

송전계통과 변전소의 통합 고장진단을 위한 퍼지 전문가 시스템

이흥재, 임찬호, 이철균*, 박동용, 안복신**
 (* 광운대 전기공학과, ** LG산전)

A Fuzzy Expert System for the Integrated Fault Diagnosis

Heung -Jae Lee, Chan-Ho Lim, Chul-Kyun Lee*, Deung-Yong Park, Bok-Shin Ahn**
 (* Kwangwoon University, ** LGIS)

Abstract - This paper presents a practical fuzzy expert system to diagnose various faults occurred in local power systems. This integrated system can diagnose all faults occurred in a transmission network and substations. In this paper, the fuzzy reasoning of the diagnostic process is discussed in detail. The discrimination of false operations and non-operations of protective devices as well as the fault identification scheme are also analyzed together with the fuzzy inference process.

1. 서 론

인공지능 기법을 전력시스템에 적용하기 위한 연구가 최근 20여년간 활발히 진행되어 왔으며, 특히, 전력시스템의 고장진단에 관련된 다양한 전문가 시스템이 발표되어 왔다. 고장진단은 주어진 정보집합으로부터 사고구간 또는 사고기기를 신속, 정확하게 판단하는 문제이며, 이에 대한 연구로는 Fukui[1]를 시발점으로 하여 주로 EMS, SCADA 시스템의 운용자 지원을 위한 송전망 고장진단 전문가 시스템에 관한 연구[1-3]가 진행되어 왔고, 최근에는 단위 변전소의 무인 자동화를 위한 단위 변전소의 고장진단 전문가 시스템[4-9]도 발표되고 있다. Protopapas[4]는 PC-SCADA 상에서 동작하는 전문가 시스템을 발표한 바 있으나 이는 유인변전소에서의 대화식 진단방법으로서 무인대상의 지능적 지식획득 기능이 없는 초보적인 형태이다. Venkata[5]는 디지털 보호 계전기를 중심으로 통합 제어 시스템인 ICPS(Integrated Control and Protection System)를 발표한 바 있다. 일본 관서전력에서는 500kV급[6]과 275kV급[7] 변전소에서의 사고발생시 전문가 시스템의 실시간 추론으로 사고종류와 사고구역 및 이상기기를 판단하고 그에 대한 복구대책까지 지원하는 운용자 지원 전문가 시스템을 발표한 바 있으며, 동경전력[8]에서는 실계통에서 시험중인 시스템으로서 고장판정 및 정전 복구 지원을 위한 종합적인 변전소 감독 시스템을 발표하였다. 또한 시코쿠 전력[9]에서도 프레임 구조의 전문가 시스템을 발표하였다.

최근에는 전문가 시스템의 성능향상을 모색하기 위한 방안으로서, 지식에 포함된 불확실성을 고려하여 불완전 추론(uncertain reasoning)을 수행하는 전문가 시스템이 발표되고 있는 상황이다. 현재까지 제안된 불완전 추론 기법을 요약하면, 송전계통의 고장진단에 확신도 기법(certainty factor)[10]을 적용한 전문가 시스템이 발표된 바 있으며, 불완전 추론기법인 퍼지이론을 변전소의 고장진단[11]과 송전선로의 고장진단[12]에 응용한 전문가 시스템이 발표된 바 있다.

본 논문에서는 불완전 추론기법인 퍼지추론을 이용하여 송전계통과 변전소에서의 고장진단을 수행하는 통합 고장진단 전문가 시스템을 개발하였다. 본 논문에서 제

안된 전문가 시스템은 송전망과 변전소에서 발생하는 다양한 사고 - 단일사고, 다중사고 - 를 진단하도록 하였으며, 오동작 또는 부동작 기기를 판정하도록 하였다.

본 논문에서 제안된 전문가 시스템은 효율성, 일반성 및 해의 신뢰성을 중심으로 설계되었다.

2. 퍼지추론을 이용한 고장진단

2.1 보호기기 동작의 퍼지관계 표현

변전소를 구성하는 변전설비들은 여러 개의 보호기기에 의하여 다중으로 보호되고 있다. 임의의 변전설비에 사고가 발생하면 주보호 계전기가 동작하고, 동작한 계전기는 차단기를 트립시켜 사고를 제거한다. 그러나 주보호 계전기 혹은 차단기가 부동작하면 후비보호 계전기의 동작으로 사고가 제거된다.

