

메타-인퍼런스와 퍼지추론을 이용한 송변전 설비의 통합 고장진단 전문가 시스템

(An Integrated Fault Diagnosis System for Power System Devices
using Meta-Inference and Fuzzy Reasoning)

이흥재* · 임찬호** · 김광원***
(Heung-Jae Lee · Chan-Ho Lim · Gwang-Won Kim)

요 약

본 논문에서는 변전설비 운용의 자동화를 실현하기 위하여 변전설비에서 발생하는 다양한 사고를 판정할 수 있고, 변전설비 사고가 송전설비로 확산되는 경우에 대비하기 위하여 송전설비의 진단기능을 부가시킨 지역급전 본소의 운전자 지원을 위한 지능적 통합 고장진단 시스템을 개발하였다.

본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 변전설비와 송전설비에서 발생하는 다양한 사고를 진단할 수 있으며, 데이터 이중화 장치를 통하여 감시제어 시스템의 데이터 베이스를 공유하게 함으로서 최소한의 부담으로 기존의 감시제어 시스템에 설치할 수 있도록 하였다. 또한 지식에 포함된 불확실성을 처리하기 위하여 퍼지추론을 수행하였고, 모듈라 프로그래밍 기법과 메타-인퍼런스 기법을 사용하고 있으며, 저가의 개인용 컴퓨터로 구현하였다.

Abstract

This paper presents an integrated fault diagnosis expert system to assist SCADA operators in local control centers which controls unmanned distribution substations in a power system. The proposed system diagnoses various faults occurred in both substation devices and transmission devices. The system can be easily installed without disturbing main SCADA system. The system simply shares the dynamic information including alarms with main SCADA using dual data link interface. And the proposed expert system utilizes the fuzzy reasoning process in order to consider the uncertainty factor. The system is developed using a low cost personal computer owing to the special modular programming and the meta-inference structure. Case studies showed a promising possibility.

*정회원 : 광운대 공대 전기공학과 부교수
**정회원 : 광운대 공대 전기공학과 박사과정

***정회원 : 울산대 공대 전기공학과 전임강사
접수일자 : 1997. 11. 3

1. 서 론

변전설비의 효율적 운용을 위하여 현재까지 다양한 감시제어 시스템이 개발되어 왔다. 현재까지 개발된 감시제어 시스템은 운전원들의 경험에 의존하여 운용되고 있으며, 정상상태에서의 원격감시 및 원격제어 기능을 수행한다. 그러나 사고가능성은 배제할 수 없으며, 사고가 발생할 경우 수용가측에서 요구하는 양질의 전력을 공급하는 데 막대한 지장을 초래한다. 그러므로 이와 같은 긴급상황이 발생하면 운전원들은 자신의 경험을 바탕으로 사고가 발생한 설비를 판정하고 복구조치를 취하여 신속히 전력공급을 재개하여야 한다. 그러나 자동화를 위한 제반 설비들의 지속적인 증가와 설비의 고신뢰화로 인한 운전원들의 사고경험 감소로 전문적인 운전원의 양성이 어려워지고 있고, 또한 어렵고 힘든 일을 기피하는 현상으로 인하여 운전원 및 유지보수 요원의 확충이 어려워지고 있으며, 기존 운전원들의 지속적인 퇴직으로 인한 전문경험의 상실도 매우 큰 문제로 부각되고 있는 상황이다. 이에 대한 대처방안으로 미국, 유럽, 일본 등지에서는 인공지능 기법을 이용하여 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

고장진단은 복구와 더불어 변전설비 운용의 자동화를 실현하기 위한 기반으로, 주어진 보호설비의 동작정보로부터 사고설비를 신속, 정확하게 판단하고, 부동작 또는 오동작 기기를 판정하는 문제이다. 고장진단에 대한 연구로는 Fukui[1]를 시발점으로 하여 주로 송전설비 고장진단[2, 3]에 관한 연구가 진행되어 왔고, 국내에서도 후방향 추론을 이용한 위상구조 기반의 귀납적 고장진단법[4]이 발표된 바 있다. 최근에는 변전소 자동화가 중요한 쟁점사항으로 부각되어, 변전설비 고장진단에 관한 연구[5~9]가 활발히 수행되고 있으며, 국내에서도 위상구조와 절연방식이 상이한 다수의 무인 변전소를 진단하는 위상구조 기반의 범용구조(general structure)[10]가 제안된 바 있다.

