

변전소 고장진단을 위한 전문가 시스템

(An Expert System for Fault Diagnosis in a Substation)

朴永文* · 崔勉頌** · 金光源** · 玄升鎬**

(Young-Moon Park · Myeon-Song Choi · Gwang-Won Kim · Seung-Ho Hyun)

요 약

본 논문에서는 변전소의 변전설비에 대한 고장진단을 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 제안된 전문가 시스템에서는 변전소의 구조적 특성을 효과적으로 이용하기 위하여 두 종류의 새로운 자료구조를 제안하였다. 먼저 설비 연결자료로, 이는 변전소의 수전단에서 배전단으로 이어지는 계층적 구조를 이용하여 소내 설비들의 전기적 연결상태 인식을 효과적으로 수행할 수 있도록 한다. 다음으로, 각 보호 계전기의 보호 영역 자료를 제안하였는데, 이 것은 전문가 시스템 가동시에 자동으로 구성되며, 보호계전기의 주보호 설비 뿐만 아니라 후비보호와 2차 후비보호 등의 설비들을 탐색하여 자료구조에 포함함으로써 추론의 효율을 높였다. 본 전문가 시스템에서는 2단계 추론을 수행하는데, 1단계에서는 설비 연결자료와 보호영역 자료를 이용하여 고장 후보들을 선정하고, 2단계에서는 보호기기 동작간의 인과관계를 이용하여 고장 위치를 파악하고 동작한 보호기기들에 대한 설명을 하도록 하였다. 제안한 전문가 시스템은 실제 154[kV]급 변전소 모형에 적용하여 도출된 결과의 타당성과 수행시간의 실효성을 보였다.

Key Word: 변전설비 고장진단 전문가 시스템, 설비연결 자료, 보호영역 자료, 2단계 추론

Abstract

This paper presents an expert system for fault diagnosis in a substation. Two kinds of data structure, in this paper, are proposed to deal with the structural characteristics of a substation in an efficient manner. One is named as Device-Connection data by which the connection of devices in a substation is represented with the hierarchical structure considered. The other is Protection-Area data which contains not only the primary protected devices but the secondary and third group of protected devices. The inference, in this paper, is performed in two steps. Firstly, the fault candidates are selected from the forward chaining using the Device-Connection data and Protection-Area data. In the second step, by using the cause-and-effect relations, malfunction of protection devices operated or non-operation are explained for each candidate faults by backward chaining. The proposed expert system is applied to 154kV substation model to show its effectiveness.

*正會員: 서울대학교 공과대학 전기공학과 교수
接受日字: 1995年 9月 5日

**正會員: 서울대학교 공과대학 전기공학과 박사과정

1. 서 론

최근 전력 공급의 안정성과 신뢰도 향상을 위하여 변전소의 무인화가 진행되고 있으며, 이에 따라 변전소내 변전설비에 대한 감시 및 제어의 자동화가 절실히 요구되고 있다. 현재 운용되고 있는 전력계통 감시 및 제어 시스템은 EMS와 SCADA 시스템을 근간으로 하고 있으며 이를 통하여 전력계통의 상태를 감시하고 부분적인 제어가 이루어지고 있다¹⁰⁾. 그러나 154[kV]급 변전소 관내의 고장진단과 정전복구는 위에 언급한 감시 시스템으로부터 획득한 정보를 통하여 현장계통 운용자에 의하여 이루어지고 있으며, 전력계통의 특성상 계통 운용자의 경험적 판단에 크게 의존할 수 밖에 없는 실정이다. 그런데, 전력 수요의 증가로 인하여 전력계통의 규모가 날로 확대하고 있고 전력 공급의 신뢰성 향상을 위한 각종 설비들이 확대 적용되어감에 따라 전문가의 경험에 의존하는 것이 점차 어려워지고 있으며, 특히, 정년퇴직 등의 이유로 풍부한 경험을 갖는 숙련된 현장 전문가의 수는 감소하고 있는 반면, 전력계통의 신뢰도 향상으로 인하여 현장 운용자가 풍부한 고장경험을 가질 수 있는 기회는 감소일로에 있다. 따라서, 이에 대한 대책으로서 인공지능을 이용한 고장진단, 또는 정전복구 시스템에 관한 연구가 주목받게 되었다.^{1~12)}

전력계통의 고장진단 문제를 인공지능의 한 가지인 전문가 시스템을 이용하여 해결하고자 하는 노력은 1980년대 중반 일본과 미국을 중심으로 시작되었고^{11), 5)} 최근 국내에서도 수준 높은 연구결과들이 발표되었다.^{11), 15)} 그중, 단위 변전소의 고장진단 시스템에 대한 기존의 연구를 살펴보면, 가장 초보적인 형태로, 유인 변전소에서 운용자와 대화를 통한 진단방식이 제안되었으며⁶⁾, 일본의 몇몇 전력회사에서는 무인 변전소를 대상으로 하는 고장진단 시스템이 개발되어 현재 실험운용 중인 것으로 알려져 있다.^{4~7)} 그러나 이들은 변전소의 구조적 특성이나 고장진단추론의 효율성이 충분히 고려되지 않은 것으로 사료되며 실제 발표된 실행시간이 실용적인 관점에서 많은 개선의 여지를 남기고 있는 것으로 판단된다. 일례로 4)

