | 고장 유형 | 지표 연 | 전류 (A) | 특징 | CB/Re./FI 동작여부 | |
|-------|-------|------|-------------|----------------------|---------------------|---|
| 정상 동작 | 단락 고장 | 선간 | - | 고장전류가 OCR동작전류보다 크다. | ○ | |
| | | 3상 | - | | | |
| | 지락 고장 | 1선 | - | 고장전류가 OCGR동작전류보다 크다. | ○ | |
| | | 2선 | - | | | |
| 미 동작 | HIF | 단선 | - | 고장전류가 흐르지 않는다. | × | |
| | | HIGF | 건조한 아스팔트 | 0 | 고장전류가 OCGR동작전류보다 작다 | × |
| | | | (비강화된) 콘크리트 | 0 | | |
| | | | 건조한 모래 | 0 | | |
| | | | 젖은 모래 | 15 | | |
| | | | 건조한 진흙 | 20 | | |
| | | | 건조한 잔디 | 25 | | |
| | | | 젖은 진흙 | 40 | | |
| | | | 젖은 잔디 | 50 | | |
| | | | (강화된) 콘크리트 | 70 | | |
| 오 동작 | 돌입전류 | - | | 스위칭전류가 OCR동작전류보다 크다. | ○ | |

표1에서 돌입전류는 고장전류가 아니라 작업이 완료된 후 부하를 투입하는 순간에 커패시터나 트랜스포머의 여자 특성에 의해서 순간적으로 흐르는 전류로써 계전기의 동작전류보다 큰 전류가 흐르기 때문에 차단기가 오동작하게 된다. 따라서 CB나 리클로우저를 투입할 때는 돌입전류 억제장치를 통해서 계전기의 동작전류를 증대시킨 후 투입에 성공할 수 있도록 한다. 그러나 다중고장인 경우 고장이 제거되지 않은 구간이 선로에 투입되어 CB가 트립될 수 있기 때문에 주의해야 한다. CB/Recloser/FI동작여부에서 ○는 고장전류가 계전기나 FI 동작전류보다 커서 고장을 정확하게 감지하여 CB나 리클로우저(Recloser)가 동작되는 경우를, 반면에 ×는 그 반대의 경우를 표시한다.

2.2 중앙제어기반 고장구간 분리 전략

배전계통에서는 표 1에 보인바와 같이 다양한 이벤트들이 발생할 수 있기 때문에 고장 파급효과를 최소화하기 위해 다분할 다연계의 수직상 구조로 운전된다. 그림 1은 배전계통의 한 선로에 대한 회선별 단선도 예를 보인다. 변전소내의 선로보호용 CB로부터 인출되며 선로상에는 선로구분을 위한 구분개폐기들이, 타선로와의 연계지점에는 부하용통을 위한 연계 개폐기들이 설치된다. 그림 1에서 S₁,...,S₅는 구분 개폐기, S₆, S₇, S₈은 연계 개폐기를 표시한다.

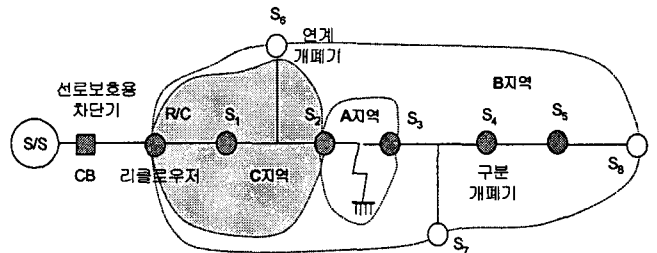


그림 1. 대표적인 배전선 회선별 단선도
Fig. 1 Single line diagram of a typical distribution line

2.2.1 고장전류정보기반 고장구간분리 기법

그림 1과 같이 임의의 한 구간(A지역)에서 1선 지락 영구 고장이 발생한 경우를 가정하자. 고장전류가 동작전류보다 크기 때문에 리클로우저(R/C)가 고장전류를 감지, 순시 지연 동작 후 영구 개방되며, 이때, 리클로우저 부하단의 모든 부하(B지역)은 정전을 경험하게 된다. 다음, R/C는 동작정보를 FEP를 통해 중앙제어장치에 전송한다. 이때 중앙제어장치는 폴링방식에 근거하여 순차적으로 동작 R/C를 포함하는 선로상의 개폐기들 S₁, S₂, S₃, S₄, S₅에 대한 FI정보를 수집하여 고장구간을 판단하게 된다. 그림 1의 경우 S₁, S₂의 FI가 고장전류를 경험함으로써 SET 상태로 설정되고 S₃, S₄, S₅의 FI가 고장전류를 경험하지 못함으로써 RESET 상태가 되므로 고장구간을 {S₂, S₃}로 판정한다. 따라서 중앙제어장치는 개폐기 S₂를 개방시켜 고장구간을 분리한 후, 리클로우저를 재투입하고 제안된 부하절체 전략에 따라 부하용통을 시도하게 된다. 이 방법에서는 리클로우저가 영구 개방된 후, 고장구간이 중앙제어장치에 의해 분리되어 리클로우저가 재투입되기 까지 리클로우저 후단의 전선 부하구간(C지역)이 정전

을 경험하게 됨으로써 전력공급 신뢰도를 저하시킨다. 또한 HIF의 경우 고장을 전혀 감지할 수 없는 단점을 가진다.

2.2.2 무전압정보 기반 고장구간분리 기법

그림 1과 같이 임의의 한 구간(A지역)에서 HIF 영구고장이 발생한 경우를 가정하자. 이 경우는 2.2.1의 경우와는 달리 고장전류가 동작전류보다 작기 때문에 리클로워저는 고장전류를 감지하지 못해 동작하지 않는다. 따라서 중앙제어장치는 고장을 확인할 수 없어 인적, 경제적 피해가 심각하게 확대될 수 있다. 이러한 경우에 무전압 정보는 매우 유용한 정보를 제공한다. 그림의 경우에서, S₁, S₂의 FI와는 달리 S₃, S₄, S₅의 FI들은 무전압을 감지하게 되는데 이 무전압 정보가 개폐기 단에서 실시간으로 FEP를 통해 중앙으로 전송되면 중앙 제어장치는 이들 정보로부터 구간 (S₂, S₃)에서 HIF가 발생했음을 즉시 추론할 수 있다. 이 방법에서는 중앙제어장치에 의해서 고장구간이 추론된 후, 고장구간 분리가 완전히 이루어질 때까지 CB나 리클로워저가 개방되지 않은 상태에서 고장이 지속되기 때문에 심각한 고장파급효과가 발생할 수 있어 가급적 고장구간을 신속하게 분리할 수 있는 방법이 요구된다.

이와같이 기존의 중앙제어기반 고장구간 분리기법은 CB나 리클로워저의 영구개방을 허용함으로써 건전 정전구간에 대한 정전시간을 지연시키거나 HIF의 경우 CB나 리클로워저가 투입된 상태에서 고장이 제거되지 않은 상태에서 고장지속시간을 연장시켜 사고파급효과가 심각하게 확대될 가능성이 있다. 따라서 가급적 고장구간을 신속하고 정확하게 분리하여 고장파급효과를 최소화할 수 있는 새로운 방법이 요구되고 있다. 이 문제는 네트워크 기반의 개폐기 IED들을 활용, 고장 정보를 실시간으로 공유하게 하는 분산, 자율적 고장구간 분리 기법에 의해서 개선될 수 있다.