본 논문에서는 변전설비 운용의 완전 자동화에 대비하기 위하여 변전설비에서 발생하는 다양한 사고

를 판정할 수 있고, 변전설비 사고가 송전설비로 확산되는 경우에 대비하기 위하여 송전설비의 진단기능을 부가시킨 지역급전 본소의 운전자 지원 고장진단 전문가 시스템을 제안하였으며, 제안된 전문가 시스템은 참고문헌 [4, 10]을 기반으로 하고 있다. 본 논문에서는 전체 시스템을 변전설비 고장진단 전문가 시스템과 송전설비 진단 전문가 시스템으로 분할하는 계층기법을 사용하였고, 각각의 전문가 시스템을 효과적으로 결합시키기 위하여 메타-인퍼런스를 사용하였다. 제안된 전문가 시스템은 향후 실용화에 대비하여 PC상에서 구현하였다.

2. 시스템 구조

본 논문에서 제안한 지능 시스템의 전체 구조는 다음 그림 1과 같으며, 지능 시스템은 Ethernet LAN 포트와 데이터 이중화 장치를 장착한 저가의 개인용 컴퓨터로 구현하였다.

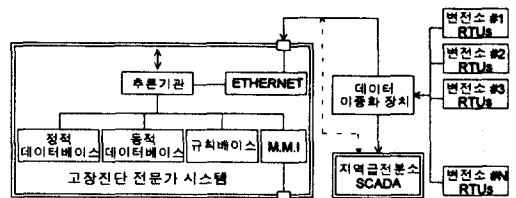


그림 1. 전문가 시스템의 구조
Fig. 1. Structure of the expert system

그림 1에서 보는 바와 같이, 전문가 시스템은 추론기관, 규칙 베이스, 정적 데이터베이스로 구성되며, 데이터 이중화 장치를 이용하여 감시제어 시스템의 실시간 데이터 베이스를 공유하고 있다. 즉, 본 논문에서는 RTU로부터 감시제어 시스템에 입력되는 개폐기의 상태, 보호설비의 동작정보 등의 실시간 정보를 데이터 이중화 장치를 통하여 입력받아 동적 데이터 베이스를 구축하도록 하였다. 또한 그림 1에서 점선으로 표시된 부분은 초기화 과정에서 사용되는 부분으로서, 동적 데이터 베이스에 포함된 개폐기의 초기상태를 결정하기 위하여 전문가 시스템이 감시제어 시스템에 저장된 데이터를 취득하는

부분이다.

변전소는 GIS와 AIS의 두 가지 종류로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 이와 같은 두 종류의 변전설비를 효과적으로 표현하기 위하여 위상구조를 기반으로 한 범용구조를 도입하였다. 또한 본 논문에서는 범용구조와 인공지능 기법을 이용하여 전문가 시스템을 두 개의 계층으로 분할한 계층기법을 사용하였다. 일반적으로 계층구조는 하위계층의 부시스템 사이에 상관관계가 적은 경우에 바람직한 방법이므로, 본 논문에서 계층구조를 도입한 것은 변전설비 진단규칙과 송전설비 진단규칙사이에 상관관계가 적기 때문이다.

변전설비에서 사고가 발생하고 보호설비의 적절한 동작으로 사고의 영향이 인근의 변전소로 확산되지 않으면, 고장진단 영역은 변전소로 제한된다. 그러나 사고에 대한 보호설비들의 오동작, 부동작이 발생하면 사고는 송전설비로 파급되어 인근 변전소의 송전설비 보호 시스템이 후비보호로서 동작한다. 따라서 이와 같은 상황이 발생하면, 효율적인 고장진단을 위하여 변전설비 진단 시스템과 송전설비 진단 시스템의 상호 협조가 요구된다. 제안된 전문가 시스템에서는 이와 같은 협조문제를 해결하기 위하여 메타-인퍼런스 기법을 개발하였다.

2.1 변전설비 진단

변전설비 고장진단 시스템은 휴리스틱 규칙을 포함한 보호설비들의 동작 특성을 기반으로 한 연역적 지식을 이용하고 있으며, 자세한 내용은 참고문헌 [10]에 서술하였다.

정적 데이터베이스 : 변전설비의 위상구조 데이터와 설비 데이터로 구축

규칙 베이스 : 보호설비 동작 규칙, 사고설비 판별 규칙, 해의 설명 규칙

관련 기기 : 154[kV] 모선, 변압기, 22.9[kV] 모선, 배전선로, 차단기, 단로기

보호설비 : 43BP, 87B1, 87B2, OCR, OCGR, 87T, 87B, 86, 96B1, 96B2, 96P

2.2 송전설비 진단

송전설비 고장진단 시스템은 참고문헌[4]의 기본 이론을 기반으로 하고 있다.

