

# 배전 SCADA 기능을 이용한 고장탐입 · 고장위치 진단 전문가 시스템

論 文
48A-11-8

## An Expert System for the Diagnosis of the Fault Type and Fault Location In the Distribution SCADA System

高 鈞 錫\* · 辛 德 浩\*\* · 申 鉉 龍\*\*\* · 李 基 西<sup>§</sup>  
(Yun-Seok Ko · Duc-Ko Sheen · Hyun-Yong shin · Kee-Seo Lee)

**Abstract** - Distribution system can experience the diverse events instantly and permanently. Also, it can experience high impedance fault or line drop under unbalanced situation, Accordingly, it is difficulty to identify the fault location because that data collected from distribution SCADA system may include uncertainty. This paper proposes an expert system, which can infer the faulted location the quickly and exactly for the diverse events in the distribution system. The expert system utilizes distribution SCADA function and collected data, especially, the monitoring mechanism for the normal open position switches is adopted newly in order to recognize the fault type exactly. Also, automated fault location diagnosis strategy is developed in order to minimize the spreading effect of fault obtained from the error of the system operator. The proposed strategy is implemented in C language. Especially, in order to prove the effectiveness of proposed expert system, the several scenario is simulated for the given model system. The real feeders are selected as model system for the simulation.

**Key Words** : Distribution SCADA System, Distribution Automation System, Fault Location, Fault Type Diagnosis

### 1. 서 론

배전계통은 일반 수용가들에게 2차 변전소로부터 인출된 154/22.9KV 레벨의 전력을 공급하기 위해서 수용가 지역을 가장 직접적으로 경유한다. 이때, 수용가 지역은 도심지, 염해지, 산림지 등을 포함하기 때문에 자동차 추돌이나 수목접촉 등으로 인한 잦은 정전사고를 경험하게 된다. 일반적으로, 배전선로는 장거리 배전선로인 경우 수십 km에 걸쳐 널리 분포될 뿐만 아니라 선로공장이 짧은 경우도 대부분이 고밀도 부하지역을 경유, 작업원의 현장출동에 많은 어려움이 있어 신속한 고장위치 확인 및 복구처리가 불가능하기 때문에 일반 수용가들에 대한 공급신뢰도는 심각하게 저하된다. 따라서, 전력 사업자들은 컴퓨터 감시제어기능을 이용하여 고장위치 확인과 복구절차를 원방에서 직접 실행함으로써 전력공급 신뢰도를 극대화할 수 있는 배전 SCADA 시스템을 도입, 운영하고 있는데, 배전선로상에 발생하는 시스템 이벤트들의 다양성과 불확실성으로 인해 고장구간 확인에 많은 어려움이 발생, 배전 SCADA 시스템의 유효성이 심각하게 저하되고 있다. 실제로, 배전선로상에서는 단락, 지락사고를 포함하여

다양한 이벤트가 순시, 또는 영구적으로 발생할 수 있으며, 선로상에 단상과 3상부하가 혼재되어 상 불평형이나 고저항 지락사고, 선로탈락이 발생할 수 있다. 또한, 고장위치 확인을 위해 선로 상에 설치되는 고장 감지기들로부터 수집되는 정보가 오동작이나 부동작 등 불확실성을 가질 수 있기 때문에 기존의 고장처리 메카니즘으로는 정확한 사고위치를 확인하는 작업은 극히, 어려운 작업이다. 참고문헌 [1]에서는 배전자동화시스템에 고장구간 확인을 위한 고장 감지기 개념을 제안하였으며, 참고문헌 [2-9]에서는 배전계통 부하절체 및 고장구간 추정을 위한 방법들이 제안되었다. 특히, 문헌 [10]에서는 확률론을 이용하여 불확실성을 포함하는 배전 SCADA 시스템의 고장 감지기 상태정보로부터 고장위치를 확인할 수 있는 고장위치확인 알고리즘을 제안하였다. 그러나, 이들은 배전계통상에서 발생하는 다양한 이벤트들과 불확실성을 포함하는 실제적인 운영환경에 효과적으로 적용하기 어렵다. 즉, 고장구간 추정의 정확성을 높이기 위해서는 SCADA 감시제어 기능과 수집 데이터들을 종합적으로 이용하여 고장구간 추정의 신뢰도를 높일 수 있는 효율적인 고장구간 추정 전략이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 배전선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대한 이벤트 유형과 발생위치를 신속하고 정확하게 추론할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 전문가 시스템은 배전 SCADA기능과 수집된 데이터를 활용함으로써 고장구간 추정의 신뢰도를 높여 고장구간 탐색시간을 최소화하는데, 특히, 정확한 사고유형 확인을 위해 절분점 감시 메카니즘을 새롭게 채택한다. 또한, 선로사고시 시스템 운영자들의 오류로부터 발생할 수 있는 과급효과를 최소화하기 위해 자동화된 고장구간 진단 전략을

\* 正 會 員 : 남서울대 電子情報通信工學部 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 光云大 工大 制御計測共學科 碩士課程

\*\*\* 正 會 員 : 남서울대 電子情報通信工學部 部教授 · 工博

§ 正 會 員 : 光云大 工大 制御計測共學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 4月 27日

最終完了 : 1999年 10月 9日

제시하고자 한다. 본 연구에서 사고유형이나 사고위치 추정  
에 필요한 경험적 지식은 배전 자동화 시스템 설계자나 운영  
자들로부터 수집된 지식에 근거한다.

2. 배전계통 운용현황

배전계통은 일반 수용가들에게 22.9KV 레벨의 전력을 공  
급하기 위해서 배전 변전소의 주변압기, 22.9KV 모선, 선로  
보호용 차단기(FCB:Feeder Circuit Breaker), 선로구간, 리클  
로우저, 개폐기, 주상변압기 등으로 구성된다. 그림 1은 배전  
계통의 구성과 그 요소를 보인다.