3. 분산, 자율적 고장구간 분리 시스템 설계

분산, 자율적 고장구간분리 체계는 개폐기 FRU에 MA개념을 도입하여 설계될 수 있다. 각 IED는 네트워크 기반으로 PTP 통신이 가능하도록 설계된다. 따라서 IED는 계통상태는 물론 내부상태를 감시하여 운전상태를 스스로 판단할 수 있어야 함은 물론 감시제어 시스템으로부터의 제어명령에 적응적으로 대응하고 네트워크를 기반으로 IED간 자율적인 정보교환이 가능하도록 설계돼야 한다.

3.1 네트워크 기반 통신 시스템 설계

배전자동화시스템의 중앙제어장치 및 IED들은 설비간 통신이 자유로울 수 있도록 네트워크 구조로 설계된다. 이때 중앙제어장치의 네트워크는 신뢰도와 경제성에 근거하여 다양한 구조로 설계가 가능하나 여기서는 합리적인 링 이더넷 방식으로 설계하였다. 따라서 링 이더넷에는 FA노드, FEP, IED들이 접속된다. 그리고 각 선로별로 진출하는 이더넷 선은 스위칭 허브를 통하여 분기되는 구조로 설계하였다. 그림 2는 네트워크 기반의 분산, 자율적 고장분리 체계를 보이는 데, FEP_i와 IED_j는 각각 i번째 선로에 대한 FEP와 i번째 선로의 j번째 개폐기에 대한 IED를 표시한다. 각 FA노드, FEP 그리고 IED들은 고유의 IP주소를 가지며 라우터는 수신되는 IP 주소를 확인하여 내부 및 타 배전자동화 시스템으로의 정보전송을 제어한다.

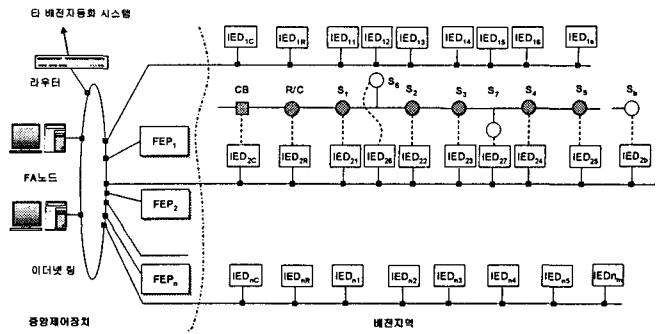


그림 2. 네트워크 기반 통신시스템 설계
Fig. 2 Network based communication system

3.2 개폐기 IED 설계

분산 자율적 고장구간 추론을 위한 개폐기 IED는 그림 3과 같이 설계된다. IED는 추론기반 클라이언트 모듈과 추론기반 서버모듈, MNIS 정보 DB, 송신 데이터 작성 및 수신 데이터 추출 모듈, 수신 메시지 분석 및 송신 메시지 작성 모듈로 구성된다. 또한 FI와 SWITCH 상태를 실시간으로 감지할 수 있도록 설계한다. FI STATUS는 a상, b상, c상, 영상에 대한 상별 고장전류 감지상태, a상, b상, c상의 상별 무전압 감지상태 그리고 a상, b상, c상 영상에 대한 상별 전압, 전류 고조파 분석 및 패턴인식기법에 근거한 고장감지상태 등을 포함하며, SWITCH STATUS는 개폐기 상태 및 가스압 정보를 표시한다.

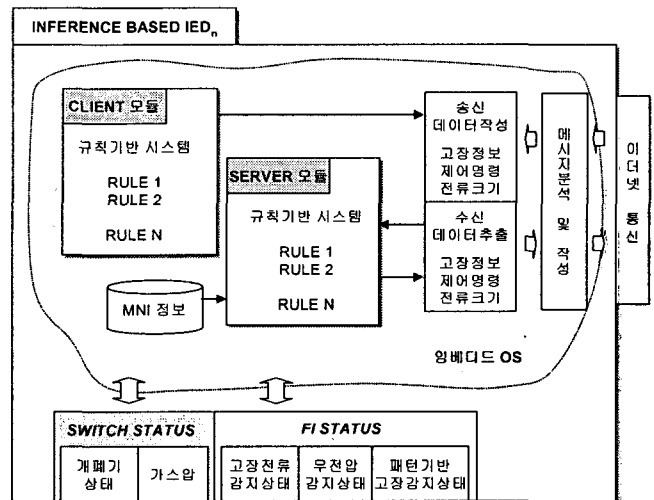


그림 3 추론기반 IED 솔루션 구조 설계
Fig. 3 Inference-based IED solution design

IED는 서버 모듈을 통해서 수신되는 메시지를 분석하여 고장정보와 제어명령을 순차적으로 실시간 DB에 저장한다. 또한 추론기관으로부터의 추론결과를 송신코드 작성 명령에 근거하여 메시지로 작성, 클라이언트 모듈을 통해 유니 캐스팅 또는 멀티 캐스팅 방식으로 전송한다. IED는 기본적으로 계통의 운전상태를 FI 표시상태에 근거하여 결정하게 된다. FI는 앞에서 언급된 바와 같이 고장전류 크기 및 전압의 크기를 기준으로 계통의 운전상태를 표시한다. 그림에서 패턴개

반 고장감지 상태는 고장감지 성능을 개선시킬 수 있으나 설계통에 대한 다양한 고장파형을 수집하는 것이 어렵기 때문에 본 연구에서는 고려되지 않는다. 만약 입력전류가 설정 값보다 큰 경우 상태를 고장전류 감지상태를 SET으로 설정하여 고장전류를 감지하였음을 나타내며, 입력전압이 설정 값보다 작은 경우 무전압 감지상태를 SET으로 하여 무전압을 감지하였음을 표시한다. 이때 IED의 추론기반 시스템은 이들 상태들로부터 내부상태를 진단하고 IED간 정보교환을 통해 계통상태를 판단, 자율적인 개방/투입 조작을 통해 고장구간을 분리, 고장파급효과를 최소화하게 되는데 크게 2개의 방법론으로 실현될 수 있다. 하나는 유니 캐스팅 통신방식에 기반한 추론 방법론이고 다른 하나는 멀티 캐스팅 통신방식에 기반한 기법이다.

3.2.1 유니 캐스팅 기반 방법론

유니 캐스팅 방법론은 멀티 캐스팅 방법론에 비해 비교적 간단한 RULE에 의하여 실현될 수 있다. 여기서 RULE들은 일반고장의 경우 CB로부터 고장점까지의 선로상의 FI들이 고장전류를 감지하는 반면 부하단의 FI들은 무전압을 감지하며 특히, HIF의 경우 부하단의 FI들만이 무전압을 감지한다는 사실에 기반하여 얻어진다.

RULE 1] SSW(Self SWitch)의 현재상태가 ON이고 FI의 고장전류 감지상태가 SET이면 유니 캐스팅 방식을 기반으로 순차적으로 MNIS(Multiple Neighbor IED Set)에 대한 고장정보를 수집, 무전압 감지상태가 SET인 FI가 1개 이상 존재하면 보호구간에 HIF가 아닌 지락고장이 발생한 것으로 판단, 자율적으로 개폐기를 개방하도록 한다. 여기서 SSW는 IED에 대응하는 개폐기를 의미하며, MNIS는 그림 1에서 SSW를 S₂로 하는 하는 경우 S₂에 전기적으로 직접 연결되는 개폐기들 {S₁, S₃, S₆}에 대응하는 IED들에 대한 IP들을 의미한다. 단선을 포함하기 때문에 부하단에 무전압 상태가 감지된다.

RULE 2] SSW의 현재상태가 ON이고 FI의 고장전류 감지상태가 SET이면 유니 캐스팅 방식을 기반으로 순차적으로 MNIS에 대한 고장정보를 수집, 고장전류 감지상태가 SET인 FI가 1개만 존재하면 보호구간에 단락고장이나 수목접촉 등의 고장이 발생한 것으로 판단, 자율적으로 개폐기를 개방하도록 한다. 이 고장에서는 단선이 아니기 때문에 부하단에 부하전류가 흘러 무전압을 감지하지 못한다.