정적 데이터베이스 : 지역 송전설비의 위상구조 데이터와 설비데이터로 구축

규칙 베이스 : 보호설비 동작 규칙, 사고설비 판별 규칙, 해의 설명 규칙

관련 기기 : 송전선로, 차단기

보호설비 : Z1, Z2, Z3(87T, Pilot/Carrier)

2.3 데이터 베이스

데이터 베이스는 1개의 정적 데이터베이스와 3개의 동적 데이터베이스로 구성하였으며, 동적 데이터 베이스는 매 시간 간격(2분) 마다 주 프로그램에 의하여 갱신되도록 하였다. 동적 데이터베이스에는 유효전력과 무효전력, 송전선로와 모선의 전압 그리고 배전선로의 전류 등을 저장하는 아날로그 데이터베이스와 사고시 생성되는 경보집합을 저장하는 데이터베이스 그리고 차단기, 단로기의 순시 상태를 저장하는 데이터베이스가 있다.

데이터 베이스의 종류와 포함된 데이터는 다음 표 1에 간단히 서술하였다.

표 1. 데이터 베이스의 구성
Table 1. Contents of databases

데이터 베이스	포함된 데이터
system.dba	변전소 위상구조 데이터 (정적 데이터 베이스)
scada.dba	차단기, 단로기 등의 순시 상태 (동적 데이터 베이스)
analog.dba	유효/무효 전력, 전압, 전류 (동적 데이터 베이스)
alarm.dba	차단기, 단로기, 계전기 동작정보 (동적 데이터 베이스)

2.4 메타-인퍼런스와 프로그램 구조

규칙베이스는 다음 그림 2와 같이 두 종류로 구성된다.

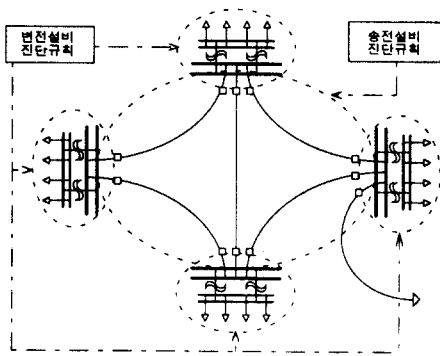


그림 2. 규칙 베이스 분류
Fig. 2. Rule base classification

본 전문가 시스템의 규칙 베이스는 변전설비 진단 규칙과 송전설비 진단규칙의 두 종류로 구성된다. 그러므로 신속한 고장진단을 수행하기 위해서는 사고가 발생한 위치 - 변전설비, 송전설비 - 에 대한 결정이 선행되어야 한다. 또한 변전설비 진단에 있어서도 규칙 베이스가 위상구조 기반의 범용규칙으로 구성되어 있으므로 적용할 변전설비의 위상구조 데이터베이스를 선택하기 위하여 사고 변전소가 확인되어야 한다.

변전설비에서 사고가 발생하고 보호설비나 차단기의 부동작에 의하여 정전구역이 확대되는 경우에는 변전설비와 송전설비를 연계한 고장진단을 수행하기 위한 추가적인 규칙이 요구된다. 이와 같은 경우에는 다수의 해가 제시될 수 있으며, 해의 우선순위를 결정하기 위한 확신도가 결정되어야 한다.

메타-인퍼런스는 다양한 메타-규칙을 사용하고 있으나, 메타-인퍼런스를 포함한 전체적인 추론과정은 다음과 같은 알고리즘으로 표현된다.

```

START : INITIALIZE
LOOP : If dynamic data is updated
      then goto UPDATE
      else if alarm data is received
            then invoke META-INFERENCENCE
            else goto UPDATE
UPDATE : Update dynamic database
        Goto LOOP
    
```

META-INFERENCENCE :

```

If the alarms are attached to one substation
then invoke SUBSTATION-DIAGNOSIS
else if the alarms are attached to only T/L
then invoke TRANSMISSION-DIAGNOSIS
else invoke HYBRID-DIAGNOSIS

Call ORDERING
Call DISPLAY-MESSAGE
Goto LOOP
    
```

3. 불확실성 처리

변전설비에 사고가 발생하면 보호 계전기가 동작하고 계전기는 한 개 또는 다수의 차단기를 동작시켜 사고를 제거하며, 이때 동작한 계전기와 차단기는 정보를 발생한다. 일반적으로 차단기 트립의 원인은 계전기이고, 사고는 계전기 동작의 원인으로 작용한다. 그러나 부동작 또는 오동작이 발생하면, 상황은 더욱 복잡하게 된다. 이와 같은 사고와 보호기기의 인과관계를 요약하면 다음 표 2와 같다.