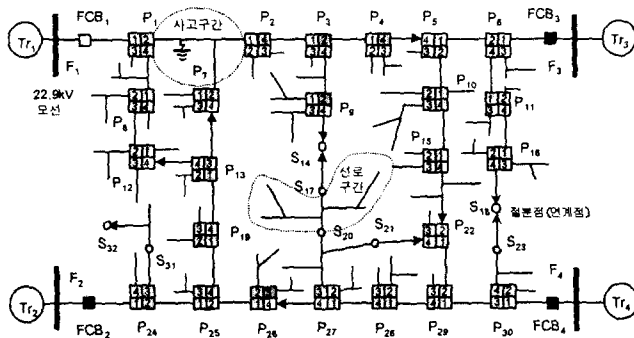


그림 1 배전계통의 구성  
Fig. 1 The structure of distribution system

그림에서,  $Tr_i$ ,  $F_i$ ,  $FCB_i$ 는  $i$ 번째 주변압기, 배전선로, 그리고  
고 선로 보호용 차단기를 나타낸다. 또한,  $S_i$ ,  $P_i$ 는  $i$ 번째 가공  
용 개폐기와 지중용 다회로 개폐기를 나타내는데 다회로 개  
폐기의 경우 최대 4개의 분기회로가 가능하므로  $P_{ij}$ 로 표시  
하는데,  $i$ 번째 다회로 개폐기의  $j$ 번째 분기선로를 의미한다.  
 $\square$ ,  $\circ$ 는 개방된 차단기나 개폐기를  $\blacksquare$ ,  $\bullet$ 는 투입된 차단기  
나 개폐기를 표시한다. 배전계통은 전력공급 신뢰도를 고도  
화하기 위해 부하용통이 가능하도록 수개의 구분 개폐기나  
연계 개폐기를 이용하여 다분할 다연계 구조로 설계된다. 여  
기서, 구분 개폐기란  $P_1, P_2, P_7$ 과 같이 정상상태시 투입되어  
전력공급경로를 구성하다가 비상시/작업정전시 고장구간이나  
작업구간을 분할하기 위해 개방되는 개폐기를 말하며, 연계  
개폐기는 연계점  $P_{12,4}, P_{8,4}, S_{14}, P_{5,4}$ 와 같이 정상시 개방상태  
를 유지함으로써 계통을 수직상 구조로 유지하나, 비상시 투  
입되어 전진 정전구간에 대한 부하용통을 시도하는 개폐기를  
말한다. 또한, 각 개폐기상이나 주요 부하지점에는 고장 감지  
기가 설치된다. 그림 2는 배전 SCADA 시스템의 구성을 보  
인다. 배전 SCADA 시스템은 감시제어 노드, 전문가 시스템,  
DB 노드 그리고 MMI 노드와 FEP(Front End Processor),  
SCCU(Substation Communication Control Unit) 그리고  
RTU로 구성된다. FEP는 2중화 구조로 설계되는데, 스케줄러  
에 따라 {CB상태}와 선로상의 개폐기들에 대한 {전압, 전류,  
FI상태, 개폐기 상태}등을 정해진 주기에 따라 수집한다. 또한,  
상위 노드의 명령에 따라 CB나 개폐기들의 상태를 제어한다.  
SCADA 시스템의 감시제어 절차는 다음과 같다. 먼저, 감시  
제어 노드는 FEP로부터 I/O 기능을 이용하여 CB 정보를 주  
기적으로 수집하며, 경보 처리 모듈에 의해 사고유형을 정확

히 확인한다. 다음, 비상시 전문가 시스템을 구동시켜 실시간  
DB상의 계통 연결성을 탐색하여 고장위치를 확인하고 계통  
운영목적에 맞는 계통 재구성 전략을 수립하게 된다. 다음  
MMI를 통해 개폐기들을 수립된 전략에 따라 순차적으로 제  
어한다.

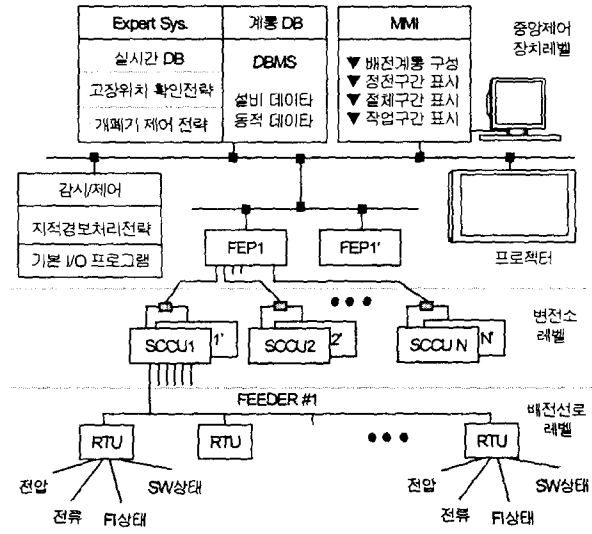


그림 2 배전 SCADA 시스템 구성  
Fig. 2 The structure of distribution SCADA system

만약, 선로상에 지락사고나 단락사고가 발생하면 지락전류  
나 단락전류가 흐르게 되는데, 이들 전류들이 각각 과전류 지  
락 계전기(OCGR)나 과전류 계전기(OCR)의 동작전류보다 크  
면 계전기가 동작하여 차단기나 리클로우저를 개방시킨다.  
따라서, 수집된 CB상태 정보로부터 선로사고를 정확하게 확  
인할 수 있다. 그러나, 선로상에는 고저항 지락사고나 단선사  
고의 경우 지락전류의 크기가 작거나 흐르지 않아 지락 계전  
기가 동작하지 않기 때문에 CB 감시 데이터로부터 지락사고  
를 정확히 감지하기 어렵다. 고장전류가 정확히 흐르는 경우  
라도 고장위치 확인을 위해 선로상에 설치된 고장 감지기  
(Fault Indicator)들이 오동작하거나 부동작할 수 있기 때문  
에 사고위치를 정확히 확인하기 어렵다. 또한, 단상과 3상부하  
가 혼재된 계통에서 상관리의 부정확성으로 인해 지락 계전기  
가 동작할 수 있다. 특히, 이러한 불확실한 상황속에서 사고가  
발생하면 SCADA 기능을 이용한 고장구간 확인 작업은 선로  
조작자들을 당황하게 함으로써 사고파급효과를 심각하게 할  
수 있다. 사실, 이 문제들은 배전 SCADA 시스템의 실제통  
적용에서 직면하는 가장 어려운 문제점들인데, 연계점 감시  
메카니즘과 배전 SCADA의 고장 감지기 상태 감시 기능 그  
리고 SCADA의 CB나 계전기 동작상태 감시 기능을 종합적  
으로 이용함으로써 해결될 수 있다.