에 제시된 고장진단 시스템의 경우, 500[kV]급 변전소의 소내 고장진단을 위하여 약30초의 시간이 소요되는 것으로 보고 되었다. 한편, 국내의 경우 345[kV]급 전력소에서 관내 무인 변전소 고장진단 및 정전복구를 위한 전문가 시스템이 개발되었는데^{17~19)} 여기에 제시된 시스템은 국내 전력계통에 대한 정형(prototype)를 제시한 것으로 실행 효율이나 관리에 있어 외국을 포함한 기존의 연구들에 비해 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 18) 및 19)에 제시된 고장진단 시스템은 변전소의 구조적 특성을 효과적으로 이용하기 위한 자료구조를 제안하고 있으나, 고장 후보 선정시 후방향 추론을 이용하고 있어 변전소와 같이 매우 많은 설비를 갖고 있는 전력계통에 대해서는 효율을 증대시킬 수 있는 방법이 요구된다.

본 논문에서는 변전소내 변전설비의 단일고장에 대한 진단을 위한 전문가 시스템을 제안한다. 먼저 변전소의 계층구조를 효과적으로 이용할 수 있는 자료구조와 이를 생성하는 알고리즘을 제안하고, 제안된 계층구조자료를 이용하여 고장 후보들을 추론하고, 각 고장 후보에 대한 가능성을 보호기기의 오, 부동작 확률에 근거하여 산출하는 2단계의 추론방식을 제안한다. 그리고, 제안된 전문가 시스템을 실제 154[kV]급 변전소 모형에 적용하여 그 효율성을 밝힌다.

2. 자료 구조

변전설비의 효과적인 고장진단을 위해서는 효과적인 자료의 표현이 매우 중요하다. 본 장에서는 고장진단을 효과적으로 수행하기 위하여 제안된 자료구조에 대하여 설명한다.

2.1 입력자료구조

입력자료는 전문가 시스템이 기동되기 전에 사용자에게 의하여 미리 구축되어 전문가 시스템에 제공되는 기본적인 데이터베이스를 의미하며 여기에는 다음과 같은 것들이 있다.

i) 스위치 자료

변전소에 설치된 스위치들에 관한 정보를 저장하는 자료로서 다음과 같은 구조를 갖는다.

CB(id,ell,el2,status) : 차단기(Circuit Breaker)자료

LS(id,ell,el2,status) : 단로기(Line Switch)자료

여기서 id는 해당 스위치 고유번호, ell, el2는 이 스위치에 의하여 전기적으로 분리, 또는 연결되는 설비 이름이며, status는 해당 스위치의 온/오프 상태이다. 차단기와 단로기는 그 동작 원리만 다를 뿐 설비간의 전기적 연결을 결정하는 기능은 같다.

ii)계전기 자료

고장 위치 및 종류 후보 탐색에 가장 중요한 역할을 하는 자료이며 그 구조는 다음과 같다.

Ry(id, type, f-type, el, {cb_list})

여기서 id는 계전기 고유번호이고 type은 계전기의 종류로서 본 논문에서는 국내 154(kV)급 변전소의 운용 예를 기준으로 표1과 같은 계전기들을 고려하였다¹⁸⁾.

f-type은 해당 계전기가 동작하는 고장 종류를 의미하며 'g'는 지락을, 's'는 단락을 뜻한다. 그리고 el은 이 보호계전기가 설치된 위치로 이는 계전기의 주보호 설비와 일치하며, {cb_list}는 이 계전기가 동작했을 때 트립되어야 하는 차단기 집합이다.

이상의 자료들은 스위치 자료구조의 status항목을 제외하고 모두 본 전문가시스템 기동 전에 사용자가 미리 작성하여야 하는 자료이다.

2.2 생성 자료구조

생성자료는 본 전문가시스템이 기동하면 탐색을 통하여 스스로 생성하는 자료이다. 생성자료는 전문가시스템의 추론방식과 대상 시스템의 특성에 따라 결정되며 본 연구에서는 다음과 같은 자료구조를 제안한다.

표 1. 본논문에 고려된 계전기들의 type 정의

Table 1. Definition of protection relay type.

계전기 종류	type
거리계전기	dist
비율차동 계전기	diff
Lock-out계전기	hvy86
과전류 계전기	ocr
부호홀츠 계전기	96b2
충격, 압력 계전기	96p
방압변	press

i)설비 연결자료

고장진단을 위해서는 대상 계통의 전기적 연결구조를 파악하는 것이 필요하다. 154[kV]급 변전소는 송전선로-154[kV]모선-변압기-22.9[kV]모선-배전피더로 이루어지는 계층적 구조를 이루고 있다(그림 1참조).