표 2. 인과 관계
Table 2. Causal relationship

No.	원 인	결 과	해 석
1	사고	계전기 동작	계전기 정동작
2		계전기 동작	계전기 오동작
3	사고	계전기 동작 실패	계전기 부동작
4	계전기 부동작	후비보호 계전기 동작	후비보호 계전기 정동작
5	계전기 동작	차단기 트립	차단기 정동작
6	계전기 동작	차단기 트립 실패	차단기 부동작
7	차단기 트립 실패	후비보호 계전기 동작	후비보호 계전기 정동작
8	계전기 동작	계전기 정보	통신상 오류는
9	차단기 트립	차단기 정보	고려치 않음

표 2에서, 해석부분은 원인과 결과에 대한 지식이 정확하고 단일 사고라는 가정 하에서 정당하다고 할 수 있으나 실제의 시스템에서는 결론부만이 정보의

형태로 주어진다. 따라서 단일 사고의 경우라도 다수의 가능한 해를 구할 수 있으므로, 이를 해결하기 위한 불안전 추론은 반드시 수행되어야 한다.

다음 그림 3은 제안된 시스템의 기본적인 고장진단의 원리를 보여주고 있다.

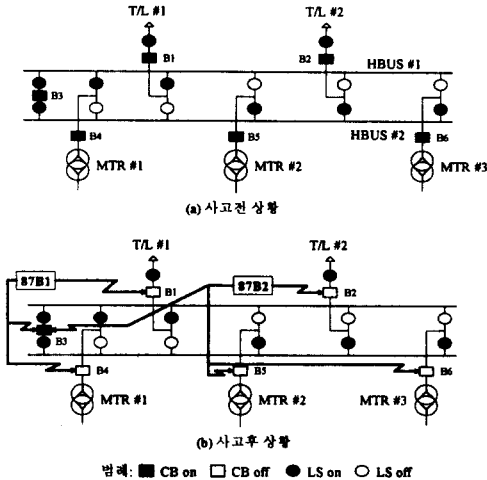


그림 3. 고장 진단 예
Fig. 3. Example of the fault diagnosis

Example : 그림 3에서 사고설비는 HBUS #1에서 발생한 경우로 가정한 진단 결과는 다음과 같다.

Possible solution #1.

- Fault occurred at the HBUS #1.
- 87B1 tripped the CB1, CB3 and CB4.
- CB3 failed to trip.
- 87B2 operated to trip the CB2, CB3, CB5 and CB6.

Possible solution #2.

- Fault occurred at the HBUS #2.
- 87B2 operated to trip the CB2, CB3, CB5 and CB6.
- CB3 failed to trip.
- 87B1 tripped the CB1, CB3 and CB4.

위의 두 가지 해는 단일 사고로 가정한 경우이고 다음 표 3에서 보는 바와 같이 다수의 해가 존재할 수 있다.

표 3. 가능 해
Table 3. Possible solutions

No.	사고 기기	부동작	오동작
1	HBUS #1	CB3	None
2	HBUS #2	CB3	None
3	HBUS #1	CB3	87B2
4	HBUS #2	CB3	87B1
5	HBUS #1 & #2	CB3	None
6	No fault	CB3	87B1, 87B2

표 3에서 언급한 바와 같이, 부동작과 오동작의 구분은 반드시 특정한 사고의 가정 하에서만 판단할 수 있다. 본 논문에서는 한국전력의 사고사례를 분석하여, 부동작과 오동작의 가능성을 다음과 같은 순위로 할당하였다.

$$p(\text{차단기 부동작}) > p(\text{계전기 부동작}) > p(\text{계전기 오동작}) > p(\text{다중사고})$$

전문가 시스템은 할당된 가능성을 기반으로 6개의 가능한 해를 도출하였다. 표 3에서, 1, 2번 해는 동일한 사고의 가능성을 보여주고 있는데, 이것은 보호기기의 동작 시간이 고려되지 않았기 때문이다. 만약 시간정보를 이용할 수 있다면, 전술한 두 개의 해중 한 개는 의미가 없게 된다. 시간정보는 감시제어 시스템의 SOE(Sequence of Events)를 사용하여 이용할 수 있으나, 대부분의 감시제어 시스템은 이것을 이용하지 않고 있으므로 본 논문의 전문가 시스템은 현재 시간 정보를 고려하지 않고 있다.