3. 경보처리 전략

배전 SCADA 시스템은 CB나 개폐기들의 상태, 부하구간  
전압, 전류값을 스케줄러에 따라 주기적으로 수집하여 고장을  
확인하게 된다. 그러나, 기존의 CB상태 감시 메카니즘은 고

저항 지락저항이나 전선탈락의 경우 고장전류가 흐르지 않아 CB가 동작하지 않으므로 고장을 확인하기가 어려운데, 이 문제는 CB 대신에 연계점을 주기적으로 감시하는 연계점 감시 메카니즘을 통해 해결될 수 있다. 다음은 사고유형 확인을 위한 수개의 경보처리 규칙(RL : Rule)들을 보인다.

RL 1] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작으면 시스템 사고이다. 이 규칙은 CB 감시 메카니즘 대신에 연계점 감시 메카니즘을 이용하기 위한 규칙이다. 일반적으로, 모선사고나 3상단락, 선간단락, 일반 지락사고 등이 발생하면 일단 CB가 차단되기 때문에 연계점 전압은 0에 가까워진다. 지락사고는 고장선로가 도로나 암반위에 떨어지는 경우 발생하는데, 고장전류가 거의 흐르지 않아 CB가 개방되지 않을 수 있다. 또한, 단선사고의 경우도 접속 슬라브가 선로고장시 끊어지거나 자동차 추돌에 의해서 끊어진 고장선로가 전주위에 매달림으로써 발생하게 되는데, CB가 개방되지 않을 수 있다. 그러나, 이들 고저항 지락사고나 단선사고의 경우 비록 CB는 차단되지 않을 수 있으나 사고지점에서 단선이 발생하는 경우이기 때문에 단선된 부하단의 연계점 전압은 0에 가까워진다. 따라서, 연계점의 전압이  $E/2$ 이하가 되는 경우를 감시하면 충분히 선로사고를 확인할 수 있다. 여기서, E는 공칭 상전압을 의미하며, 연계점 전압이란 연계점에 위치한 자동화 개폐기의 전압측정 기능으로부터 측정되는 상 전압을 의미한다.

RL 2] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 개방상태이면 선로사고이다. 그림 1의  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ 으로 둘러싸이는 지역에서 영구 지락사고가 발생하는 경우를 생각해보자. 만약, 고장전류가 정확히 흐른다면, OCGR의 동작에 의해  $FCB_1$ 이 순시 동작 후 영구고장으로 개방된다. 따라서, CB 개방상태를 확인하게 되면 선로사고임을 확인할 수 있다.

RL 3] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 개방상태이고 CB 고장감지기의 a, b, c상 상태가 고장 감지상태이면 3상단락 사고이다. 이 규칙은 고장 감지기의 각 상 상태가 단락고장시의 전류가 흐를 때 동작상태로 전환되도록 설계된다는 사실에 근거한다.

RL 4] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 개방상태이고 CB 고장감지기의 임의의 두상이 고장감지상태이면 선간 단락사고이다. 이 규칙은 RL 3]에 근거한다.

RL 5] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 개방상태이고 CB 고장 감지기의 영상상태가 고장감지상태인 경우 1선 또는 2선 또는 3선 지락사고이다.

RL 6] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 개방상태이고 CB 고장 감지기의 a,b,c중의 두상이상이 고장감지상태이고 영상상태도 고장감지상태인 경우 단락/지락 동시사고로 간주한다.

RL 7] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 투입상태이고 CB 전압이나 전류가 0이 아니면 고저항 지락사고이거나 단선 사고이다. 그림 1의  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ 으로 둘러싸이는 지역에서 영구 지락사고가 발생하는 경우를 생각해보자. 만약, 고장전류가 정확히 흐른다면, OCGR의 동작에 의해  $FCB_1$ 이 순시 동작 후 영구고장으로 개방되나, HIF인 경우 영상전류가 동작전류보다 작게 흐름으로써 OCGR이 동작하지 않아

$FCB_1$ 이 투입상태를 유지함으로써 사고점 이후에는 전력이 공급되지 않는 반면, 선로상에는 계속적으로 전류가 흘러 인명피해나 화재가 우려될 수 있다. 그림 1의 경우 연계점상에 설치된 개폐기들  $P_{3,4}$ 나  $S_{14}$ 의 전압이나 전류값은 0이나  $FCB_1$ 이 투입상태이므로 CB 전압, 전류값은 0가 되지 않는다. 따라서, 사고유형이 고저항 지락사고이거나 단선사고임을 확인할 수 있다.

RL 8] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 투입상태이고 CB 전류와 전압이 0이고 CB 고장 감지기가 감지상태이면 선로사고이다. 일반적으로, 모선사고의 경우 CB의 부하단에 고장전류가 흐르지 않으므로 고장 감지기가 고장 전류를 경험하지 못한다. 따라서, CB 고장 감지기가 고장전류를 경험하면 선로사고임을 확인할 수 있으며, 이러한 사고는 계전기의 고장으로 CB가 동작하지 않아 후비 보호기기인 모선 보호기기가 동작하는 경우에 발생할 수 있다.

RL 9] 만약, 연계점 전압이  $E/2$ 보다 작고 CB가 투입상태이고 CB 전류와 전압이 0이고 CB 고장 감지기가 비감지상태이면 모선사고이다. 변전소 모선사고의 경우 모선단에 고장전류가 흐르고 선로측에는 고장전류가 흐르지 않는다. 따라서, CB는 투입상태이나 CB 전류는 0이며 고장감지기는 비감지상태가 된다.

RL 10] 만약, 선로사고이고 동일선로의 직렬 경로상에서만 사고후보지역이 존재하면 단일사고로 간주한다. 이 규칙은 그림 3에서 동일선로상의 직렬경로상에 있는 수개의 부하구간들 즉,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$ 가 모두 고장구간일 가능성을 보이는 경우이나, 다중사고인 경우라도 모든 감지기들이 동시에 고장전류를 경험하기 때문에 다중사고를 구분할 수 없으며, 단지, 고장감지기의 오동작이나 부동작 가능성이 높다.