"변전설비에 발생한 사고는 계전기 동작의 원인이 되고, 차단기 동작의 원인은 계전기의 동작이다"라는 지식은 일반적으로 인지되고 있는 사실이다. 그러나 전술한 바와 같이 계전기 혹은 차단기의 부동작은 후비보호 계전기의 동작원인으로서 작용하고, 보호기기가 오동작할 경우도 존재한다. 따라서, "보호기기의 동작원인은 사고이다"라는 인과관계는 불확실성이 내포되어 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 대상과 대상 사이의 애매한 관계를 표현하는 퍼지관계를 도입하여 보호기기의 인과관계에 포함된 불확실성을 고려하였으며, 퍼지관계 정의는 다음 표 1과 같다.

표 1. 보호기기의 퍼지관계 표현

사고와 계전기 동작의 퍼지관계	사고
계전기 정동작	α_1
계전기 부동작	α_2
계전기 오동작	α_3

(a) 사고와 계전기 동작의 퍼지관계

계전기와 차단기 동작의 퍼지관계	계전기 동작
차단기 정동작	β_1
차단기 부동작	β_2

(b) 계전기와 차단기 동작의 퍼지관계

부동작과 후비보호의 퍼지관계	계전기 부동작	차단기 부동작
후비보호 정동작	α_1	α_1
후비보호 부동작	α_2	α_2

(c) 부동작과 후비보호 동작의 퍼지관계

부동작과 오동작의 구분은 반드시 특정한 사고의 가정 하에서만 판단할 수 있다. 본 논문에서는 한국전력의 사고 사례를 분석하여, 부동작과 오동작의 가능성을 다음과 같은 순위로 할당하였다.

pos(계전기정동작) > pos(차단기부동작) > pos(계전기부동작) > pos(계전기오동작) > pos(다중사고)

표 1에서 정의된 관계를 기반으로, 고장진단 문제를 퍼지관계로 표현하면 다음 그림 1과 같다.

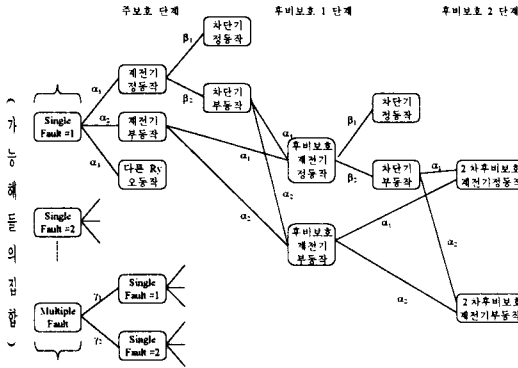


그림 1. 고장진단 문제의 퍼지관계 표현

그림 1에서 실선은 인과관계를 표현하고 있으며, 실선 위의 기호는 인과관계에 대한 소속함수를 표현한다.

2.2 퍼지추론 과정

그림 2는 가상의 사고구역에 대하여 퍼지추론 과정을 나타내고 있다.

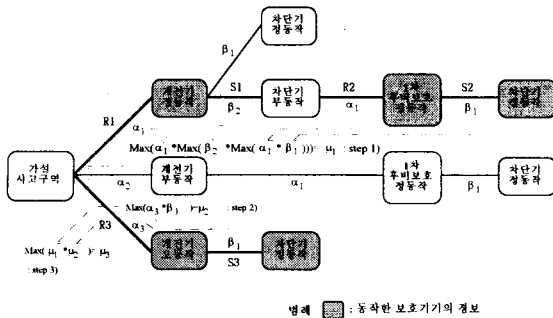


그림 2. 퍼지추론 과정의 예

위의 그림에서 회색부분은 정보가 발생한 보호기기의 동작정보이고, R1, S1, R2, S2, R3, S3는 각각 노드 사이의 퍼지관계를 표현한다. 이 상황은 계통에 발생한 사고에 대하여 주보호 계전기가 동작하였으나 차단기의 부동작으로 인하여 후비보호 계전기와 차단기가 동작한 경우이다.

