

A Study on the Fault Diagnosis Expert System for 765kV Substations

이 흥 재* · 강 현 재*
(Heung-Jae Lee · Hyun-Jae Kang)

Abstract - This paper presents a fault diagnosis expert system for 765kV substation. The proposed system includes the topology processor and intelligent alarm processing subsystems. This expert system estimates the fault section through the inference process using heuristic knowledge and the output of topology processor and intelligent alarm processing system. The rule-base of this expert system is composed of basic rules suggested by Korea Electric Power Corporation and heuristic rules. This expert system is developed using PROLOG language. Also, user friendly Graphic User Interface is developed using visual basic programming in the windows XP environment. The proposed expert system showed a promising performance through the several case studies.

Key Words : Fault Diagnosis, Expert System, Inference Process

1. 서 론

1970년대초 지식 공학의 태동 이후 지난 30년간 일본 및 구미 선진국에서는 전력계통에 지능형 정보처리, 고장진단, 지능형 복구지원 시스템 등 전문가의 경험적 지식과 연역적 지식을 근간으로 하는 다양한 응용 연구를 오래전부터 시행하여 왔으며, 이미 실계통에서의 검증단계를 거쳐 현장에서 운용되고 있다.

또한 국내에서도 이에 대한 필요성을 절감하여 지난 20년간 154kV급 배전 변전소를 대상으로 변전 자동화 시스템에 대한 다각적인 연구[8-11]를 수행하여 현재까지 약 80 여편의 논문이 발표된 바 있다. 그러나 이중모선-이중CB(Double bus-Double Breaker structure)방식을 채용하고 방사상으로 운용하는 154kV급 배전 변전소와는 달리 765kV급 초고압 변전소는 1.5CB 비교차 인출 방식을 사용하며, 모든 CB를 투입하여 환상형 구조로 운용되고 있다. 또한, 각 상에 대해 2탱크로 구성되어 있어 변압기간의 순환 전류에 대해 동작하는 보호 계전기 및 모든 변전기기에 대해 후보호를 이중으로 하는 등 보호시스템의 구조도 154kV 변전소의 시스템과 현격한 차이가 있다.

변전소의 고장진단 시스템에 관한 지금까지 해외의 연구로서는 1991년 그리스에서 SCADA와 on-line으로 연계해서 사고진단과 복구방안을 도출하는 전문가 시스템[1]을 발표하

였고, 1993년 미국에서 이중모선 1.5CB 방식의 송전 변전소를 대상으로 사고감지와 고장진단을 수행할 수 있는 전문가 시스템[2]을 개발하였다. 1993년 영국에서는 중앙급전센터에서 수행되던 업무들이 주요 송전 변전소에서 분산된 형태로 수행되는 지능형 변전소[3]를 제안하였으며, 1995년 일본에서는 탐지 기능에 의한 추론을 수행하는 고장진단 전문가 시스템[4]을 발표하였다. 이 시스템은 토호쿠지역 전력회사에 설치되어 운용되고 있으며, 운용자와 엔지니어 교육을 위하여 사용될 수 있다. 또한 2005년 중국에서는 BNF 규칙을 정보처리와 고장진단에 접목시킨 시스템[6], 다중 에이전트 기반의 다계층 분산 정보처리와 고장진단 시스템[7]이 발표된 바 있다.

본 논문에서는 765kV 초고압 변전소의 고장진단을 위한 전문가 시스템을 제안하였다. 제안된 고장진단 전문가 시스템은 전처리 프로세서로써 지능적 정보처리 시스템과 토폴로지 프로세서를 부시스템으로 포함하고 있다. 본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 토폴로지 프로세서를 이용하여 실시간으로 변전소의 위상구조를 인식하고, 지능형 정보처리 시스템이 선별한 보호계전기와 차단기의 정보집합을 이용하여 고장이 발생한 변전기기를 판별하도록 구성하였다. 제안된 전문가 시스템은 인공지능 언어인 PROLOG를 이용하여 개발하였으며, PROLOG 언어에서 기본적으로 제공하는 후방향 추론방식과 깊이우선 탐색법을 사용하였다. 또한 고장진단 전문가 시스템의 실계통 운용에 대비하기 위하여 아날로그 데이터와 디지털 데이터를 상시 모니터링 할 수 있고, 사고발생시 사고 상황과 진단 결과를 출력할 수 있는 GUI 환경을 개발하였으며, GUI 환경 개발은 비주얼 베이직을 이용하였다.