RL 11] 만약, 선로사고이고 동일선로의 2개이상의 분기선로상에 사고후보지역이 존재하면 다중사고로 간주한다. 그림 3에서  $Z_1$ ,  $Z_4$ ,  $Z_7$ 은 동일선로상에서 분기선로상의 고장감지기들이 동시에 고장전류를 경험하기 때문에 다중사고로 구분할 수 있다. 그러나, 실제적으로 다중사고가 발생할 가능성은 매우 낮다.

#### 4. 고장구간 결정 전략

배전 SCADA 시스템은 수집된 정보로부터 경보처리전략에 의해 고장유형을 확인, 고장구간 확인 전문가 프로그램을 구동시킨다. 이때, 고장구간 확인 프로그램은 배전계통 네트워크 데이터로부터 선로의 수직상 구조를 전원측에서 부하측으로 동적으로 탐사, 각 구간의 부하전류나, 전압 값 또는 고장 감지기 상태를 확인함으로써 고장구간을 확인하게 된다. 그림 3은 고장구간 탐색 트리 구조를 보인다. 탐색트리 구조에서 노드는 고장 감지기를 반면에 브랜치는 고장 감지기 후단의 부하구간을 의미한다.  $N_{ij}$ 는 깊이 i의 j번째 노드를 표시하는데, 노드들 중 ●는 정전상태 또는 고장전류 감지상태를 ○는 환전상태 또는 고장 전류 미감지 상태를 나타낸다. 고장구간 결정은 수개의 기본규칙들로 확인할 수 있으며, 특히, 수개의 사고후보 지역들이 동시에 존재하는 경우, 사고고후보들의 확인 우선순위는 휴리스틱 규칙(HR:Heuristic

Rule)에 의해서 결정된다.

RL 12] 사고 이벤트가 RL 7]을 만족하는 고저항 지락사고이거나 단선사고이면 최초의 정전상태 구간을 사고부하구간으로 한다. 선로상에 고저항 지락사고가 발생하면 CB가 투입상태를 유지하기 때문에 전원측에서 부하측으로 순차적으로 부하전압이나 전류 데이터를 수집, 무부하 상태를 보이는 최초의 구간을 고장구간으로 추론할 수 있다. 만약, 그림 3의 Z<sub>1</sub>에 대한 사고를 가정하면 노드들 N<sub>1,1</sub>, N<sub>2,2</sub>로부터 분기되는 부하구간들은 활선상태를 보이거나 N<sub>3,2</sub>로부터 분기되는 부하구간들의 임의의 상 전압이나 전류는 사선상태를 보이게 된다. 따라서, Z<sub>1</sub>이 고장구간임을 확인할 수 있다.

RL 13] 사고 이벤트가 RL 9]를 만족하는 변전소 모선사고이면 CB전원단을 고장구간으로 한다. 그림 3에서 변전소 모선사고의 경우 선로상에는 고장구간이 존재하지 않고 CB 전원단인 22.9KV 모선에 사고구간이 존재한다.

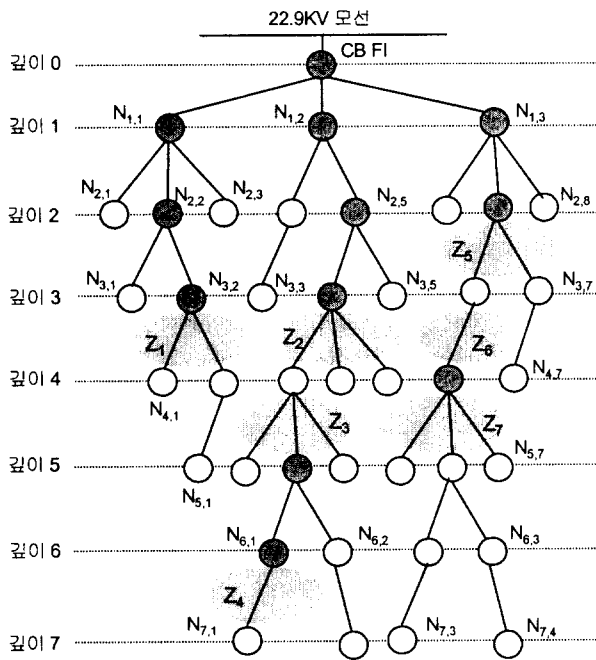


그림 3 고장 감지기 탐색트리 구조  
Fig. 3 Search tree structure of fault indicator

RL 14] 사고 이벤트가 RL 2,3,4,5,6,8]중의 한 규칙을 만족하는 선로사고이면 최종 고장감지 노드의 부하구간을 고장구간으로 한다. 기본적으로 고장 감지기를 이용한 고장구간 확인은 고장전류가 흐르는 선로상의 고장 감지기들만이 고장전류를 감지하고 나머지 감지기들은 고장전류 미감지 상태를 보인다는 사실에 근거한다. 만약, 그림 3에서 Z<sub>1</sub>이 고장구간이라면 노드들 N<sub>1,1</sub>, N<sub>2,2</sub>, N<sub>3,2</sub>는 고장전류 감지상태를 보이는 반면, 그 외의 모든 노드들은 고장전류 미감지상태를 보임으로써 Z<sub>1</sub>이 고장구간임을 확인할 수 있다.

RL 15] 사고 이벤트가 RL 10, 11]을 만족하는 선로사고이면 HR 1-4]에 의해 사고가능성이 가장 높은 부하구간을 사고구간으로 결정한다.

HR 1] 전원투입/부하투입시 투입 부하구간내의 사고후보지역이 우선선택된다. 이 규칙은 부하구간 확인과정에서 고장 예비구간 분리 후 CB 재 투입시나 부하구간 투입시 CB가 개방되면, 투입 되는 부하구간내에 사고구간이 존재하는 것이므로 그 후보지역들을 우선선택하기 위한 규칙이다.