RULE 3] SSW의 현재상태가 ON이고 FI의 무전압 감지상태가 SET이면 유니 캐스팅 방식을 기반으로 순차적으로 MNIS에 대한 고장정보를 수집, 무전압 감지상태가 RESET인 FI들이 하나 이상 존재하면 전원구간에 HIF가 발생한 것으로 판단, 그 개폐기들 중 전원 측 개폐기에 개방명령 메시지를 전송, 고장구간을 분리하도록 한다. 이 고장에서는 단선사고이나 고장전류가 흐르지 않기 때문에 전원단의 FI들은 고장전류를 경험하지 못한다.

3.2.2 멀티 캐스팅 기반 방법론

멀티 캐스팅 방법론에서 IED 추론기반 시스템은 RULE에 따라 IED간에 멀티캐스팅 방식으로 정보를 교환하게 되는데 유니캐스팅 방식에 비해 내부상태로부터 계통상태를 판단하

여 고장 및 상태정보 전송을 위한 RULE들과 수신된 고장 및 제어정보로부터 내부상태를 제어하기 위한 RULE들로 구성된다. 먼저 내부상태로부터 계통상태를 판단, 고장정보 전송을 위한 RULE들은 다음과 같다. 여기서 RULE들은 SSW가 CB가 아닌 경우이며 CB인 경우는 설명되지 않기 때문에 표 2를 참조한다.

RULE 4] IED는 SSW의 현재상태 ON이고 FI의 고장전류 감지상태가 SET이면 고장정보를 멀티캐스팅 방식으로 전송한다. 고장정보 메시지는 IED에 대한 IP, ID, 고장전류 감지상태, 무전압 감지상태를 포함한다. 여기서 SSW(Self SWitch)는 IED에 대응하는 개폐기를 의미한다. 이 규칙은 HIF가 아닌 지락고장의 경우로써, 전원단에 고장전류가 흐르고 동시에 부하단에서 무전압이 감지되거나, 또는 보호구간에 단락고장이나 수목접촉 등의 고장이 발생, 전원단에 고장전류가 흐르면서 부하단에 부하전류가 공급되어 무전압이 감지되지 않는 경우에 포함된다.

RULE 5] IED는 SSW의 현재상태가 ON이고 FI의 무전압 감지상태가 SET이면 고장정보 메시지를 멀티캐스팅 방식으로 전송한다. 이 규칙은 HIF인 경우로써 전원단에서 고장전류가 감지되지 않고 부하단에서 무전압이 감지된다.

다음, 다른 IED들로부터 수신되는 고장정보로부터 개폐기 내부상태를 제어하기 위해서 현재 개폐기의 내부상태, 계통구성 및 특성 등을 고려한 RULE들이 결정된다. 표 2는 배전계통 특성 분석결과를 보인다. 먼저, 표의 숫자는 MNIS 중 고장전류감지상태 또는 무전압 감지상태를 SET로 가지는 IED의 숫자를 표시한다.

RULE 6] IED는 SSW의 현재상태가 ON이고 FI 상태가 SET이면 수신된 고장정보 메시지에서부터 고장구간 분리용 개폐기 추론을 실시한다.

표 2 배전계통구조 분석결과

Table 2. The analysis results of distribution system topology

| 고장 특성 | 고장 감지 상태 | 정상IED | | | | 후보IED | | | | 특이점 |
|----------|----------------|-------|-----|---------|---------|-------|----------|---------|---------|------------------------|
| | | SW | | | | SW | | | | |
| | | CB | 다회로 | | | CB | 다회로 | | | |
| | | | 일반 | 전원 측 | 부하 측 | | 일반 | 전원 측 | 부하 측 | |
| 일반 고장 | 고장 전류 감지 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 예비후보 MN=1 (CB제외) |
| HIF | 무전 압 감지 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | MN >1 | 3 | 1 | 예비후보 MN>0 (CB제외) |

RULE 7] SSW의 FI 고장전류 감지상태가 SET, 수신되는 RFMIS중 MNIS 멤버이면서 FI 고장전류 감지상태가 SET인 IED가 하나인 경우 즉, MN=1인 경우 고장전류 감지상태가 SET인 IED에 대응하는 개폐기를 고장구간 분리용 개폐기로 추론, 개폐기를 개방하고 추론된 정보를 중앙제어장

치에 전송한다. 이 규칙은 보호구간에 HIF가 아닌 지락고장이 발생, 전원단에 고장전류가 흐르고 부하단에 부하전류가 흐르는 경우, 또는 단락고장이나 수목접촉 등의 고장이 발생, 부하단에 부하전류가 공급되어 무전압이 감지되지 않고 전원단에 고장전류가 흐르는 경우이다. 여기서 RFMIS(Received Fault Information Message Set)는 RULE 4-5)에 의해서 각각의 IED들부터 수신되어 저장된 고장정보 메시지 집합이다.

RULE 8] SSW의 FI 고장전류 감지상태 및 무전압 감지상태가 RESET, RFMIS중 MNIS 멤버이면서 무전압 감지상태가 SET인 IED가 중 하나 이상인 경우 즉, MN>0인 경우 수신된 IED에 대응하는 개폐기를 고장구간 분리용 개폐기로 추론, 개폐기를 개방하고 추론 정보를 중앙제어장치에 전송한다. 이 규칙은 HIF가 발생, 전원단에 고장전류가 흐르지 않으나 부하전류가 흐르고 부하단에 무전압이 감지되는 경우에 해당한다.

RULE 9] 개폐기 개방명령시 가스압이 규정 값 이하이면 제어명령을 포기하고 전원 측 개폐기를 추론하고 정보를 중앙제어장치에 전송한다.

RULE 10] RULE 7)에서 개폐기 개방에 실패하는 경우 MNIS로부터 고장전류를 경험한 IP에 대응하는 개폐기에 제어명령 메시지를 유니 캐스팅 방식으로 전송한다.

RULE 11] RULE 8)에서 개폐기 개방에 실패하고 MNIS의 멤버 수가 2인 경우 무전압을 감지하지 않은 IP에 대한 개폐기 제어명령 메시지를 유니 캐스팅 방식으로 전송한다. 이 규칙은 HIF의 경우 전원단에 전류가 흐른다는 사실에 따른다.

RULE 12] RULE 8)에서 개폐기 개방에 실패하고 MNIS의 멤버 수가 3이상인 경우 무전압을 감지하지 않은 IP에 대응하는 IED들 중 최대전류를 가지는 IED에 대한 개폐기 개방 메시지를 유니캐스팅 방식으로 전송한다. 여기서 MNIS의 멤버 수가 3이상인 경우는 지중 다회로 개폐기나 분기점 경우이며 무전압을 감지하지 않은 IED들에 대한 전류크기의 확인은 각각의 IED들에 고장전류 크기 요청 메시지를 전송하고 수신하는 개폐기간 1:1 통신방식(유니캐스팅 방식)을 통해서 얻어진다. 이 규칙은 전원단에 2개 이상의 개폐기가 존재하는 경우, 전류가 큰 쪽이 전원측이며 작은 쪽이 분기선이라는 사실에 따른다.