* 교신저자, 시니어회원 : 광운대 공대 전기공학과 교수 · 공학
E-mail : hjlee@kw.ac.kr

* 정 회 원 : 광운대 공대 전기공학과 박사과정
접수일자 : 2009년 4월 15일
최종완료 : 2009년 4월 23일

2. 고장진단 전문가 시스템 구성

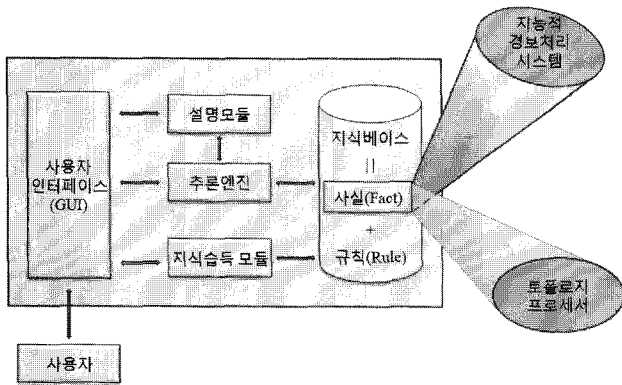


그림 1 전문가 시스템의 구조
Fig. 1 Structure of expert system

그림 1은 본 논문에서 제시하는 고장진단 전문가 시스템의 전체 구조를 표시하고 있다. 본 시스템은 전처리 프로세서로써 토폴로지 프로세서와 지능형 정보처리 시스템을 포함하고 있다. 토폴로지 프로세서는 765kV 변전소의 위상구조를 효율적으로 인식하기 위한 기능 모듈이며, 지능형 정보처리 시스템은 사고발생시 다량의 경보를 효과적으로 선별하고 압축하여 고장진단에 필요한 정보집합을 생성하는 부시스템이다. 이들 전처리 프로세서의 수행결과는 고장진단 시스템의 지식베이스에 사실(fact)로서 저장되며, 고장진단 시스템의 추론과정에서 이용 된다

추론기관(inference engine)은 지식베이스에 저장된 사실과 규칙을 이용하여 탐색과정을 거쳐 문제를 해결하는 부분으로 본 연구에서는 후방향 추론방식을 사용하였다.

GUI(Graphic User Interface)는 사용자와 고장진단 전문가 시스템을 연결시켜주는 부분이다. 본 논문에서는 그래픽 윈도우를 통하여 변전계통의 운영 상태를 도시하도록 하였으며, 사고가 발생하면 동작한 차단기 정보를 그래픽 윈도우에 출력하고, 입력된 경보와 고장진단 결과를 텍스트 윈도우에 출력하도록 구성하였다.

3. 문제의 표현과 규칙 베이스

변전기기에 사고가 발생하면, 보호계전기와 차단기가 동작하여 사고가 발생한 변전기기를 계통에서 분리시킨다. 그러나 보호기기들의 오동작 또는 부동작으로 인하여 차단구간은 점차 확대되어가고 심지어는 지역간의 계통분리 현상이 야기될 수도 있다.

765kV 변전소의 변전기기에 사고가 발생하면 보호계전기가 동작하고, 보호계전기의 동작으로 인하여 차단기가 트립된다. 그러나 차단실패 계전기(CB failure relay)는 차단기의 트립 여부를 감시하며, 차단기의 부동작이 발생할 경우 인근에 연결된 다수의 차단기를 트립시킨다. 따라서 차단실패 계전기의 동작원인은 차단기의 부동작이다.