HR 2] max(d<sub>1</sub>+d<sub>2</sub>-d<sub>3</sub>)을 가지는 사고후보그룹이 우선선택된다. 이 규칙은 다중사고 후보그룹들 중에서 탐색 우선순위를 결정하기 위한 규칙으로써, 고장위치를 경험할 위치에 있는 고장 감지기들이 정상적으로, 연속적으로 동작한 패턴을 가지는 후보가 사고후보일 가능성이 높다는 사실에 근거한다. 여기서, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>는 각각 고장전류를 감지할 위치에 있는 고장 감지기들중에서 초기노드로부터 연속적으로 감지상태를 보인 고장감지기들의 수, d<sub>1</sub>으로부터 미감지 상태를 보인 고장 감지기들의 수, d<sub>1</sub>으로부터 고장감지상태를 보인 감지기들의 수를 말하며, (d<sub>2</sub>-d<sub>3</sub>)<0이면 0로 한다. 그림 1에서 d의 값은 Z<sub>1</sub>이 4, Z<sub>4</sub>가 4-1+2=5, Z<sub>7</sub>이 3+1-1=3이므로 {Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub>}, {Z<sub>1</sub>}, {Z<sub>5</sub>, Z<sub>6</sub>, Z<sub>7</sub>}의 사고예비 그룹들 중 {Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub>}이 가장 높은 우선순위를 가진다.

HR 3] max[p(H<sub>i</sub>)] 값을 가지는 구간이 우선선택된다. 이 규칙은 단일사고로써 동일공급경로상에 수개의 후보지역이 존재할 때 사고 가능성이 높은 부하지역을 우선 선택하여 사고 탐사시간을 최소화하기 위한 규칙이다. 사고확률은 아래와 같이 계산된다.[12]

$$p(H_i | E_1 E_2 \dots E_n) = \frac{pA_i pB_i pC_i pD_i p(H_i)}{\sum_{k=1}^m pA_k pB_k pC_k pD_k p(H_k)}$$

$$\text{여기서, } pA_k = \prod_{j_1=1}^{q_1} p(E_{j_1} | H_k)$$

$$pB_k = \prod_{j_2=1}^{q_2} p(E_{j_2} | H_k)$$

$$pC_k = \prod_{j_3=1}^{q_3} p(E_{j_3} | H_k)$$

$$pD_k = \prod_{j_4=1}^{q_4} p(E_{j_4} | H_k)$$

pA<sub>k</sub>는 k번째 가설에 대해서 고장전류를 경험할 위치에 있는 고장 감지기들이 고장전류 감지상태를 보일 조건확률들의 적이며, pB<sub>k</sub>는 그 반대의 경우로써 고장전류를 경험할 위치에 있는 고장 감지기들이 오동작할 확률을 나타낸다. 반면에, pC<sub>k</sub>는 k번째 가설에 대해서 고장전류를 경험하지 못할 위치에 있는 고장 감지기들이 고장전류 미감지 상태를 보일 확률들의 적이며 pD<sub>k</sub>는 그 반대의 경우로써 고장전류 감지상태를 보일 확률들에 관한 식이다. n은 탐색비용 최소화를 위해 사고지역 예비후보들의 수로 제한된다.

HR 4] 이미 선택된 사고예비 그룹은 다음 그룹보다 낮은 우선순위를 가진다. 이 규칙은 사고 이벤트가 RL 11]을 만족하는 선로사고이고 다중사고 탐색 모드인 경우 다중 사고구간을 확인해야 하므로 각각의 그룹을 순차적으로 선택하기 위한 규칙이다. 예를들어, 3개의 그룹 {Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub>}, {Z<sub>1</sub>}, {Z<sub>5</sub>, Z<sub>6</sub>, Z<sub>7</sub>}중 Z<sub>2</sub>가 이미 선택되었으면 Z<sub>1</sub>, Z<sub>5</sub>가 순차적으로 탐색된다.

4. 추론절차

SCADA 시스템의 고장구간 확인절차는 다음과 같은 수개의 단계로 구성된다. 먼저, 감시제어 노드상의 경보처리 모듈은 FEP로부터 연계점상에 위치하는 모든 개폐기들의 전압값  $V_e$ 를 수집하여 RL 1]의 만족여부를 검사한다. 만약, 전압값이 RL 1] 즉,  $V_e < E/2$ 를 만족하는 선로가 존재하는 경우, 단계 1]을 실행시켜 시스템 이벤트의 유형을 확인한다.

단계 1] 사고유형 확인 규칙들 RL 2-11]을 실행시킨다. 만약, RL 2,3,4,5,6,8]을 만족하는 경우 단일선로사고로, RL 7]을 만족하는 경우 고저항 지락사고(HIF)나 단선사고로 간주한다. 반면에 RL 9]를 만족하는 경우 모선사고를, RL 2,10,11]을 만족하는 경우 다중 선로사고를 가정한다. 사고유형 결정 작업이 완료되면, 단계 2]를 실행시킨다.