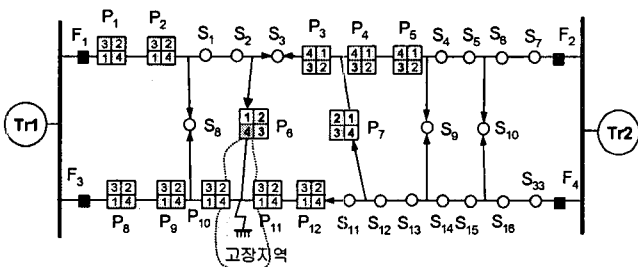


그림 4 다회로 개폐기를 포함하는 지중선로
Fig. 4 Underground distribution line including multi-circuit switch

그림 4는 다회로 개폐기를 포함하는 지중선로를 보이는데 다회로 개폐기 구간 P10과 P11사이에서 고장이 발생하였음을 알

수 있다. 이때 고장구간 분리용 개폐기는 P10의 4번째 회로 개폐기인 P10.4 개폐기가 되는데, 만약 개폐기 개방에 실패하는 경우 3개의 MNIS에 해당하는 P10.1 P10.2 P10.3 중 전원측 개폐기를 개방해야만 한다. 이 경우 전원 측 개폐기를 찾는 방법은 최대전류가 흐르는 선로의 개폐기를 찾는 것이다. 만약 이 과정을 통해서 최종적으로 고장구간의 자율적 분리에 실패하면 정보를 중앙제어장치에 전송하고 CB나 리클로저는 영구 개방된다.

3.3 멀티캐스팅 기반 분산 자율적 고장구간 분리 절차

본 연구에서 제안되는 멀티캐스팅 기반의 분산 자율적 고장구간 분리체계는 기본적으로 클라이언트 모듈과 서버모듈로 구성된다. 그림 4는 IED의 추론절차를 보이는데, 좌측의 흐름도가 클라이언트 모듈, 우측이 서버모듈에 대한 추론절차를 보인다. 클라이언트 모듈에 대한 추론절차는 단계 1-3]으로 정의된다.

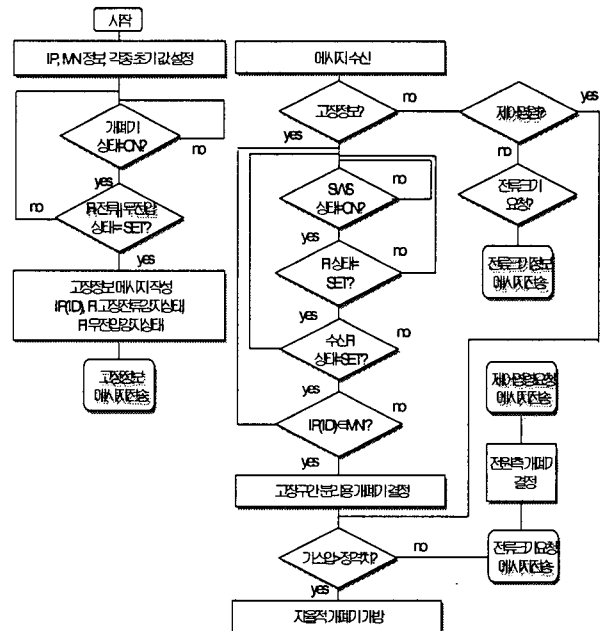


그림 5 IED 추론절차
Fig. 5 IED inference procedure

단계 1] 먼저 IED는 구동을 위해 IP, MNIS 정보와 초기치가 원격 또는 로컬로 입력된다. 여기서 IP는 IED에 대한 IP 주소이며 MNIS는 IED에 대한 전원측 IP와 부하측 IP를 포함하는데 부하용통시 정상시와는 달리 반대방향으로 부하전류가 흐르기 때문에 전원측 또는 부하측은 의미가 없으며 다회로 개폐기의 경우 최대 4개까지 포함할 수 있다.

단계 2] RULE 4-5)를 기반으로 IED가 고장전류 감지상태이거나 무전압 감지상태인 경우 IP(ID), FI 고장전류 감지상태 그리고 FI 무전압 감지상태를 포함하는 고장정보 메시지를 전송한다.

단계 3] 메시지 전송을 완료한 후 단계 2)의 절차를 반복한다.

반면에 서버 모듈에 대한 추론절차는 수신된 메시지를 분

석하여 적절한 기능을 실행하기 위한 단계 4-10]으로 정의될 수 있다.

단계 4] 수신된 메시지의 타입을 분석하여 고장정보 메시지인지 제어명령 메시지인지 또는 고장전류크기 정보를 요청하는 메시지인지를 결정한다. 고장정보 메시지 인 경우 단계 5], 제어명령인 경우 단계 6]을 수행하며, 고장전류크기 정보 요청인 경우 고장전류 크기정보 메시지를 전송한다.

단계 5] RULE 6-9]를 기반으로 고장구간 분리용 개폐기를 결정, 가스압을 확인하여 가스압이 기준 값보다 큰 경우 개폐기를 개방시켜 고장구간이 자율적으로 분리되도록 한다. 그러나 가스압이 기준 값보다 작은 경우 단계 6]을 실행한다.

단계 6] RULE 10-11]을 기반으로 전원 측 고장구간 분리용 개폐기에 해당하는 IED에 제어명령 메시지를 전송한다. 만약, 다회로 개폐기로써 MNIS의 수가 3이상인 경우 단계 7]을 수행한다.

단계 7] RULE 12]에 의해 1:1 통신을 통해 고장전류 크기정보를 요청, 수집하여 최대전류 크기를 가지는 개폐기를 고장구간 분리용 개폐기로 결정하고 대응하는 IED에 제어명령 메시지를 전송한다.

단계 8] 전원 측 IED는 제어 메시지를 수신한 후 단계 7]에 따라 개폐기를 개방시켜 고장구간을 신속하게 분리한 후, 단계 4]로 복귀하여 작업을 반복한다.

4. 시뮬레이션 고찰

본 연구에서는 배전계통에 멀티 에이전트 개념을 적용한 네트워크 기반의 개폐기 IED를 이용하여 분산, 자율적 고장구간 분리를 실현함으로써 배전계통 공급 신뢰도를 개선할 수 있는 새로운 방법론을 제안하였다. 또한 분산, 자율적 고장구간 분리를 위한 IED의 추론기반 솔루션이 새롭게 설계되었다. 따라서 제안된 네트워크 기반의 IED 솔루션의 배전계통 자율적 고장구간 분리에 대한 방법론으로서의 적용 가능성이 검토된다.

4.1 배전 시스템 모델

먼저 제안된 전략의 유효성을 검증하기 위해서 그림 7에 보인 가공선로와 지중선로가 혼재한 대표적인 배전계통이 도입된다. 배전계통 모델은 4대의 주변압기 {T₁, T₂, T₃, T₄}로부터 각각 전력을 공급받는 각각 6, 6, 6, 6개의 실 선로들 중에서 대표적인 6개의 배전선로들로 구성하였다.

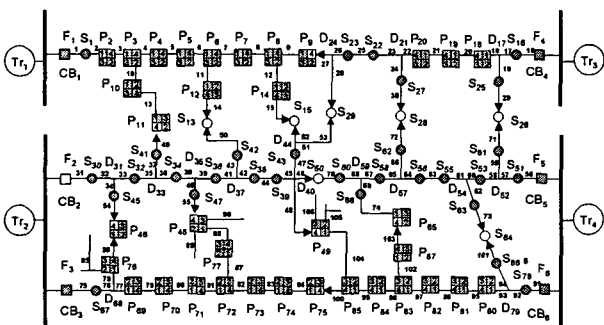


그림 6 성능평가를 위한 배전 시스템 모델
Fig. 6 Test distribution system for performance evaluation

4.2 시뮬레이션 절차

제안된 방법론의 성능검증을 위해 Visual C++ MFC를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구현하였으며, 이 프로그램을 이용한 시뮬레이션 절차는 그림 6에 보인다.