이와 같이 보호기기들의 정동작, 오동작 및 부동작에 기인하여 하나의 사고에 대해서도 발생할 수 있는 정보집합의 경우의 수는 대단히 많으며, 위상구조가 복잡해짐에 따라 이

러한 현상은 더욱 심화되어 고장진단의 문제는 큐빅맞추기와 같이 조합적 문제(combinatorial problem)가 된다.

즉, 계통의 구성이 간단한 경우에는 각 요소의 고장시 발생할 수 있는 보호기기들의 모든 동작 패턴을 데이터베이스에 저장하면 가능하겠지만 실제의 계통에서는 그 경우의 수가 대단히 많기 때문에 데이터베이스에 저장하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이러한 고장의 유형 파악은 고장가능요소와 인과관계에 의해 표현된 규칙들에 의하여 가능한 패턴을 발생시키고 이를 동작된 보호기기들과 비교하여 추론하는 것이 타당하며, 실제로 동종의 연구에서 사례기반의 전문가 시스템(case based expert system)은 거의 성공하지 못했다. 본 연구에서는 이러한 고장진단의 문제를 문제축약 기법(Problem reduction technique or AND-OR Tree method)으로 모델링하였다.

다음 그림 2는 사고와 보호기기들의 인과관계를 도시하고 있으며 원호(arc)로 표시된 부분은 AND 관계를 나타낸다.

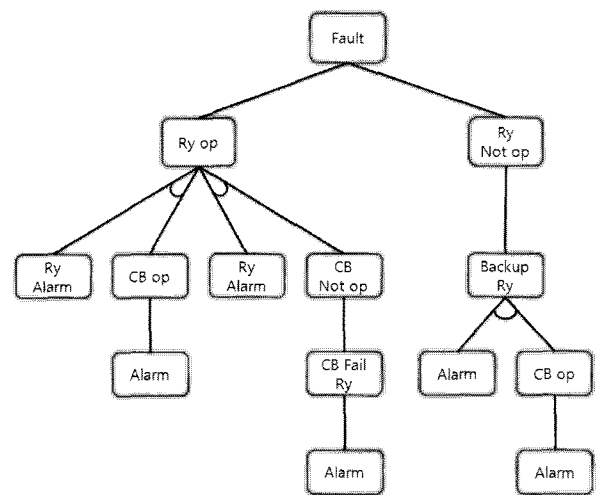


그림 2 인과관계의 표현
Fig. 2 The representation of causal relationship

본 논문의 규칙베이스에 저장된 규칙의 종류는 다음과 같이 대별할 수 있다.

- 1) 고장 기기 추론을 위한 규칙
- 2) 해의 설명을 위한 규칙
- 3) 오동작, 부동작 기기의 판별을 위한 규칙

본 논문에서는 그림 2의 인과관계를 기반으로 고장 기기 추론을 위한 규칙을 구축하였으며, 구축한 고장진단 규칙을 일부 예시하면 다음과 같다. 다음 그림 3은 차단실패 계전기의 동작특성을 도시하고 있다.

765kV 모선에 연결된 차단기의 차단실패 계전기는 2계열로 구성되어 있다. 71계열 차단기의 차단실패 계전기는 71계열 차단기와 연결된 00계열 차단기와 765kV #1 모선에 연결된 모든 차단기를 트립시키고, 인근 변전소로 트립 신호를 송출한다. 72계열 차단기에 부동작이 발생할 경우 차단실패 계전기는 72계열 차단기와 연결된 00계열 차단기 및 765kV #2 모선에 연결된 모든 차단기를 트립시키며, 부동작