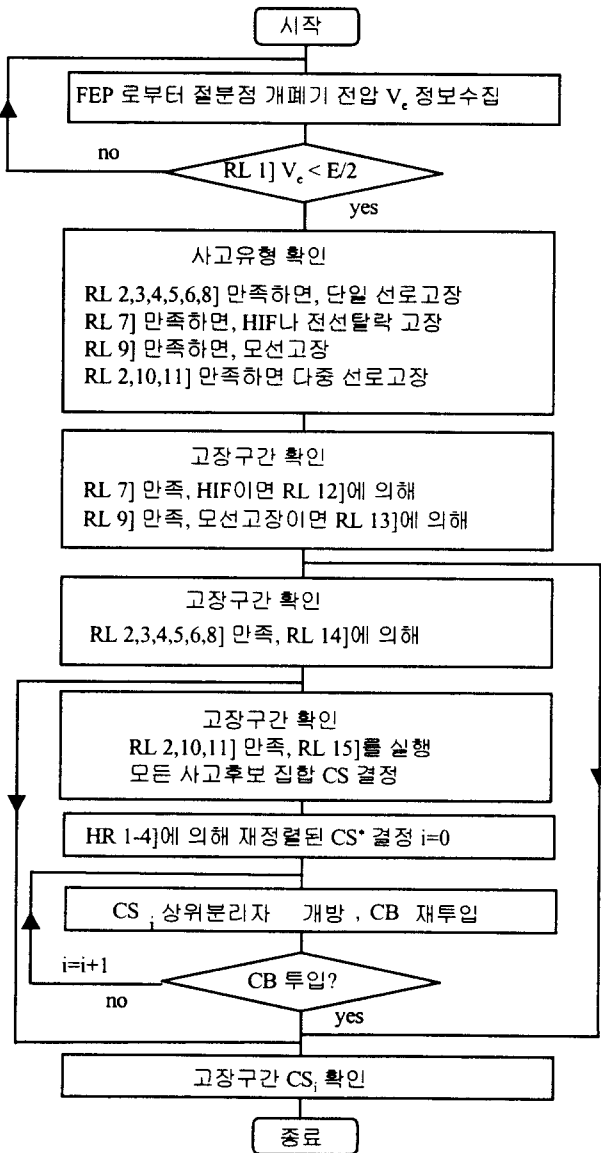


그림 4 고장구간 추론절차  
Fig. 4 The inference procedure of fault zone

단계 2] 사고유형에 따라 고장구간을 확인한다. 만약, RL 9]를 만족하는 모선사고인 경우 RL 13]에 의해 사고지역을 모선으로 추론한다. RL 7]을 만족하는 HIF나 선로탈락 사고인 경우 해당 선로의 CB단으로부터 부하단까지 계통의 수직상 구조에 따라 순차적으로 개폐기 단의 상 전압, 상 전류 값을 수집하여 전압값이  $E/2$ 보다 작아 RL 12]를 만족하는 최초의 구간을 사고구간으로 추론한다. RL 2,3,4,5,6,8]을 만족하는 단일사고인 경우 그림 3의 탐색트리를 추적하여 RL 14]를 만족하는 즉 최초의 고장전류 미감지 부하지역을 사고구간으로 간주한다. 반면에, RL 2,10,11]을 만족하여 다중 사고후보 지역이 존재하는 경우 단계 3]을 수행한다.

단계 3] 주어진 선로에 대한 고장 감지기 탐색트리를 동적으로 추적하면서 가능한 모든 사고후보 지역들의 집합 (CS: Candidate Set)을 결정한다. 다음, HR 1-4]에 의해 사고가능성이 가장 높은 순서에 따라 탐색 우선순위를 결정하여 새로운 집합  $CS^*$ 를 결정한 다음  $CS^*$ 의 우선순위에 따라 사고후보지역이 분리되도록 SCADA 제어기능을 이용하여 사고후보지역에 대한 전원단 개폐기를 개방함으로써 사고구간을 분리한다. 그리고, CB를 재투입한 다음 CB 상태를 검사하여 투입상태임을 확인한다. 만약, 사고구간 추정이 잘못되어 CB가 재개방된 경우 다음 우선순위의 사고후보구간을 분리한다. 그리고 CB를 재투입한 다음, CB 개방상태를 확인하여 개방상태이면 다음 우선순위의 사고후보지역을 분리한다. 이 과정은 CB가 투입상태를 보일 때 까지 계속되는데, 만약, 임의의 사고후보구간을 분리하여 CB가 투입상태를 보인다면 이때 분리된 사고후보구간이 고장구간임을 확인할 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

제안된 문제해결전략의 유효성을 검증하기 위해서 그림 5에 보인 바와 같이 2개의 완전한 배전선로  $F_1, F_2$ 와 말단지역만을 보이는 두 개의 배전선로  $F_3, F_4$ 로 구성되는 배전계통을 도입한다. 배전계통은 배전선로들  $F_1, F_2$ 에 대한 2개의 CB를 포함하여 모두 65개의 개폐기들과 총 105개의 선로구간으로 구성된다. 여기서, 선로구간은 개폐기들 사이의 부하지역을 의미한다. 배전선로들은 도심지의 복잡한 선로특성을 보이기 위해서 지중선로와 가공선로가 일부 혼합된 배전계통으로 구성하였다. 그리고, 다양한 사고 시나리오를 모의하기 위해 사고후보 지역  $\{A_1, A_2, \dots, A_{10}\}$ 을 표시하였는데, 그중  $P_{20,2}$ 로부터 인출되는 가공선로와  $P_{51,4}$ 로부터 인출되는 가공선로가 겹쳐지는 사고후보지역  $A_6$ 은 이단장주에 의해서 동일한 경로를 경유하는 지역임을 표시한다. 따라서,  $A_6$ 에서 사고가 발생하면  $F_1, F_2$ 와 모두가 정전을 경험하게 된다. 다회로 개폐기는 P로 시작하며, S는 가공용 개폐기를 표시한다. 배전선로는 사고빈도에 따라, 안전지역(0.1), 보통지역(0.2), 빈번지역(0.3), 그리고 다발지역(0.4)으로 구분된다.[10] 여기서, ()안의 값은 가설들의 사전확률값이다. 본 연구에서는 전문가 시스템의 유효성을 검증하기 위해서 5개의 대표적인 자동추론 절차를 모의한다.

모의 1)  $F_1$ 의  $A_3$ 지역 HIF(CB[ON],  $S_{31}$ 의  $V_e=4000V$ ,  $V_{CB}=12200V$ )

경보처리 모듈은  $S_{31}$ 의  $V_e < E/2$ 이므로 RL 1]에 의해 시스템 이벤트가 발생했음을 확인한다. 다음, CB가 투입상태이고 CB단의 전압  $V_{CB} > E/2$ 이므로 경보처리 규칙들 중 RL 7]을 만족, HIF나 단선 사고임을 확인한다. 따라서, 전원단에서 부하단까지의 고장구간을 너비반복 탐색법에 의해 탐색, 전압을 확인하게 되는데, CB,  $P_{1.1}$ ,  $P_{1.3}$ ,  $P_{1.4}$ ,  $P_{2.1}$ ,  $P_{2.3}$ ,  $P_{2.4}$ ,  $P_{9.1}$ ,  $P_{9.4}$ ,  $P_{9.3}$ ,  $P_{9.2}$ ,  $P_{3.1}$ ,  $P_{3.3}$ ,  $P_{3.2}$ ,  $P_{1.3}$ ,  $P_{4.1}$ ,  $P_{4.3}$ ,  $P_{4.4}$ ,  $P_{10.1}$ ,  $P_{10.4}$ ,  $P_{10.3}$ ,  $P_{5.1}$ ,  $P_{5.2}$ ,  $P_{5.3}$ ,  $P_{15.1}$ ,  $P_{15.2}$ ,  $P_{15.4}$ ,  $P_{11.4}$ ,  $P_{11.3}$ ,  $P_{6.1}$ ,  $P_{6.2}$ ,  $P_{6.3}$ ,  $P_{14.1}$ ,  $P_{14.2}$ ,  $P_{14.3}$ ,  $P_{14.4}$ ,  $P_{16.1}$ ,  $P_{16.4}$ ,  $P_{16.3}$ ,  $P_{7.1}$ ,  $P_{7.3}$ ,  $P_{7.4}$ 까지 전압값이  $E/2$ 보다 크고 부하 전류가 흐르나  $P_{13.1}$ 에서 전압값이  $E/2$ 보다 작고 부하전류가 흐르지 않으므로 고장구간 결정 전략 RL 12]에 의해 A3지역이 HIF나 단선 사고지역임을 확인할 수 있다.