첫째 DB로부터 배전계통 모델을 실시간 DB에 구축한 후, 시뮬레이션을 위한 고장유형, 배전선로, 고장구간을 설정한다. 둘째, 고장 시뮬레이션을 통해 각 IED의 고장전류감지상태, 무전압감지상태가 결정되는데, 이들은 일반적 고장의 경우 고장전류가 고장구간까지 흐르는 특성과 HIF의 경우 고장구간 후단에서 무전압에 노출되는 특성을 이용한다.

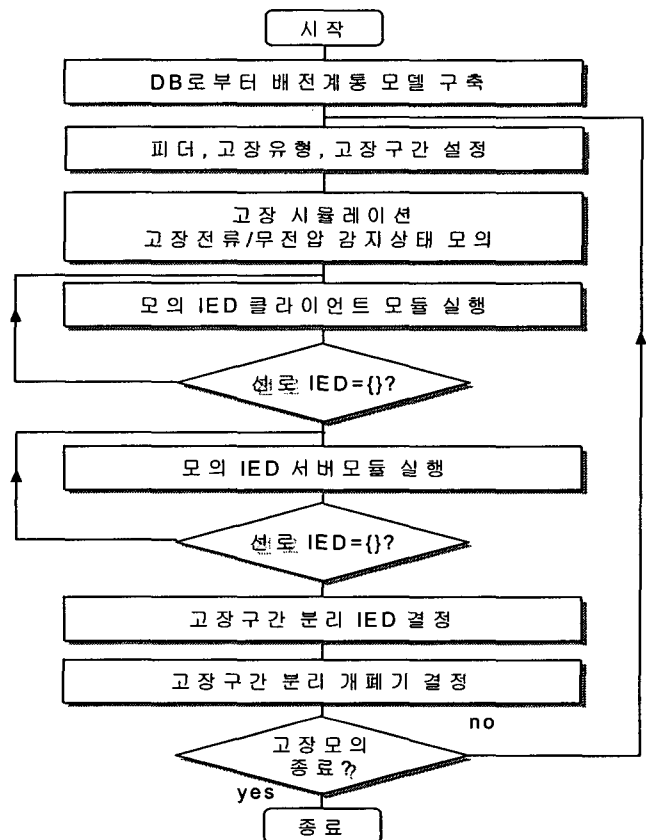


그림 7. 시뮬레이션 절차
Fig. 7 Simulation procedure

셋째, 각 IED의 클라이언트 모듈이 RULE 1-3]에 따라 멀티 캐스팅 개념에 기반하여 IED들에 고장정보를 송신하는 것이 모의된다. 넷째, 각 IED의 서버 모듈들이 RULE 4-10]에 따라 송신된 고장정보 메시지를 분석하여 자율적으로 고장구간 분리를 위해 소속된 개폐기를 개방시켜야 하는지를 결정함으로써 최종적으로 고장구간 분리용 개폐기가 결정된다. 그리고 이 과정은 고장모의를 종료할 때까지 반복된다.

4.3 추론기반 전략의 유효성 검증

시뮬레이션에서는 제안된 방법론과 IED의 추론기반 솔루션이 가공선로, 지중선로 또는 가공과 지중이 혼재한 복합선로의 구조에 유용하게 적용될 수 있음을 보이기 위한 다양한 경우들이 모의되는데, 특히 멀티 캐스팅 기반 기법을 적용하

게 된다. 먼저 Visual C++ MFC로 구현된 모의 프로그램을 이용하여 그림 6에 대한 계통 DB를 구축한다. 그림 8은 DB의 5개 테이블 중 개폐기 연결성 테이블 입력화면을 보인다.

다음 적용 가능성을 검토하기 위해 CB 보호구간, 다회로 개폐기 구간, 가공선로구간, 가공 및 지중배전 구간 등 모두 16개의 다양한 경우들이 모의된다.

| NUMB. | SW_N. | PD_N. | SW_ID | SG_N. | CU_S. | DR_S. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 1001 | 1 | C1001 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | S0001 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | S0001 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | P0002 | 2 | 1 | 1 |
| 4 | 2 | 4 | P0002 | 3 | 1 | 1 |
| 5 | 3 | 1 | P0003 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 3 | 4 | P0003 | 4 | 1 | 1 |
| 7 | 4 | 1 | P0004 | 4 | 1 | 1 |
| 8 | 4 | 4 | P0004 | 5 | 1 | 1 |
| 9 | 4 | 4 | P0004 | 5 | 1 | 1 |
| 10 | 5 | 1 | P0005 | 5 | 1 | 1 |
| 11 | 5 | 4 | P0005 | 6 | 1 | 1 |
| 12 | 6 | 1 | P0006 | 6 | 1 | 1 |
| 13 | 6 | 4 | P0006 | 7 | 1 | 1 |
| 14 | 6 | 3 | P0006 | 11 | 1 | 1 |
| 15 | 7 | 1 | P0007 | 7 | 1 | 1 |
| 16 | 7 | 4 | P0007 | 8 | 1 | 1 |
| 17 | 8 | 1 | P0008 | 8 | 1 | 1 |
| 18 | 8 | 4 | P0008 | 9 | 1 | 1 |
| 19 | 8 | 2 | P0008 | 12 | 1 | 1 |
| 20 | 9 | 1 | P0009 | 9 | 1 | 1 |
| 21 | 9 | 4 | P0009 | 27 | 0 | 0 |
| 22 | 10 | 1 | P0010 | 10 | 1 | 1 |
| 23 | 10 | 4 | P0010 | 13 | 1 | 1 |
| 24 | 11 | 1 | P0011 | 13 | 1 | 1 |
| 25 | 11 | 4 | P0011 | 49 | 0 | 0 |
| 26 | 12 | 1 | P0012 | 11 | 1 | 1 |

그림 8 개폐기 연결성 DB 입력화면
Fig. 8 Switch connection database view

CASE 1] CB보호구간 $\{CB_1, S_1\}$ 의 선간단락고장을 모의한다. 고장전류를 감지한 IED에 대응하는 개폐기들은 $\{CB_1\}$ 이다. MNIS는 $\{S_1\}$ 이고 RFMIS가 $\{\}$ 이기 때문에 MNIS와 RFMIS의 공통멤버 수 $MN=0$ 이다. 따라서 표 2에 보인 규칙에 따라 구간 분리를 위한 개폐기 후보가 CB_1 임을 확인할 수 있으며, 추론결과 SIM이 CB_1 를 추론함으로써 제안된 규칙 기반 솔루션의 적용 유효성을 확인할 수 있다. 여기서 RFMIS는 고장전류를 감지한 IED들이 멀티캐스팅 방식으로 송신한 메시지들을 수신하여 얻어진 IED들의 고장정보 메시지 집합이다.

CASE 2] CB보호구간 $\{CB_1, S_1\}$ 의 HIF를 모의한다. 고장전류를 감지한 IED에 대응하는 개폐기들은 $\{S_1, P_{2.1}, P_{2.4}, P_{3.1}, P_{4.1}, P_{1.4}, P_{5.1}, P_{5.4}, P_{6.1}, P_{6.4}, P_{7.1}, P_{7.4}, P_{8.1}, P_{8.2}, P_{8.4}, P_{9.1}, P_{12.1}, P_{12.4}, P_{14.1}, P_{14.4}\}$ 이다. MNIS는 $\{S_1\}$ 이고 RFMIS가 $\{S_1, P_{2.1}, P_{2.4}, P_{3.1}, P_{4.1}, P_{4.4}, P_{5.1}, P_{5.4}, P_{6.1}, P_{6.4}, P_{7.1}, P_{7.4}, P_{8.1}, P_{8.2}, P_{8.4}, P_{9.1}, P_{12.1}, P_{12.4}, P_{14.1}, P_{14.4}\}$ 이기 때문에 MNIS와 RFMIS의 구성요소 간 일치 수 $MN=1$ 이다. 따라서 표 2에 보인 규칙에 따라 구간 분리를 위한 개폐기 후보가 CB_1 임을 확인할 수 있으며, 추론결과 SIM이 CB_1 를 추론함으로써 제안된 규칙 기반 솔루션의 적용 유효성을 확인할 수 있다. 여기서 RFMIS는 무전압을 감지한 IED들이 멀티캐스팅 방식으로 송신한 메시지들을 수신하여 얻어진 IP(ID)들의 집합이다.