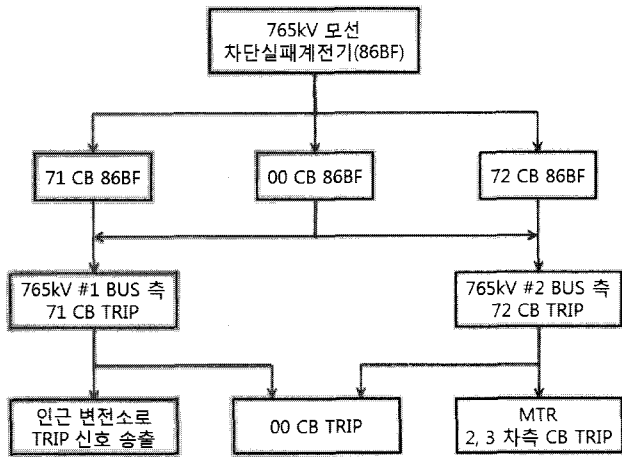


그림 3 차단실패 계전기의 동작 특성
Fig. 3 The operation of CB failure relay

한 차단기와 연결된 변압기의 2, 3차측 차단기를 트립시킨다. 그리고 00계열 차단기의 차단실패 계전기는 00계열 차단기와 연결된 71계열 및 72계열 차단기를 트립시키고, 변압기 2, 3차측의 차단기를 트립시키며, 인근 변전소로 트립 신호를 송출한다.

본 논문에서 개발한 차단실패 계전기의 동작특성을 언어적 규칙으로 표현하면 다음과 같다.

- 규칙 1 : 71계열 차단 실패 계전기가 동작하고 765kV #1 모선에 연결된 모든 차단기와 00계열 차단기가 동작하면 71계열 차단기는 부동작이다.
- 규칙 2 : 72계열 차단 실패 계전기가 동작하고 765kV #2 모선에 연결된 모든 차단기와 00계열 차단기 및 변압기 2, 3차측 차단기가 동작하면 72계열 차단기는 부동작이다.
- 규칙 3 : 00계열 차단 실패 계전기가 동작하고 765kV #1 모선에 연결된 71계열 차단기와 765kV #2 모선에 연결된 72계열 차단기 그리고 변압기 2, 3차측 차단기가 동작하면 00계열 차단기는 부동작이다.
- 규칙 4 : 1계열 차단실패 계전기와 2계열 차단실패 계전기 중에서 특정 계열의 계전기만 동작하면 차단기는 부동작이다.(동작하지 않은 계열의 차단실패 계전기 부동작)
- 규칙 5 : 차단실패 계전기가 감시하는 계전기가 동작하고, 1, 2계열 차단실패 계전기가 동작하면 차단실패 계전기는 부동작이다.

4. 추론 및 탐색

고장진단은 보호계전기와 차단기의 동작정보를 기반으로 사고가 발생한 위치, 종류를 추정하고 보호계전기와 차단기의 오동작, 부동작 상태를 판정하며, 사고에 의한 보호기들의 동작과정을 설명하는 것이다. 본 연구에서는 PROLOG 언어가 기본적으로 제공하는 후방향 추론방식을 사용하였으며, 1단계 부목표 선택 과정에서는 전방향 추론 방식을 병행

하여 사용함으로써 전체적인 전문가 시스템의 효율향상을 모색하였다.

본 시스템은 패턴의 대응(pattern match)으로부터 보호기기의 동작상태와 고장요소가 추정되며 텍스트 윈도우로 추정된 사고의 종류, 사고구간의 위치, 그에 따른 보호기기의 동작과정을 표시하도록 하였다. 이상의 전체적인 추론과정의 흐름도는 다음 그림 4와 같으며 흐름도의 각 부분을 부목표로 지정함으로써 각각의 세부 추론과정과 전체적인 추론과정은 후방향 추론방식으로 수행하도록 하였다.

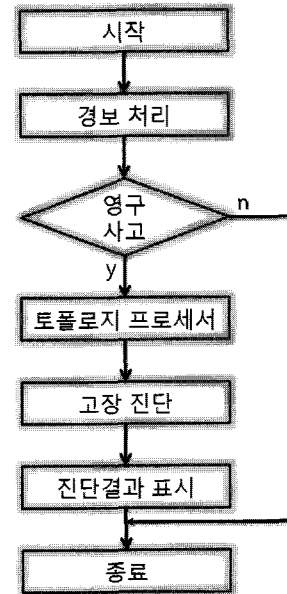


그림 4 변전소 고장진단 절차도
Fig. 4 Flow chart of the fault diagnosis

그림 4에서 경보처리 블록은 전처리기로 포함된 지능형 경보처리 시스템이 동작하는 부분으로서 사고가 발생할 경우 중앙감시제어 시스템에 입력되는 방대한 정보 중에서 고장진단 과정에서 사용할 정보 집합을 필터링하는 블록이다.