따라서, 이와 같은 계층구조정보를 이용하면 현재 변전소의 전기적 연결상태를 용이하게 파악할 수 있으며, 이는 고장진단시에 유용한 정보를 제공한다. 본 논문에서는 계통의 연결상태파악을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 설비 연결자료(Element Connection Data)를 정의하였다.

Conn(level, ULE, {LLE-list})

여기서 level은 해당 연결자료의 계층적 위치로, 표 2와 같이 정의하였으며, ULE(Upper Level Element)는 연결된 설비중 상위설비를 의미하고

표 2. 설비 연결자료의 Level

Table 2. Level in Element Connection Data

연 결 설 비	Level
송 전 선 로 - 상 위 모 선	1
상 위 모 선 - 변 압 기	2
변 압 기 - 하 위 모 선	3
하 위 모 선 - 배 전 피 더	4

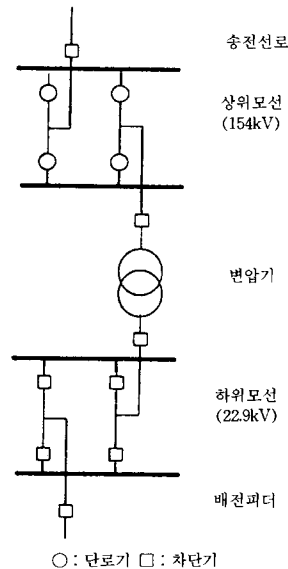


그림 1. 변전소의 계층구조¹⁸⁾
Fig. 1. Hierarchical structure of a substation

LLE(Lower Level Element)list는 하위설비 집합이다.

ii)계전기 보호영역 자료

일반적으로 보호계전기는 특정 설비를 보호하기 위한 목적으로 설치된다. 그리고 어떤 설비에 대해서는 보호의 신뢰성을 증대시키기 위하여 여러 개의 보호계전기를 설치한다. 예를 들어 154/22.9(kV)변압기에 대한 전기적 보호를 위하여 다음과 같은 보호방식이 채택되어 있다. 변압기 주보호 계전기로 87번(비율 차동)계전기가 설치되고 후비보호로써 51(과전류)계전기가 있으며, 변압기 양단의 차단기를 동시에 트립시키기 위하여 86번(중고장)계전기가 설치되어 있다¹⁶⁾. 그런데, 이 중에서 과전류 계전기의 경우, 해당 변압기의 후비보호 역할 뿐만 아니라, 변압기 하위측 설비들의 후비보호 역할을 수행할 수 있다. 따라서, 변압기 보호를 위하여 설치된 과전류 계전기가 동작한 경우,

①변압기 자체의 고장

②변압기 하위의 어떤 설비에서 고장이 발생하였으며, 해당 설비에 대한 보호기기의 부동작 등으로 인하여 고장이 변압기까지 파급되어 이에 의해 계전기가 동작

이 두가지 가능성을 고려하여야 한다. 그런데, 2.1에 설명한 계전기 자료에는 ①의 경우만 입력되어 있으므로, 본 논문에서는 현재의 계통 연결 상태를 이용하여 ②에 대한 자료를 자체적으로 생성하게 하였다. 그 자료구조는 다음과 같다.

Protect(Ry-id,PPE,{SPE-list},{TPE-list},...)

여기서 Ry-id는 계전기 고유 명칭, PPE(Primary Protected Element)는 해당 계전기가 주보호 기기로 설치된 설비이며, {SPE-list}, {TPE-list} 등은 계통 상태에 따라 1차 후비보호 설비집합, 2차 후비보호 설비집합 등을 의미한다. 계전기 보호영역 자료는 각 설비에 대한 보호방식에 대한 전방향 추론 결과와 같다.

그림 2와 같은 모의 계통을 생각하자.

이 계통은 상위모선(Hbus 1)-변압기(Tr 1)-2번 하위모선(Lbus 2)-{배전선로 1, 2(DL 1, DL2)}의 계층으로 전력이 공급되고 있는 변전계통이다. 변압기에는 주보호 기기로 비율 차동 계전기

(RY 1, 87), 후비보호 기기로 과전류 계전기(Ry 2, 51)가 각각 설치되어 있다. 이에 대하여 앞에 설명한 계전기 보호 영역 자료를 생성하는 예는 다음과 같다.

①Ry 1 : 비율 차동 계전기는 하위 설비에 대한 후비보호 기능이 없으므로, SPE집합과 TPE집합은 공집합이다. 따라서, 생성되는 보호영역 자료는 다음과 같다.

Protect(Ry1, Tr 1,,)

②Ry 2 : 과전류 계전기는 변압기 뿐만 아니라 하위설비에 대한 후비보호 기능을 갖는다. 이 때, 각 스위치의 온/오프 상태에 따라 SPE집합과 TPE집합이 결정된다. 위의 모의 계통에 대한 Ry 2의 보호영역 자료는 다음과 같이 생성된다.