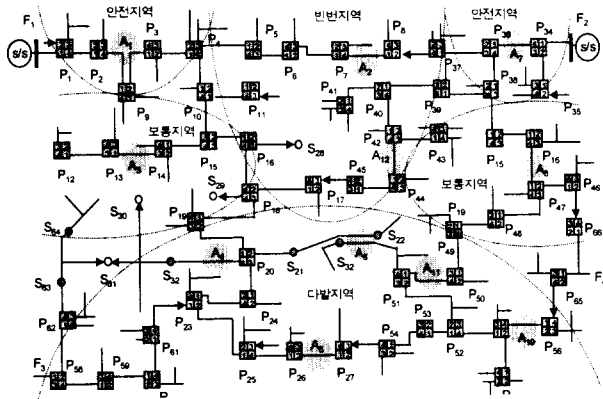


그림 5 성능평가를 위한 시험 배전계통  
Fig. 5 Distribution system for performance evaluation

모의 2)  $F_2$ 의 모선사고(CB[ON],  $P_{8.2}$ 의  $V_e=100V$ ,  $V_{CB}=100V$ ,  $FI_{CB}$ [고장미감지])

경보처리 모듈은  $P_{8.2}$ 의  $F_2$ 측에 대한  $V_e < E/2$ 이므로 RL 1]에 의해선로사고가 발생했음을 확인한다. 다음, CB가 투입상태이고 CB단의 전압  $V_{CB} < E/2$ , CB의 고장 감지기 상태  $FI_{CB}$ 가 고장전류 미감지상태이므로 RL 9]에 의해 모선사고임을 확인할 수 있으며, RL 13]에 의해 사고위치가 CB의 전원단인 모선측에서 발생했음을 확인할 수 있다.

모의 3)  $F_2$ 의  $A_{12}$ 지역 단일사고(CB[ON],  $P_{36.4}$ 의  $V_e=50V$ ,  $V_{CB}=50V$ ,  $FI_{CB}$ [고장감지])

경보처리 모듈은  $P_{36.4}$ 의  $F_2$ 측에 대한  $V_e < E/2$ 이므로 RL 1]에 의해선로사고가 발생했음을 확인한다. 다음, CB가 투입상태이고 CB단의 전압  $V_{CB} < E/2$ , CB의 고장 감지기 상태  $FI_{CB}$ 가 고장전류 감지상태이므로 RL 8]에 의해 계전기 부동작 상황하의 선로사고임을 확인할 수 있다. 따라서, 전원단에서 부하단까지의 고장 감지기 상태를 탐색하게 되는데, CB,  $P_{34.1}$ ,  $P_{34.4}$ ,  $P_{36.1}$ ,  $P_{36.4}$ ,  $P_{38.1}$ ,  $P_{38.3}$ ,  $P_{15.1}$ ,  $P_{15.2}$ ,  $P_{16.1}$ ,  $P_{16.4}$ , 까지의 전원공급경로상의 개폐기들에 상의 FI상태가 고장감지상태를 보이는 반면  $P_{47.1}$ 부터 부하단의 모든 개폐기들에 대한 FI상태들이 고장 미감지상태를 보이므로 RL 14]에 의해 사고지역이  $A_{12}$ 지역임을 확인할 수 있다.

모의 4)  $F_1$ 의  $A_1$ 지역 단일사고(CB[OFF],  $V_e=1500V$ ,

$P_{9.1}, P_{13.1}, S_{32}, P_{27.1}$  고장미감지)

경보처리 모듈은  $P_{27.3}$ 의  $F_2$ 측에 대한  $V_e < E/2$ 이므로 RL 1]에 의해선로사고가 발생했음을 확인하며, CB가 개방상태이므로 RL 2]에 의해 선로사고임을 확인한다. 다음,  $F_1$ 의 상의 모든 고장 감지기들의 상태를 수집하여 사고후보지역을 탐색하게 되는데, 4개의 개폐기들 공급경로상에서  $P_{2.4}$ ,  $P_{14.3}$ ,  $P_{20.4}$ ,  $P_{26.2}$ 상의 FI 상태가 고장전류 미감지 상태를 보여 사고후보지역 그룹이  $\{A_1, A_3\}$ ,  $\{A_1, A_4\}$ ,  $\{A_1, A_5\}$ 로 결정되므로 경보처리 전략 RL 11]에 의해 다중선로사고로 가정된다. 이때, 다중사고 탐색모드로 추론하게 되면, HR 2]에 의해 선택 우선순위가  $\{A_1, A_5\}$ ,  $\{A_1, A_4\}$ ,  $\{A_1, A_3\}$ 으로 결정되며, 각 후보들에 대한 사고확률이 아래와 같이 계산되므로 HR 3]에 의해  $\{A_5, A_1\}$ ,  $\{A_4, A_1\}$ ,  $\{A_3, A_1\}$ 으로 우선순위가 결정된다.