4. 사례연구

- 사례 : HBUS 사고
- 〈수신된 경보〉
- LINE(A, 2, 2)
- LINE(B, 3, 2)
- BUS-DIFF(C, 1)
- CB(A, 617, off)
- CB(B, 627, off)
- CB(C, 617, off)

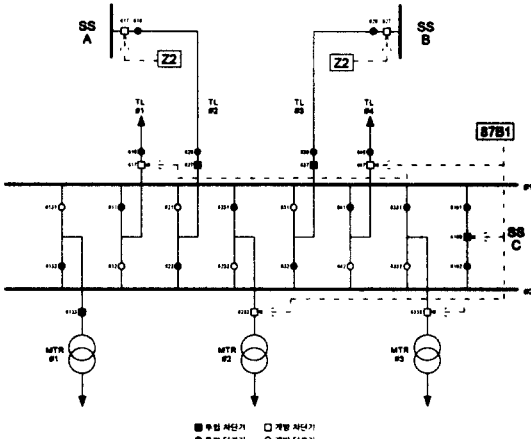


그림 4. 사례연구 대상 시스템
Fig. 4. Sample system for case study

CB(C, 647, off)
CB(C, 6233, off)
CB(C, 6333, off)

〈진단 결과〉

Possible solution No. 1

Fault occurred at the HBUS #1
87B1 tripped the CB617, CB647, CB6100,
CB6233 and CB6333

CB6100 failed to trip
Z2 of substation A tripped the CB617
Z2 of substation B tripped the CB627

Confidence : 0.95

5. 결론

본 논문에서는 다수의 무인 변전소를 관할하는 지역급전 분소에서의 운전자 지원을 위한 효율적인 고장진단 전문가 시스템을 개발하였다. 제안된 시스템은 변전설비 진단 시스템과 송전설비 진단 시스템 모듈로 구성된 분산적 계층구조를 취하고 있으며, 저가의 개인용 컴퓨터와 C 언어로 구현하였다.

제안된 시스템의 수행시간은 가장 복잡한 경우에

도 2초이내로서 실시시스템에 충분히 적용 가능함을 확인하였다. 실제로 발생한 50여 가지의 사례에 대하여 모의실험한 결과 실제의 사고원인과 전문가 시스템의 첫 번째 추론결과가 일치함을 확인하였다.

본 연구의 결과는 앞으로 SCADA 및 배전자동화 시스템 또는 변전소자동화 시스템에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 외국석학과 의 공동연구과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Chihro Fukui, Junzo Kawakami, "An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers," IEEE PWRD, Vol. PWRD-1, No. 4, pp. 83-90, Oct. 1986.
- [2] Kelvin Tomsovic, Chen Ching Liu, Paul Ackerman, Steve Pope, "An Expert System as a Dispatchers' Aid for the Isolation of Line Section Faults," IEEE PWRD Vol. 2, No. 3, pp. 736-743, July 1987.
- [3] Takafumi Kimura, Sinya Nishimatsu, Yoshiteru Ueki et al., "Development of an Expert System for Estimating Fault Section in Control Center based on Protective System Simulation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No.1, pp.167-172, Jan. 1992.
- [4] Y. M. Park, H. J. Lee, "An Expert System for the Fault Diagnosis in Power Systems," Journal of KIEE, Vol. 39, No. 1, pp. 16-21, Jan. 1990.
- [5] Yoichi Fuzimoto, Koji Ibuki, Shoji Tada, "Operation of an On-line Substation Diagnosis System," IEEE PWRD, Vol. 3, No. 4, pp. 1628-1634, Oct. 1988.
- [6] 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, April 1991.
- [7] Kumano, H. Ito, T. Goda et al, "Development of Expert System for Operation at Substation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 1, pp. 56-65, Jan. 1993.
- [8] B. Jeyasurya, S. S. Venkata, S. V. Vadari, J. Postforoosh, "Fault Diagnosis using Substation Computer", Proc. of CIGRE'89, pp. 289-295, 1989.
- [9] Z. Z. Zhang, G. S. Hope, O. P. Malik "Knowledge Based and Integrated Diagnosis in Transmission Substations", Third Symposium on ESAP, pp.413-418, 1991.
- [10] H. J. Lee, B. S. Ahn, Y. M. Park, "A Fault Diagnosis

Expert System for Distribution Substations", Submitted to IEEE tran, on PWRD

◇ 著 者 紹 介 ◇



이 흥 재(李興載)

1958년 1월 12일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 부교수.



김 광 원(金光源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 울산대 공대 전기공학과 전임강사



임 찬 호(林讚鎬)

1968년 8월 11일생. 1991년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.