Protect(Ry 2, Tr 1, {Lbus 2}, {DL 1, DL 2})

여기서 Lbus1은 1번 변압기와 4번 차단기(cb 4)에 의하여 전기적으로 차단되어 있으므로 SPE 집합에서 제외되며, DL 3 역시 같은 이유로 TPE집합에 포함되지 않는다.

3. 추 론

본 논문에서 제안하는 추론방식은 2단계로 이루어진다¹⁷⁾. 1단계에서는 제2절에 설명한 보호계전기의 보호영역 자료를 이용하여 고장 후보들을 선정한다. 이는 발생한 보호기기들의 동작형태를

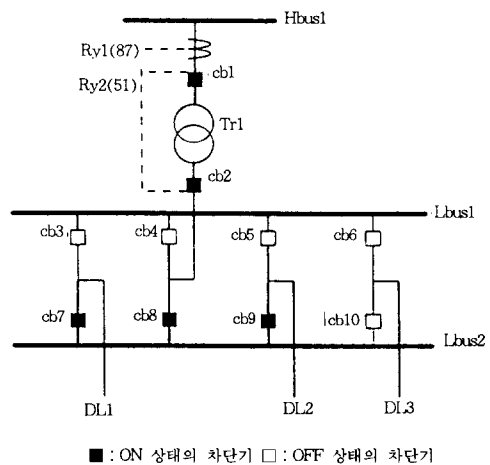


그림 2. 모의 계통
Fig. 2. Sample power system

설명하기 위한 탐색공간을 축소한다는 의미를 갖는다. 2단계에서는 선정된 고장 후보에 대하여 보호기기 동작 패턴의 인과관계를 설명하고 고장 후보의 고장 가능성을 파악하는데, 여기서는 후방향 추론을 이용한다.

3.1 고장 후보의 선정

고장 발생 후, 보호계전기가 동작하여 동작 경보(Alarm)가 주어지면 해당 계전기의 보호영역 자료를 탐색한다. 이 자료구조 내의 모든 설비들은 고장 후보이다. 복수개의 계전기가 동작한 경우, 각 계전기에 대하여 위와 같은 탐색을 독립적으로 행한 후, 각각의 계전기 보호영역 자료로부터 얻어진 고장 후보들의 공통집합을 취한다. 이 공통집합 내의 설비들이 현재 주어진 보호 계전기들의 동작 패턴을 생성할 수 있는 고장 후보가 된다(그림 3 참조).

3.2 각 후보에 대한 고장 가능성의 추론

3.1에 설명한 바와 같이 동작한 각 계전기들의 보호영역 자료로부터 고장 후보가 선정되면 각 후보들에 대한 고장 가능성을 추론한다. 근본적으로 고장진단의 어려움은 각 설비에 대한 보호기기들의 오동작, 또는 부동작에 기인하는 것으로, 어떤 설비가 고장이라고 가정하였을 때 발생할 수 있는 보호기기들의 동작 형태는 매우 많다. 그림 4는 어떤 설비에 고장이 발생하였을 때 발생할 수 있는 보호기기들의 동작 형태들을 나타낸다. 그림에서 화살표는 원인-결과 관계를 의미하고 하나의 노드에서 출발한 화살표는 서로 배타적 논리합(Exclusive OR)관계에 있다. 그림에서 임의의 경로(path)는 발생 가능한 보호기기들

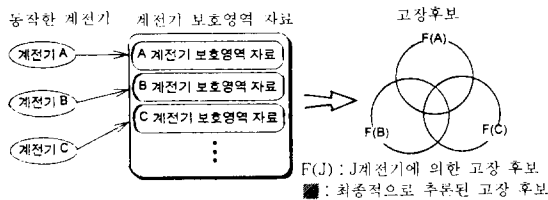


그림 3. 여러 개의 계전기가 동작한 경우의 고장후보의 추론
Fig. 3. Inference of fault candidates in case of multiple relay operations

의 동작형태가 된다. 동작한 보호계전기의 보호영역으로부터 고장 후보가 선정되면, 그 후보를 가정하여 그림 4와 같은 인과관계 나무를 형성할 수 있고, 이 나무에서 동작한 보호기기들의 동작 형태와 일치하는 경로가 가정한 고장에 대하여 입력된 보호기기의 인과관계를 설명하는 근거가 된다. 여기서, 보호기기의 부동작 수가 적을 수록 가정한 고장의 가능성이 높은 것이다. 예를 들어, 어떤 고장 후보에 대하여, 실제 발생한 보호기기의 동작 형태가 그림 4의 굵은 선으로 표시된 가치와 일치하였다면, 이는 '고장이 발생하여 후보 보호 계전기가 동작하였으나 이에 의하여 트립되는 차단기가 동작하지 않아 고장이 분리되지 못하였고, 이에 의하여 후비보호 계전기가 동작하였으며 차단기가 정동작하여 고장이 차단되었다'고 설명할 수 있다. 만일 차단기의 부동작 가능성이 0.1이라면, 이 예에서 가정한 고장은 0.9의 가능성을 갖는 것이다.