$$p(A_1) = \frac{0.8^5 \times 0.2^0 \times 0.8^{77} \times 0.2^{27} \times 0.1}{\Delta} = 1.42 \times 10^{-14}$$

$$p(A_3) = \frac{0.8^{16} \times 0.2^1 \times 0.8^{74} \times 0.2^{18} \times 0.2}{\Delta} = 1.86 \times 10^{-9}$$

$$p(A_4) = \frac{0.8^{22} \times 0.2^1 \times 0.8^{74} \times 0.2^{12} \times 0.4}{\Delta} = 1.82 \times 10^{-5}$$

$$p(A_5) = \frac{0.8^{29} \times 0.2^1 \times 0.8^{75} \times 0.2^4 \times 0.4}{\Delta} = 0.9998$$

$$\begin{aligned} \Delta = & (0.8^5 \times 0.2^0 \times 0.8^{77} \times 0.2^{27} \times 0.1) \\ & + (0.8^{16} \times 0.2^1 \times 0.8^{74} \times 0.2^{18} \times 0.2) \\ & + (0.8^{22} \times 0.2^1 \times 0.8^{74} \times 0.2^{12} \times 0.4) \\ & + (0.8^{30} \times 0.2^1 \times 0.8^{74} \times 0.2^4 \times 0.4) \end{aligned}$$

다음, 우선순위에 근거하여 부하지역  $A_5$ 를 사고지역을 가정하고  $P_{26.2}$ 를 개방하여 고장구간을 분리한 후 CB를 재투입한다. 다음, CB상태를 감시하여 재투입 성공여부를 확인하게 되는데, 부하지역  $A_1$ 을 사고구간으로 모의하였으므로 CB는 재개방상태가 된다. 따라서, 부하지역  $A_5$ 의 전원 공급 경로상에 사고구간이 존재할 것이므로 HR 4]보다 우선순위가 높은 HR 1]에 의해 부하지역  $A_1$ 이 새로운 사고지역으로 추론된다. 그리고,  $P_{2.4}$ 를 개방하여 고장구간을 분리한 후 CB를 재투입한다. 다음, CB상태를 감시, 재투입 성공여부를 확인하는데, CB 상태가 투입상태이므로 최종적으로 사고구간이 부하지역  $A_5$ 임을 확인할 수 있다. 그러나, 본 모의는 임의적으로 사고지역을  $A_5$ 로 가정한 경우이므로 실제적으로는 확률값상 부하지역  $A_1$ 이 사고지역으로 확인될 가능성이 높다.

## 6. 결론

본 연구에서는 불확실성을 포함하는 배전 SCADA 정보로부터 배전선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트가 발생할 때 신속하고 정확한 사고유형 인식 및 고장구간 진단을 지원할 수 있는 전문가 시스템을 제안하였다. 전문가 시스템은 고저항 지락사고나 선로탈락사고, 단락, 지락사고 등 다양한 이벤트들을 처리할 수 있도록 설계되었는데, 특히, 고저항 지락사고나 선로탈락에 대한 고장구간 추적이 가능하도록 연계점 상의 개폐기들에 대한 전압 감시 메카니즘을 도입하였

다. 또한, 고장구간 추정 신뢰도를 높이기 위해 수집된 고장전류 데이터로부터 고장거리를 추정하여 고장구간을 확인하는 휴리스틱이 채택되었으며, 시스템 운영자들이 사고구간 진단 과정에서 당황하여 일으킬 수 있는 사고파급효과를 최소화하기 위해 진단절차가 자동으로 이루어지도록 설계하였다. 전문가 시스템은 고저항 지락사고, 단선사고, 모선사고 또는 불확실성을 가지는 FI정보를 포함하는 지락사고등 수개의 시뮬레이션 결과에서 신속하고 정확한 추론결과를 보임으로써 그 유효성을 입증하였다. 끝으로, 본 전문가 시스템이 배전 SCADA 시스템의 유용성을 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음

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] Kim, H., Y. S. Ko, and K. H. Jung, "Algorithm of Transferring the Load of the Faulted Substation Transformer using the Best-First Search Method," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 3, pp. 1434-1442, July 1992.

[3] Kim, H., Y. S. Ko, and K. H. Jung, "Artificial Neural-Net Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 3, pp. 1356-1366, July 1993.

[4] Jung, K. H., H. Kim, Y. S. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm for Automated Distribution Systems based on Artificial Intelligence Approach," IEEE PWRD WM-93 Feb. 1993.

[5] 고윤석, 김호용, "인공지능기법을 이용한 배전자동화시스템의 종합제어전략 수립지원 소프트웨어의 개발", 전기학회논문지, Vol. 44, No. 5, pp. 563-573, 1995년 5월.

[6] 고윤석, 김호용외 2인, "인공신경회로망의 LDC 변수 동적이동능력을 이용한 실시간 ULTC 제어전략", 전기통신학회논문지, Vol. 21 No. 2, pp. 541-550 1996년 2월.

[7] 고윤석, 이기서, "배전 SCADA 시스템의 부하분담 균등화 및 선로손실 저감화 타스크를 위한 실시간 전문가 시스템의 구현", 전기학회논문지, Vol. 44, No. 11, pp. 1423-1429, 1995년 11월.

[8] 고윤석, 김호용, 장정태, 하복남외 2인, "효율적 휴리스틱에 근거한 실시간 배전 SCADA 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 46, No. 4, pp. 461-467, 1997년.

[9] Jarventausta, P., P. Verho, I. Partanen, "Using Fuzzy Sets to Model the Uncertainty in the Fault Location

Process of Distribution Networks", IEEE Trnas. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 954-60, April 1994.

[10] 고윤석, 이호정, "불확실성을 가지는 배전 SCADA 정보로부터 확률론과 휴리스틱 탐색법을 이용한 고장 구간 확인 알고리즘 개발", 전기학회 논문지, Vol. 48, No. 12, pp. 1423-1248, 1998년 12월.

저 자 소 개



고 윤 석(高 鈞 錫)

1984년 광운대 공대 전기공학과 졸업  
 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공박)  
 1986년-1996년 한국전기연구소 선임연구원  
 1996년-1997년 포스코경영연구소 연구위원  
 1997년-현재 남서울 대학교 전자공학과 조교수  
 Tel : (0417) 580-2115, Fax : (0417) 582-2117



신 덕 호(辛 德 浩)

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업  
 1998년 8월-현재 광운대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정



신 현 용(申 鉉 龍)

1979년 연세대학교 전기공학과 졸업  
 1987년 루이지애나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(공박)  
 1994년 -현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 부교수



이 기 서(李 基 西)

1977년 연세대 공대 전기공학과 졸업  
 1979년 동대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(공박)  
 1988년-1989년 Yale University 교환교수  
 1981년-현재 광운대 공대 제어계측공학과 교수