CASE 3] 다회로 개폐기 구간 $\{P_{3.4}, P_{4.1}\}$ 의 선간단락고장을 모의한다. 고장전류가 크기 때문에 개폐기들 $\{CB_1, S_1, P_{2.1}, P_{2.4}, P_{3.1}, P_{3.4}\}$ 이 고장전류를 감지하여 고장전류감지상태가 SET이되고 고장구간 부하단의 개폐기들은 고장전류를 경험하지 못하기 때문에 개폐기들 $\{P_{4.1}, P_{4.4}, P_{5.1}, P_{5.4}, P_{6.1}, P_{6.3}, P_{6.4}, P_{7.1}, P_{7.4}, P_{8.1}, P_{8.2}, P_{8.4}, P_{9.1}, P_{12.1}, P_{12.4}, P_{14.1}, P_{14.4}\}$ 는 고장전류 감지상태가 RESET으로 표시된다. 여기서 MNIS는 구조적으로 $\{P_{3.1}, P_{3.2}, P_{4.1}\}$ 이 되고

RFMIS는 $\{CB_1, S_1, P_{2.1}, P_{2.4}, P_{3.1}\}$ 이다.

따라서 공통요소는 $\{P_{3.1}\}$ 이 되며, $MN = 1$ 이므로 RULE 7]에 따라 고장구간 분리를 위한 개폐기 후보는 개폐기 $P_{3.4}$ 가 된다.

그림 9는 자율적 고장구간 시뮬레이터의 모의결과를 보인다. 그림에서 우측의 배전선로 이벤트 부분은 모의 경우 1에 대한 이벤트 입력화면을 보인다. 또한 SW_NM은 개폐기 번호, PD_NM은 페드번호, FI는 고장전류 감지상태, NV는 무전압감지상태, 그리고 SIM은 모의결과를 보이는데, SIM=0인 경우가 개폐기의 개방을 표시한다.

| # | 번호 | 이벤트 | 구간ID | SW_NM | PD_NM | MN1 | MN2 | MN3 | MN4 | FI | NV | SIM | P |
|----|----|------|--------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|---|
| 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 선간단락 | H00002 | 2 | 1 | 1 | 3 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 선간단락 | H00005 | 2 | 4 | 2 | 4 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 3 | 선간단락 | H00004 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 4 | 선간단락 | H00005 | 3 | 2 | 4 | 21 | 5 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 5 | 선간단락 | H00006 | 3 | 4 | 4 | 5 | 7 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 6 | 6 | 선간단락 | H00007 | 4 | 1 | 5 | 8 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 7 | 선간단락 | H00008 | 4 | 4 | 5 | 9 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 8 | 8 | 선간단락 | H00009 | 5 | 1 | 6 | 10 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 9 | 9 | 선간단락 | H00010 | 5 | 4 | 9 | 11 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | 10 | 선간단락 | H00011 | 6 | 1 | 10 | 12 | 13 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 11 | 11 | 선간단락 | H00012 | 6 | 5 | 11 | 13 | 13 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 12 | 12 | 선간단락 | H00013 | 6 | 4 | 11 | 12 | 14 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 13 | 13 | 선간단락 | H00014 | 7 | 1 | 13 | 15 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 14 | 14 | 선간단락 | H00015 | 7 | 4 | 14 | 16 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 15 | 15 | 선간단락 | H00016 | 8 | 1 | 15 | 17 | 18 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 16 | 16 | 선간단락 | H00017 | 8 | 2 | 16 | 20 | 18 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 17 | 17 | 선간단락 | H00018 | 8 | 4 | 16 | 17 | 19 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 18 | 18 | 선간단락 | H00019 | 9 | 1 | 18 | 20 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 19 | 19 | 선간단락 | H00020 | 9 | 4 | 19 | 19 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 20 | 20 | 선간단락 | H00021 | 10 | 1 | 5 | 22 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 21 | 21 | 선간단락 | H00022 | 10 | 4 | 21 | 23 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 22 | 22 | 선간단락 | H00023 | 11 | 1 | 22 | 24 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 23 | 23 | 선간단락 | H00024 | 11 | 4 | 23 | 25 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 24 | 24 | 선간단락 | H00024 | 11 | 4 | 23 | 25 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

그림 9 선로구간 $\{P_{34}, P_{41}\}$ 의 선간단락고장 모의
Fig. 9 The line to line short fault case of line section $\{P_{34}, P_{41}\}$

따라서 자율적 고장구간 분리를 위한 개폐기 후보는 개폐기 $P_{3.4}$ 임을 알 수 있으며 이것을 통해서 규칙기반 IED 솔루션의 정확성을 확인할 수 있다.

| # | 번호 | 이벤트 | 구간ID | SW_NM | PD_NM | MN1 | MN2 | MN3 | MN4 | FI | NV | SIM | P |
|----|----|-----|--------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|---|
| 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | HIF | H00002 | 2 | 1 | 1 | 3 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 2 | HIF | H00003 | 2 | 4 | 2 | 4 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 3 | HIF | H00004 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 4 | HIF | H00005 | 3 | 2 | 4 | 21 | 5 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 5 | HIF | H00006 | 3 | 4 | 4 | 5 | 7 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 6 | 6 | HIF | H00007 | 4 | 1 | 5 | 8 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 7 | 7 | HIF | H00008 | 4 | 4 | 5 | 9 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8 | 8 | HIF | H00009 | 5 | 1 | 6 | 10 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 9 | HIF | H00010 | 5 | 4 | 9 | 11 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 10 | HIF | H00011 | 6 | 1 | 10 | 12 | 13 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 11 | HIF | H00012 | 6 | 5 | 11 | 13 | 13 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 12 | 12 | HIF | H00013 | 6 | 4 | 11 | 12 | 14 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 13 | 13 | HIF | H00014 | 7 | 1 | 13 | 15 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 14 | 14 | HIF | H00015 | 7 | 4 | 14 | 16 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 15 | HIF | H00016 | 8 | 1 | 15 | 17 | 18 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 16 | 16 | HIF | H00017 | 8 | 2 | 16 | 20 | 18 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 17 | 17 | HIF | H00018 | 8 | 4 | 16 | 17 | 19 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 18 | 18 | HIF | H00019 | 9 | 1 | 18 | 20 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 19 | 19 | HIF | H00020 | 9 | 4 | 19 | 19 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 20 | 20 | HIF | H00021 | 10 | 1 | 5 | 22 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 21 | 21 | HIF | H00022 | 10 | 4 | 21 | 23 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 22 | 22 | HIF | H00023 | 11 | 1 | 22 | 24 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 23 | 23 | HIF | H00024 | 11 | 4 | 23 | 25 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 24 | 24 | HIF | H00024 | 11 | 4 | 23 | 25 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

그림 10 선로구간 $\{P_{34}, P_{41}\}$ 의 HIF 모의
Fig. 10 The HIF fault case of line section $\{P_{34}, P_{41}\}$