이상에 설명한 바와 같이, 고장이 발생하면 우선 계전기 보호영역 자료에 의하여 고장 후보를 선정하고, 선정된 고장 후보들에 대하여 실제 발생한 보호기기들의 동작 형태로부터 각 고장후보들의 고장 가능성을 추론하는 2단계 추론에 의하여 고장 설비 및 종류를 파악할 수 있다.

4. 데이터 베이스

데이터 베이스는 지식 베이스와 규칙 베이스로

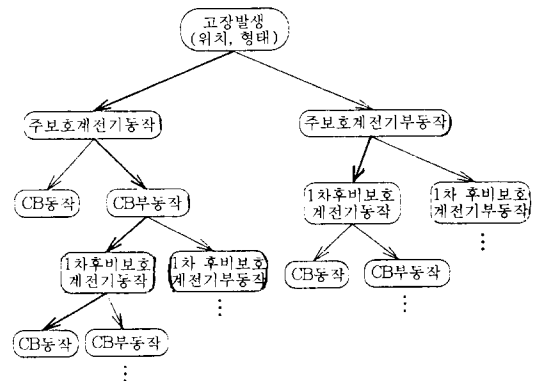


그림 4. 고장에 의한 보호기기 동작의 인과 관계¹⁾
Fig. 4. Cause-and-effect relations among the protective devices

이루어진다.

4.1 지식 베이스

지식 베이스는 제2장에 설명한 스위치와 계전기 자료, 설비 연결자료, 그리고 계전기 보호영역 자료로 구성된다. 여기서 스위치 자료의 'STATUS'항목을 제외한 모든 항목과 계전기 자료는 최초에 입력된 자료가 그대로 유지되는 정적 자료이며 스위치 자료의 'STATUS'와 설비 연결자료, 그리고 계전기 보호영역 자료는 스위치들의 온/오프 상태 변화에 따라 갱신되는 동적 자료이다.

4.2 규칙 베이스

규칙 베이스는 다음과 같이 세분된다.

① 설비 연결구조 파악 규칙: 이는 스위스 자료 내의 스위치 양단의 설비와 스위치 상태로부터 설비 연결자료를 구축하기 위한 규칙이다. 여기에는 변전소내 각 설비들의 계층을 결정하는 정보가 포함된다.

② 계전기 보호영역자료 구축 규칙: 계전기 보호영역자료 구축 알고리즘에 사용되는 규칙으로 계전기 자료와 설비 연결구조 자료를 이용한다. 주요 규칙은 다음과 같은 것들이 있다.

PR1: 계전기 자료의 el항목은 그 계전기 보호영역자료의 PPE집합에 속한다.

PR2: 계전기 보호영역자료는 상위 보호영역항목부터 차례로 결정한다.

PR3: 계전기 보호영역 자료의 상위 보호영역 집합의 원소를 ULE에 갖고 있는 Connect자료의 LLE집합 내의 설비들은 그 계전기 보호영역의 하위 보호영역 집합에 속한다.

PR4: 과전류 계전기는 주보호 설비에 대한 하위 설비의 후비보호 기능을 갖는다.

PR5: 거리 계전기는 주보호 설비측에 연결된 설비의 후비보호 기능을 갖는다.

여기서 상위 보호영역이란 전원측에 가까운 설비를 의미하며, Connect자료에서는 PPE가 최상위이고, SPE집합, TPE집합의 순서가 된다.

③ 보호기기 인과관계 규칙: 고장과 계전기 동작, 그리고 차단기 동작의 인과관계를 기술하는

규칙으로, 추론 2단계에서 오/부동작한 보호기기를 찾아내고 고장 파급경위를 설명하는데 이용된다. 주요 규칙은 다음과 같다.

CR1: 다른 변압기 보호계전기 동작 없이 동작한 중고장 계전기는 오동작이다.

CR2: 차단기를 트립시키는 계전기 동작 없이 동작한 차단기는 오동작이다.

CR3: 계전기가 동작하고 해당 차단기가 동작하지 않으면 그 차단기는 부동작이다. 인과관계 규칙은 그림 4와 같이 도식적으로 표현할 수 있다.

5. 전체 시스템의 구조

본 전문가 시스템이 필요로하는 모든 온라인 데이터는 전력계통에 설치, 운용되고 있는 SCADA시스템으로부터 받는데, 기존의 SCADA 시스템에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 별도의 인터페이스를 필요로 한다.¹⁸⁾ 지식 베이스는 규칙 베이스와 데이터 베이스로 구성되고 데이터 베이스는 다시 동적 데이터 베이스와 정적 데이터 베이스로 구분되는데¹⁷⁾, 전자는 계통 상태가 변할 때 마다 수시로 그 내용이 갱신되는 데이터 베이스이고, 후자는 전문가 시스템 기동시에 취한 내용이 계속 변하지 않는 데이터 베이스이다. 추론기관은 전방향 추론기관과 후방향 추론기관으로 구분할 수 있으며, 전방향 추론 결과에는 'Black Board'를 통하여 후방향추론기관에 데이터