사고의 유형을 크게 순시사고와 영구사고로 분류할 수 있다. 즉 사고가 순간적으로 발생하였다가 다시 정상으로 운전 가능한 사고와 수리반이 수리를 해야 하는 사고이다. 현재 국내에서는 재폐로 계전방식을 적용하고 있어, 순시사고로 인하여 계통으로부터 분리되면 재폐로 계전기가 동작하여 다시 정상운전을 할 수 있도록 한다. 따라서 재폐로 계전기가 동작하여 재폐로에 성공했을 경우 고장진단을 수행하는 것은 의미가 별로 없다. 따라서 영구사고 유무를 판단하는 블록은 이와 같이 재폐로가 성공한 순시사고일 경우에는 고장진단을 수행하지 않고 영구사고일 경우에만 진단을 수행하기 위한 블록이다.

토폴로지 프로세서 블록은 전처리 프로세서인 토폴로지 프로세서가 동작하는 부분으로 차단기, 단로기의 현재 상태를 입력받아 변전소의 위상구조를 실시간으로 인식하기 위한 블록이며 고장진단 시스템의 성능향상을 위하여 대단히 중요한 블록으로 별도의 논문으로 발표하였다.

전문가 시스템에서는 문제를 일단 표현모델(representation model)로 기술한 후 추론기관에서 규칙에 의해서 생성되는 상태공간에서의 탐색을 수행해야 한다. 본 연구에서는 해를 구할 때까지 종적으로 경로를 탐색하여 나가는 방법으로서 언제나 확실한 해를 구할 수 있는 깊이우선 탐색방법을 사용하였다.

5. 사례 연구

본 논문에서 개발한 고장진단 전문가 시스템의 성능을 검증하기 위하여 765kV 신가평 변전소를 대상으로 사례 연구를 수행하였다.

고장진단 전문가 시스템의 입력은 계전기 및 차단기의 동작 정보이다. 사고가 발생하고 중앙감시제어 시스템으로부터 입력된 방대한 양의 경보는 경보처리 시스템에서 필터링되고, 고장진단에 필요한 계전기와 차단기의 동작 정보는 PROLOG 언어의 술어 형식으로 전문가 시스템의 지식 베이스에 저장된다.

사례 1은 신태백 #1 송전선로 A상에서 사고가 발생한 경우이다. 신태백 #1 송전선로의 사고에 대하여 중앙감시제어 시스템은 방대한 양의 경보를 발생시켰고, 경보처리 시스템은 이러한 경보 중에서 보호계전기 동작 정보와 스위치 동작 정보를 필터링 하였다. 다음은 경보처리 시스템이 필터링하여 고장진단 전문가 시스템의 지식베이스에 저장한 경보 집합이다.

<계전기 및 차단기 동작 정보>

```
alarm(tl_diff("신태백1",765,1)).
alarm(r86bf("8400",1)).
alarm(r86bf("8400",2)).
alarm(cb("8471",t,off)).
alarm(cb("8471",a,off)).
alarm(cb("8472",t,off)).
alarm(cb("8472",a,off)).
alarm(cb("4389",t,off)).
alarm(cb("4589",t,off)).
alarm(cb("7771",t,off)).
alarm(cb("7700",t,off)).
```

위에서 보는 바와 같이 지능형 경보처리 시스템은 3개의 보호계전기 동작 정보와 8개의 차단기 동작 정보를 생성하였다. 다음 그림 5는 제안된 전문가 시스템의 GUI 화면이며, 동작한 차단기의 동작 정보를 표시하고 있다. 그림 상에서 붉은 색으로 표시된 부분이 동작한 차단기의 정보이다.