CASE 4] 다회로 개폐기 구간 $\{P_{3.4}, P_{4.1}\}$ 의 HIF를 모의한다. 고장전류가 거의 흐르지 않기 때문에 개폐기들 $\{CB_1, S_1, P_{2.1}, P_{2.4}, P_{3.1}, P_{3.4}\}$ 가 고장전류를 감지하여 못하여 고장전류감지상태가 RESET으로 유지되는 반면에, 고장구간 부하단의 개

폐기들은 무전압을 경험하기 때문에 개폐기들 {P_{4.1}, P_{4.4}, P_{5.1}, P_{5.4}, P_{6.1}, P_{6.3}, P_{6.4}, P_{7.1}, P_{7.4}, P_{8.1}, P_{8.2}, P_{8.4}, P_{9.1}, P_{12.1}, P_{12.4}, P_{14.1}, P_{14.4}}의 무전압 감지상태가 SET으로 모의된다. MNIS는 {P_{3.1}, P_{3.2}, P_{4.1}}, RFMIS는 {P_{4.1}, P_{4.4}, P_{5.1}, P_{5.4}, P_{6.1}, P_{6.4}, P_{7.1}, P_{7.4}, P_{8.1}, P_{8.2}, P_{8.4}, P_{9.1}, P_{12.1}, P_{12.4}, P_{14.1}, P_{14.4}}이므로 공통멤버는 {P_{4.1}}이다. 따라서 MN>0이므로 RULE 8]에 따라 고장구간 분리를 위한 개폐기 후보는 개폐기 P_{3.4}가 된다.

그림 10은 제안된 규칙기반 솔루션에 기반한 자율적 고장구간 시뮬레이터의 모의결과를 보인다. 그림에서 시뮬레이터는 SIM결과에서 P_{3.4}를 0(OPEN)으로 추론함으로써 개폐기 P_{3.4}를 자율적 고장구간 분리를 위한 개폐기로써 제안한다. 이 결과는 모의경우와 일치함으로써 제안된 추론기반 IED 솔루션 전략의 배전계통 적용 가능성을 확인할 수 있다.

표 3 시뮬레이션 결과
Table 3. Simulation results

| 경우 # | 고장모의 | | | | 시뮬레이션결과 | | | |
|------|-------|------|--|-------------------|--|--|--|-------------------|
| | 고장 유형 | CB # | 고장 구간 | 분리 SW | 고장진류감지/무전압감지 | MNIS | RFMIS | SIM |
| 1 | 단락 | 1 | {CB ₁ , S ₁ } | CB ₁ | {CB ₁ } | {S ₁ } | {} | CB ₁ |
| 2 | HIF | 1 | {CB ₁ , S ₁ } | CB ₁ | {S ₁ , P _{2.1} , P _{2.4} , P _{3.1} , P _{4.1} , P _{4.4} , P _{5.1} , P _{5.4} , P _{6.1} , P _{6.4} , P _{7.1} , P _{7.4} , P _{8.1} , P _{8.2} , P _{8.4} , P _{9.1} , P _{12.1} , P _{12.4} , P _{14.1} , P _{14.4} } | {S ₁ } | {S ₁ , P _{2.1} , P _{2.4} , P _{3.1} , P _{4.1} , P _{4.4} , P _{5.1} , P _{5.4} , P _{6.1} , P _{6.4} , P _{7.1} , P _{7.4} , P _{8.1} , P _{8.2} , P _{8.4} , P _{9.1} , P _{12.1} , P _{12.4} , P _{14.1} , P _{14.4} } | CB ₁ |
| 3 | 단락 | 1 | {P _{3.4} , P _{4.1} } | P _{3.4} | {CB ₁ , S ₁ , P _{2.1} , P _{2.4} , P _{3.1} , P _{3.4} } | {P _{3.1} , P _{3.2} , P _{4.1} } | {CB ₁ , S ₁ , P _{2.1} , P _{2.4} , P _{3.1} } | P _{3.4} |
| 4 | HIF | 1 | {P _{3.4} , P _{4.1} } | P _{3.4} | {P _{4.1} , P _{4.4} , P _{5.1} , P _{5.4} , P _{6.1} , P _{6.3} , P _{6.4} , P _{7.1} , P _{7.4} , P _{8.1} , P _{8.2} , P _{8.4} , P _{9.1} , P _{12.1} , P _{12.4} , P _{14.1} , P _{14.4} } | {P _{3.1} , P _{3.2} , P _{4.1} } | {P _{4.1} , P _{4.4} , P _{5.1} , P _{5.4} , P _{6.1} , P _{6.4} , P _{7.1} , P _{7.4} , P _{8.1} , P _{8.2} , P _{8.4} , P _{9.1} , P _{12.1} , P _{12.4} , P _{14.1} , P _{14.4} } | P _{3.4} |
| 5 | 단락 | 2 | {CB ₂ , S ₃₀ } | CB ₂ | {CB ₂ } | {S ₃₀ } | {} | CB ₂ |
| 6 | HIF | 2 | {CB ₂ , S ₃₀ } | CB ₂ | {S ₃₀ , S ₃₂ , S ₃₄ , S ₃₆ , S ₃₈ , S ₃₉ , S ₄₁ , S ₄₂ , S ₄₃ , S ₄₅ , S ₄₇ } | {S ₃₀ } | {S ₃₀ , S ₃₂ , S ₃₄ , S ₃₆ , S ₃₈ , S ₃₉ , S ₄₁ , S ₄₂ , S ₄₃ , S ₄₅ , S ₄₇ } | CB ₂ |
| 7 | 단락 | 2 | {S ₃₄ , S ₃₆ , S ₄₇ } | S ₃₄ | {CB ₂ , S ₃₀ , S ₃₂ , S ₃₄ } | {S ₃₂ , S ₄₁ , S ₃₆ , S ₄₇ } | {CB ₂ , S ₃₀ , S ₃₂ } | S ₃₄ |
| 8 | HIF | 2 | {S ₃₄ , S ₃₆ , S ₄₇ } | S ₃₄ | {S ₃₆ , S ₃₈ , S ₃₉ , S ₄₁ , S ₄₂ , S ₄₃ , S ₄₅ , S ₄₇ } | {S ₃₂ , S ₄₁ , S ₃₆ , S ₄₇ } | {S ₃₆ , S ₃₈ , S ₃₉ , S ₄₁ , S ₄₂ , S ₄₃ , S ₄₅ , S ₄₇ } | S ₃₄ |
| 9 | 단락 | 3 | {P _{70.4} , P _{71.1} } | P _{70.4} | {CB ₃ , S ₆₇ , P _{69.1} , P _{70.1} , P _{70.4} } | {P _{70.1} , P _{71.1} } | {CB ₃ , S ₆₇ , P _{69.1} , P _{70.1} } | P _{70.4} |
| 10 | HIF | 3 | {P _{70.4} , P _{71.1} } | P _{70.4} | {P _{71.1} , P _{71.4} , P _{72.1} , P _{72.3} , P _{72.4} , P _{73.1} , P _{73.4} , P _{75.1} , P _{77.1} , P _{77.4} , P _{48.1} } | {P _{70.1} , P _{71.1} } | {P _{71.1} , P _{71.4} , P _{72.1} , P _{72.3} , P _{72.4} , P _{73.1} , P _{73.4} , P _{75.1} , P _{77.1} , P _{77.4} , P _{48.1} } | P _{70.4} |
| 11 | 단락 | 4 | {S ₁₈ , P _{18.1} , S ₂₅ } | S ₁₆ | {CB ₄ , S ₁₈ } | {CB ₄ , P _{18.1} , S ₂₅ } | {CB ₄ } | S ₁₆ |
| 12 | HIF | 4 | {S ₁₈ , P _{18.1} , S ₂₅ } | S ₁₆ | {P _{18.1} , P _{18.4} , P _{19.1} , P _{19.4} , P _{20.1} , P _{20.4} , S ₂₂ , S ₂₃ , S ₂₅ , S ₂₇ } | {CB ₄ , P _{18.1} , S ₂₅ } | {P _{18.1} , P _{18.4} , P _{19.1} , P _{19.4} , P _{20.1} , P _{20.4} , S ₂₂ , S ₂₃ , S ₂₅ , S ₂₇ } | S ₁₆ |
| 13 | 단락 | 5 | {S ₅₆ , P ₅₈ , S ₆₂ } | S ₅₆ | {CB ₅ , S ₅₁ , S ₅₃ , S ₅₅ } | {S ₅₅ , P ₅₈ , S ₆₂ } | {CB ₅ , S ₅₁ , S ₅₃ , S ₅₅ } | S ₅₆ |
| 14 | HIF | 5 | {S ₅₆ , P ₅₈ , S ₆₂ } | S ₅₆ | {S ₅₈ , S ₆₀ , S ₆₂ , S ₆₆ , P _{65.1} } | {S ₅₅ , P ₅₈ , S ₆₂ } | {S ₅₈ , S ₆₀ , S ₆₂ , S ₆₆ , P _{65.1} } | S ₅₆ |
| 15 | 단락 | 6 | {P _{83.1} , P _{83.3} , P _{83.4} } | P _{83.1} | {CB ₆ , S ₇₉ , P _{80.1} , P _{80.4} , P _{81.1} , P _{81.4} , P _{82.1} , P _{82.4} , P _{83.1} , P _{83.4} } | {P _{83.3} , P _{83.4} , P _{81.1} , P _{81.4} , P _{82.1} , P _{82.4} } | {CB ₆ , S ₇₉ , P _{80.1} , P _{80.4} , P _{81.1} , P _{81.4} , P _{82.1} , P _{82.4} , P _{83.1} } | P _{83.1} |
| 16 | HIF | 6 | {P _{83.1} , P _{83.3} , P _{83.4} } | P _{83.1} | {P _{83.3} , P _{83.4} , P _{84.1} , P _{84.2} , P _{85.1} , P _{85.3} , P _{85.4} , P _{87.1} , P _{87.4} , P _{49.1} } | {P _{83.3} , P _{83.4} } | {P _{83.3} , P _{83.4} , P _{84.1} , P _{84.2} , P _{85.1} , P _{85.3} , P _{85.4} , P _{87.1} , P _{87.4} , P _{49.1} } | P _{83.1} |