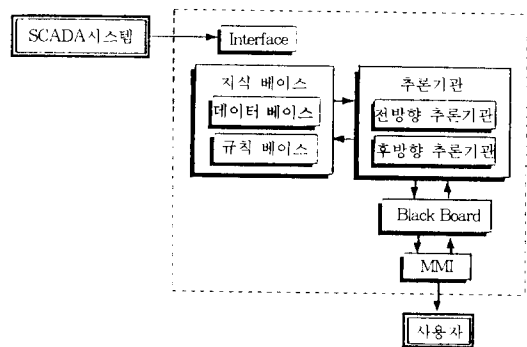


그림 5. 전체 시스템의 구성
Fig. 5. Structure of overall system

를 전달하고, 후방향 추론기관은 다시 'Black Board'와 사용자와의 인터페이스 MMI(Man-Machine Interface)를 통하여 사고상황에 대한 설명과 각 진단결과를 제시한다. 이상의 내용은 그림 5와 같이 도식화 할 수 있다.

6. 사례연구

6.1 대상 변전소

표 3. 보호방식

Table 3. Protection schemes

피보호설비	보호 방식	
	주 보호	후비보호
상위모선 (154kV모선)	전류차동	2,3단계거리
변압기 (154/22.9kV)	전류차동	과전류
하위모선 (22.9kV모선)	과전류	과전류
피더	과전류	없음

본 장에서는 본 논문에서 제시한 고장진단 알고리즘을 154[kV]급 변전소 모형에 적용하여 그 성능을 평가한다. 연구 대상 변전소는 서울 북부 지역과 경기 및 강원 일부지역의 전력공급을 담당하는 의정부 전력소 관내 S변전소를 선정하였다⁸⁾. 평상시 운용되는 S변전소의 1선 결선도는 그림 6과 같다.

이 변전소에는 많은 종류의 보호설비들이 장착되어 있는데 본 논문에서 고려한 각 설비에 대한 보호방식은 표 3과 같다.

6.2 가정 상황

위의 변전소의 40번 하위모선에 운전 부주의로 인한 지락사고가 발생하였고, 이에 의하여 과다한 지락전류가 발생하여 40번 하위모선 보호용 과전류 계전기가 동작하였다. 그러나 이에 의하여 차단되어야 할 차단기가 부동작하여 사고가 상위 설비로 과급되었으며, 1번 변압기 1차측 과전류 계전기가 동작하여 변압기 1차측 차단기가

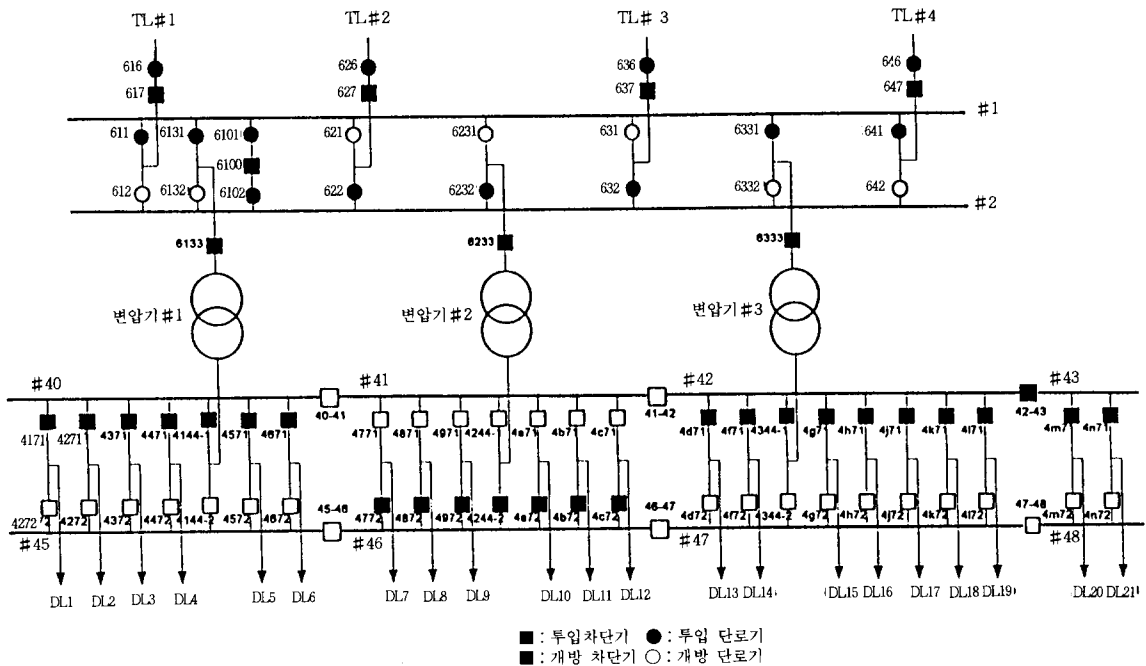


그림 6. S변전소의 단선 결선도⁸⁾
 Fig. 6. One-line diagram of 'S' substation

트립되어 사고가 차단되었다.