다음은 고장진단 전문가 시스템이 텍스트 윈도우를 이용하여 출력한 고장진단 결과이고, 그림 6은 사고에 대한 경보처리 결과와 고장진단 결과를 텍스트 윈도우를 이용하여 사용자에게 제시하는 GUI의 동작 화면이다.

<고장진단 결과>

```
#신태백1 765kV T/L 1계열 주보호 동작
#8400 차단기 B/F 1계열 동작
#8400 차단기 B/F 2계열 동작
```

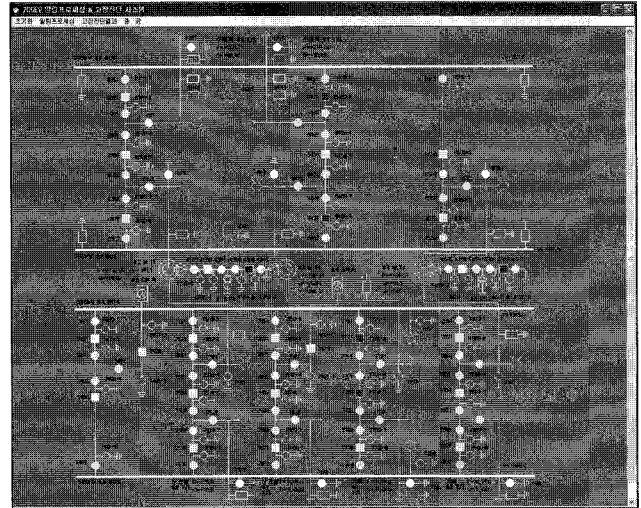


그림 5 GUI의 그래픽 윈도우
Fig. 5 Graphic window of GUI

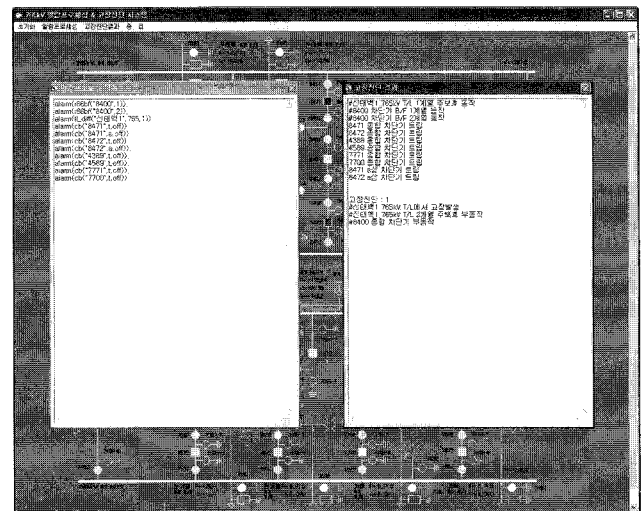


그림 6 고장진단 결과 표시 화면
Fig. 6 Display the result of fault diagnosis

- 8472 종합 차단기 트립
- 4389 종합 차단기 트립
- 4589 종합 차단기 트립
- 7771 종합 차단기 트립
- 7700 종합 차단기 트립
- 8471 a상 차단기 트립
- 8472 a상 차단기 트립

```
고장진단 : 1
#신태백1 765kV T/L에서 고장발생
#신태백1 765kV T/L 2계열 주보호 부동작
#8400 종합 차단기 부동작
```

위에서 보는 바와 같이 신태백 #1 송전선로에서 사고가 발생하였고 송전선로 1계열 주보호 계전기가 동작하여 8400, 8471 차단기를 트립시켰으며, 이 과정에서 2계열 주보호는