표 3은 앞에서 설명된 CASE1-4]를 포함하여 추론기반 솔루션의 다양한 배전계통 구조에 대한 적용가능성에 대한 모의결과를 보인다. CB는 물론 가공선로상의 분기점에서 고장이 발생하는 경우, 지중선로에서 다화로 개폐기의 전원측 또는 부하측에서 구간에서 고장이 발생하는 경우, 다화로 개폐기와 가공선의 분기점이 인접한 구간에서 고장이 발생하는 경우 등을 포함한다. 모의결과에서 MNIS와 RMI 중 굵은 글씨로 표시된 개폐기들은 그 IED들이 서로 동일함을 표시하는데, CASE 1-16]에서 표 2와 RULE 4-10]를 적용하여 얻은 SIM 결과가 모의경우들과 정확하게 일치함으로써 제안된 추론규칙들과 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동화된 배전계통에서 네트워크를 기반으로 선로상의 개폐기 IED들이 자유로운 운전정보 교환을 통해 고장구간을 자율적으로 판단, 분리함으로써 기존의 중앙제어 방식에 의한 고장구간 분리방식에 비해 정전피해를 최소화할 수 있는 네트워크 기반 자율적 고장구간 분리 방법론을 제안하였다. 먼저, 배전계통상에서 발생할 수 있는 고장유형을 분석, 단계적 처리방안을 제시하였으며, 다음 자율적 고장구간 분리시스템을 설계하였는데, 각각의 개폐기 IED들은 P2P 통신적용을 위해 네트워크 기반으로 설계되었으며, 클라이언트/서버 기능을 가지도록 하였다. 배전계통 구조를 분석하여 각 IED들에 대한 추론기반 솔루션을 설계하였는데, IED들이 유니캐스팅 방법은 물론 멀티캐스팅 방식에 근거하여 고장정보를 네트워크상에 전송하며 동시에 필요정보를 수신, 사고구간을 추정하여 동작여부를 결정하도록 설계하였다. 끝으로 제안된 방법론의 유효성을 검증하기 위해 대표적인 배전계통에 대해서 멀티 캐스팅 방법에 기반한 시뮬레이션 프로그램을 설계, 구현하였으며, 다양한 경우의 고장사태를 모의하였는데, 모의결과에서 제안된 전략의 유효성이 검증됨으로써 추후 네트워크 기반의 배전자동화 시스템 적용에 있어 기본전략으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업 전력IT 국가전략 과제, 배전지능화 시스템 개발 사업중 "지능형 다기능 단말장치 및 데이터 처리장치 개발" 관련 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] Castro, C. H., J. B. Bunch, and T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. pp. 549-557, March/April 1980.
[2] Taylor T. and D. Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp 239-246, January 1990.

- [3] 고윤석, "배전계통의 다양한 이벤트들을 고려한 선로자동화 소프트웨어 개발", 전기학회논문지, Vol. 52A, No. 8, pp. 463-470, 2003년 8월.
- [4] 고윤석, 이호정, "불확실성을 가지는 배전 SCADA정보로부터 확률론과 휴리스틱 탐색법에 근거한 고장위치 확인 알고리즘 개발", 전기학회논문지, Vol. 47, No. 12, pp 2087-2093, 1998년 12월.
- [5] 고윤석, "배전 SCADA기능을 이용한 고장타입·고장위치 진단 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 48A, No. 7, pp. 1413-1415, 1999년 7월.
- [6] IEC61850 Standards
- [7] Juancarlo Depablos, "Internet Peer to-Peer Communication Based Distribution Loop Control System", Master of Science in Electrical Engineering, 2003년.
- [8] A. Apostolov, J. Beatty, et. al, "Application Of Peer-to-Peer Communications for Protective Relaing", IEEE PSRC Working Group H5 Report to the Communications Subcommittee, 2000.



홍 대 승(洪大昇)

1969년 11월 20일 생. 1992년 광운대 공대 제어계측공학과 졸업. 1994년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1994년~1997년 기아정보시스템. 2000년 광운대 대학원 제어계측공학과 박사과정 수료. 현 남서울대학교 전자공학과 겸임교수.
 전화 : 02-940-5152
 FAX : 02-914-6039
 E-mail : hong_ds@hanmail.net



송 완 석(宋完錫)

1961년 8월 3일 생. 1984년 2월 명지대 전기공학과 졸업. 1986년~1996년 한국전력공사 근무, 1996년~현재 배전자동화시스템 개발 및 구축업무 수행, 2006년 현재 한전KDN(주) 배전자동화팀장. 2003년 한전 사장상 수상.
 전화 : 02-6262-6410
 FAX : 02-6262-6429
 E-mail : kdnsws@kdn.com

저 자 소 개



고 윤 석(高 鈞 錫)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 3월~1996년 3월 한국전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 부교수.



박 학 열(朴學烈)

1969년 5월 17일 생. 1996년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1995년 10월~현재 배전자동화시스템 개발 및 구축업무 수행, 2006년 현재 한전KND(주) 전력IT연구원 영배IT연구그룹 선임연구원.
 전화 : 031-420-0790
 FAX : 031-420-0749
 E-mail : saram@kdn.com