이상의 상황은 다음과 같은 정보로 주어진다.

위 경보집합에서, 앞부분의 08/30 1200:00은 8월 30일, 정오를 의미하고, S는 변전소 이름, 40Lbus등은 해당 설비 이름, Ry51등은 동작한 보호설비 이름을 의미하며 계전기 항목의 1은 지락전류에 의한 동작을 뜻하다.

본 전문가 시스템의 데이터 베이스에는 다음과 같은 정보가 있다.

*계전기 자료

Ry(14,51,#1_Mtr,{6133,4144_1,4144_2})

Ry(23,51,#40_Lbus,{4144_1,4144_2})

여기서 14번 계전기는 1번 변압기 후비보호용 과전류 계전기(51)로 6133, 4144_1, 4144_2 차단기를 트립시키는 기능을 갖는다. 23번 계전기 자료의 의미도 같은 방법으로 찾을 수 있다.

그리고 전문가 시스템은 설비 연결자료와 보호 영역자료를 스스로 생성한다.

*설비 연결자료

Conn(3,#1_Mtr,{#40_Lbus})

Conn(4,#40_Lbus,{#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1})

```

*****
* 08/30 1200:00 S #40_LBus Ry51 1 ALARM
* 08/30 1200:02 S #1_MTR Ry51 1 ALARM
* 08/30 1200:03 S #1_MTR CB 6133 open
*****
    
```

그림 7. SCADA시스템으로부터 접수된 경보
Fig. 7. Alarm set obtained from SCADA system

```

*****
* Fault Cnadidate : #40 LBus
* Correct Operation of Ry #23
* Non Operation of CB #4144_1
* Correct Operation of Ry #14
* Correct Operation of Ry #15
* Correct Operation of CB #6133
*****
    
```

```

*****
* Fault Cnadidate : #1 DL
* Non Operation of Ry #26
* Correct Operation of Ry #23
* Non Operation of CB #4144_1
* Correct Operation of Ry #14
* Correct Operation of Ry #15
* Correct Operation of CB #6133
*****
    
```

그림 8. 후방향 추론에 의한 보호기기 동작에 관한 설명
Fig. 8. Description of device operations by backward reasoning

D1,#5_D1,#6_D1,))

*계전기 보호영역 자료

Protect(14,#1_Mtr,{#40_Lbus}, {#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1,))

Protect(23,#40_Lbus, {#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1,))

6.3 추론

위의 자료와 주어진 경보중 계전기 자료를 이용하여 1단계 추론 결과는 다음과 같다.

* 14번 계전기 고장 후보 : #1_Mtr,#40_Lbus,#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1,

* 23번 계전기 고장 후보 : #40_Lbus,#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1,

따라서 위의 고장 후보들간의 교집합을 취하면 결과적인 고장 후보를 얻을 수 있다.

* 결과적인 고장 후보 : #40_Lbus,#1_D1,#2_D1,#3_D1,#4_D1,#5_D1,#6_D1,

1단계 추론에 의하여 얻어진 고장 후보에 대하여 2단계 추론을 행한 결과는 다음과 같다.

다른 배전 피더 고장 가정시에도 #1배전 피더와 유사한 결론을 얻을 수 있다. 여기서 26번 계전기는 1번 배전 피더를 보호하기 위한 과전류 계전기이다.

이상의 추론 결과에서, 40번 하위모선의 고장을 가정했을 때, 부동작 기기가 차단기 1개이고 1번에서 6번 배전피더의 고장을 가정했을 때, 부동작 기기가 2개 이므로 전자의 가능성이 더 높은 것을 알 수 있다. 따라서 최종적인 고장 진단 결과는 다음과 같다.

여기서 고장 가능성은 차단기 부동작 가능성을 5(%)로 가정하였을 때의 계산 결과이다.

이상에서 본 논문에서 제안된 고장진단 전문가 시스템이 유입된 정보로부터 정확한 고장 위치

```

*****
* Fault Device : #40_LBus
* Fault Possibility : 0.95
* Non Operated Device : #4144_1 CB
* Mal Operated Device : None
*****
    
```