부동작 하였다. 그러나 8400 차단기의 부동작으로 인하여 1, 2계열 8400 차단기 차단실패 계전기의 동작으로 #3 변압기 2차측의 7771, 7700 차단기와 3차측의 4389, 4589 차단기가 동작한 경우로 추론하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 765kV 초고압 변전소의 고장진단을 위한 전문가 시스템을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 토폴로지 프로세서를 이용하여 실시간으로 변전소의 위상구조를 인식하고, 지능형 경보처리 시스템이 선별한 보호계전기와 차단기의 경보집합을 기반으로 추론과정을 통하여 고장이 발생한 변전기기를 판별하도록 하였다. 제안된 전문가 시스템은 인공지능 언어인 PROLOG를 이용하여 개발하였다. 또한 아날로그 데이터와 디지털 데이터를 상시 모니터링 할 수 있는 GUI 환경을 개발하였으며, GUI 환경 개발은 비주얼 베이직을 이용하였다. 본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 시뮬레이션을 통하여 실제통 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 765kV 초고압 변전소의 지능적 자동화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 광운대학교 교내학술연구비의 일부 지원과 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-137)주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] C.A. Protopapas, K.P. Psaltiras, A.V. Machias, "An Expert System for Substation Fault Diagnosis and Alarm Processing," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 6, No. 2, pp 648-655, 1991.

[2] M. Kezunovic, Predrag Spasojevic, C.W. Fromen, D.R. Sevcik, "An Expert System for Transmission Substation Event Analysis," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 4, pp. 1942-1349, 1993.

[3] C. Booth, "Enhanced Power System Control and Management via Intelligent Substations," Advances in Power System Control Operation and Management, APSCOM-93, 2nd International Conference on, Vol. 2, pp 542-547, 1993.

[4] T. Minakawa et al., "Development and Implementation of A Power System Fault Diagnosis Expert System," IEEE Trans. on PWRS, Vol. 10, No. 2, pp 932-940, 1995.

[5] S.D.J. McAuthur et al., "Knowledge and Moel Based Decision Support for Power System Protection Engineers," ISAP'96, Internation Conference on pp 215-219, 1996

[6] W.Zhao, X.Bai et al., "A Nevel Alarm Processing and Fault Diagnosis Expert System Based on BNF Rules," 2005 IEEE/PES Transmission and

Distribution Conference & Exhibition, pp 1-6, 2005

[7] W.Zhao, X.Bai et al., "A Multilayer and Distributed Alarm Processing and Fault Diagnosis System Based on Multiagent," 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, pp 1-6, 2005

[8] Heung-Jae Lee, Young-Moon Park, A Restoration Aid Expert System for Distribution Substations, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 4, pp 1765-1770, 1996.

[9] Heung-Jae Lee, Deung-Yong Park, Bok-Shin Ahn, Dealing Uncertainties in the Fault Diagnosis of Power Systems, Engineering Intelligent Systems, Vol. 7, No. 4, pp 169-176, 1999. 12.

[10] Heung-Jae Lee, Bok-Shin Ahn, Young-Moon Park, A fault diagnosis expert system for distribution substations, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 15, No. 1, pp 92 - 97, 2000. 1.

[11] Heung-Jae Lee, S. S. Venkata, "An advanced fault diagnosis system & SCADA simulator", Engineering Intelligent Systems, Vol. 8, No. 1, pp 39 - 43, 2000. 3.

[12] Heung-Jae Lee, D. Y. Park, B. S. Ahn, Y. M. Park, J. K. Park, S. S. Venkata, "A Fuzzy Expert System for the Integrated Fault Diagnosis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 15, No. 2, pp 833 - 838, 2000. 4.

저 자 소 개



이 흥 재 (李興載)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수

Tel : 02-940-5147

Fax : 02-918-3877

E-mail : hjlee@kw.ac.kr



강 현 재 (姜賢在)

1962년 11월 12일생. 1981년 수도전기공고 졸업/한국전력 입사, 1989년 부산외국어대 영어과 졸업, 1996년 광운대 산업정보대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 광운대 대학원 전기공학과 박사과정, 한국전력공사 부장.

Tel : 042-717-4540

Fax : 042-717-4559

E-mail : khj62@kepco.co.kr