그림 9. 최종적인 고장진단 결과
Fig. 9. Final inference result

를 찾아내는 것을 알 수 있다. 본 사례연구는 IBM 486PC를 이용하여 약 2.4초가 소요되었으며 다른 경우에 대해서도 비슷한 시간이 소요되었다. 본 사례연구는 기존의 고장진단 시스템으로도 동일한 진단결과를 얻을 수 있을 것으로 생각되나 그들에 관하여 문헌에 제시된 바에 의하면 수 초에서 수십 초 소요되는 것으로 알려져 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 변전소내 변전설비에 대한 고장진단 전문가 시스템을 제안하였다. 본 전문가 시스템에서는 변전소의 전압 수준과 전력의 흐름에 따라 계층 구조의 특성을 효과적으로 이용하기 위한 2단계 추론 알고리즘을 제안하였으며, 효율을 높이기 위하여 계층을 고려한 설비 연결자료를 제안하였다. 그리고 수시로 계통 상태가 바뀌는 경우에도 전문가 시스템 스스로 계전기의 후비보호 설비를 찾을 수 있는 알고리즘과 이를 위한 계전기 보호 영역 자료를 제안하였다. 본 전문가 시스템을 실제 변전소 모형을 통하여 그 성능을 검증하여 매우 빠른 시간 내에 결과가 도출됨을 보였다. 본 논문에서는 변전소내 변전설비에 초점을 맞추었으나 향후, 송전선로를 포함한 전력계통 설비에 대한 고장진단문제로 확장할 수 있으며 계통 연결 표현과 2단계 추론방식은 유용한 방법으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) K. Tomsovic, C. C. Liu, P. Ackerman, and S. Pope, "An Expert System as a Dispatcher's Aid for the Isolation of Line Section Faults," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 2, no. 3, pp. 736-743, July 1987.
- 2) Z. Z. Zhang, G. S. Hope, and O. P. Malik, "Expert Systems in Electric Power Systems-Abibliographical Survey," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no. 4, pp. 1355-1362, October 1989.
- 3) B. F. Wollenberg and T. Sakaguchi, "Artificial Intelligence in Power System Operations," Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 12, pp. 1678-1684, December 1987.
- 4) S. Ito, I. Hata, T. Hasegawa, M. Amano, and A. Maruyama, "Advanced Operation Guidance System for 500KV Substation," Electrical Power & Energy Systems, vol. 14, no. 2/3 pp. 114-121, April/June 1992.
- 5) C. Fukui and J. Kawakami, "An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 1, no. 4, pp. 83-90, October 1986.
- 6) T. Kimura, "Development of an Expert System for Estimating Fault Section in Control Center Based on Protective System Simulation," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 167-172, January 1992.
- 7) Y. Fuzimoto, K. Ibuki, and S. Tada, "Operation of an On-line Substation Diagnosis System," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 1628-1634, October 1988.
- 8) C. A. Protopapas, K. P. Psaltiras, and A. V. Machias, "An Expert System for Substation Fault Diagnosis and Alarm Processing," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 648-655, April 1991.
- 9) B. Jeyasurya, S. S. Venkata, S. V. Vadani, and J. Postforoosh, "Fault Diagnosis Using Substation Computer", Proceeding of CIGRE, pp. 289-295, 1989.
- 10) Z. Z. Zhang, G. S. Hope, and O. P. Malik, "Knowledge Based and Integrated Diagnosis in Transmission Substations," in Proc. 3rd Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Tokyo-Kobe, Japan, pp.413-418, April 1-5, 1991.
- 11) Y. M. Park, H. J. Lee, "An Expert System for the Fault Diagnosis in Power System," in Proc. IFAC on Power System and Power Plant Control, Korea, 1989, 7.
- 12) A. Hertz and P. Fauquemberque, "Fault Diagnosis at Substations Based on Sequential Event Recorders," Proceeding of the IEEE, vol. 80, no. 5, pp. 684-688, 1992.
- 13) D. D. Wolfram, T. J. Dear, and C. S. Galbraith, Expert Systems for the Technical Professional, JOHN WILEY & SONS, 1987.
- 14) "전력계통의 전문가 시스템", 일본 전기학회 기술보고, 제339호, 1993.4
- 15) "91 변전설비 사고분석 및 대책", 한국전력공사, 1992. 3.
- 16) 박영문, 이흥재, "전력계통의 고장진단 전문가시스템에 관한 연구," 대한전기학회논문지, 39권, 10호, 1990년 10월
- 17) 윤용범, "지역전력계통에서의 고장진단 및 정전복구에 대한 전문가 시스템 적용연구," 공학박사 학위논문, 서울대학교, 1995.
- 18) 변전소 고장진단 및 복구지원 전문가 시스템 개발(최종 보고서), 한국전력공사, 1995.
- 19) 박영문, 이흥재, 임찬호, 윤용범, "변전소 자동화를 위한 고장진단 전문가 시스템 연구", 대한전기학회 논문지, 44권, 3호 1995년 3월.

◇ 著 者 紹 介 ◇



박 영 문(朴永文)

1933년 1월 20일생. 1956년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1971년 동대학원 졸업(박사). 1983년 미국 휴스턴 대학교 교환교수. 현재 서울대학교 전기공학부 교수, 기초전력 공동 연구소 소장.



김 광 원(金光源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 박사과정 수료. 현재 동 대학원 박사과정.



최 면 송(崔勉頌)

1967년 4월 9일생. 1989년 서울대공대 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 박사과정 수료. 현재 동 대학원 박사과정.



현 승 호(玄升鎬)

1962년 10월 30일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 박사과정 수료. 현재 동 대학원 박사과정.