퍼지추론 과정은 다음과 같은 3단계로 구성된다.

step 1) 보호기기의 동작과 관련하여 결정된 경로의 퍼지규칙에 대한 소속함수 계산

$$\mu_{(((R1\alpha_1)\alpha R2)\alpha S2)}(protective\ device,\ fault) = \text{Max}(\alpha_1 \times \text{Max}(\beta_2 \times \text{Max}(\alpha_1 \times \beta_1))) = \mu_1$$

이 과정에서 부동작한 보호기기를 판정하는데, 인과관

계를 만족하는 경로에 포함된 동작하지 않은 보호기기는 부동작한 기기로 판정한다.

step 2) 보호기기의 오동작과 관련된 경로의 퍼지 소속함수 계산

$$\mu_{(R3\alpha S3)}(protective\ device,\ fault) = \text{Max}(\alpha_3 \times \beta_1) = \mu_2$$

step 3) 추론된 사고구역에 대한 전체 소속함수의 계산

$$\mu(fault) = \text{Max}(\mu_{(((R1\alpha S1)\alpha R2)\alpha S2)} \times \mu_{(R3\alpha S3)}) = \text{Pos}(fault) = \text{Max}(\mu_1 \times \mu_2) = \mu_3$$

3. 퍼지 전문가 시스템

본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 다음 그림 3과 같이 4개의 부분으로 구성되어 있다.

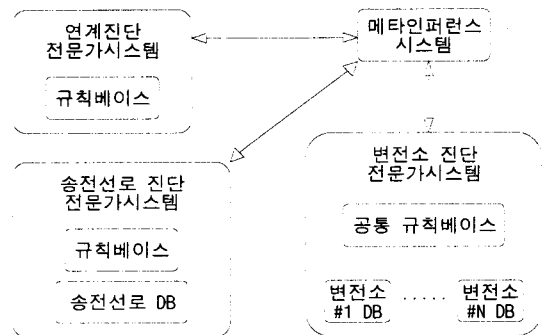


그림 3. 전문가 시스템의 구조

본 전문가 시스템은 사고발생 시 메타추론 시스템에서 어떤 진단 시스템을 운용할 것인가를 결정하고, 이에 따라 상황에 맞는 진단결과를 도출할 수 있다. 각각의 전문가 시스템은 자신만의 추론기관을 가지고 있고, 자신에 맞는 규칙베이스 및 데이터베이스로 구성되어 있으며, 각각의 시스템을 간략히 요약하면 다음과 같다.

메타추론 시스템

메타추론 시스템은 메타지식(meta inference)을 사용하여 다른 부분간 규칙의 적용 및 우선순위를 조정해주는 역할을 수행한다. 메타지식은 원칙적으로 사고로 인한 경고를 분석하고, 여러 전문가 시스템 중 어떤 시스템을 선택할 것인가를 결정하며, 정상상태에서는 제어 권한을 원격제어 및 원격감시 기능을 수행하는 프로그램으로 인계한다.

연계진단 시스템

연계진단 시스템은 154kV 모선 또는 주변압기의 고장 그리고 보호 계전기와 차단기의 부동작으로 인하여 정전구역이 변전소 외부로 확대되는 경우에 동작하게 된다. 즉, 연계진단 시스템은 송전망과 변전소를 연계한 고장진단을 수행된다.

변전소 고장진단 전문가 시스템

변전소 진단 시스템은 변전설비의 사고여파가 외부로 확산되지 않고 변전소 내부로 한정될 경우에, 고장진단을 수행한다.

그림 3에서 보는 바와 같이, 변전소 진단 전문가 시스템은 위상구조 기반의 일반적인 규칙들로 구성된 공통의

규칙 베이스와 단위 변전소를 표현하기 위한 데이터베이스를 가지고 있다. 본 논문에서는 변전소 고장진단 과정에서 다음과 같은 7개의 보호 계전기를 고려하였다.

1. 과전류 계전기
2. 버스 보호 계전기(87B)
3. 변압기 차동 계전기(87T)
4. Lockout 계전기
5. 부호흡쓰 계전기
6. 압력 밸브(Pressure valve)
7. 급속 압력 계전기(Sudden pressure relay)

송전망 고장진단 전문가 시스템

송전망 진단 시스템은 송전망에서 발생하는 다양한 사고를 진단한다. 송전선로에서 발생한 사고는 선로보호 계전기에 의해 차단될 수 있으며, 본 전문가 시스템은 선로보호 계전기의 동작정보를 이용하여 고장진단을 수행한다.

본 논문에서는 전형적인 거리 계전기(Z1, Z2, Z3)를 고려하고 있으며, 주보호 기능은 Z1 계전기가 수행하며, 후비보호 기능은 Z2, Z3 계전기가 수행한다.

4. 사례연구

그림 4의 모의 시스템을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 그림 4는 사고가 발생하여 계전기 및 차단기가 동작한 결과를 나타내고 있으며, 진단결과는 표 2에 요약하였다.

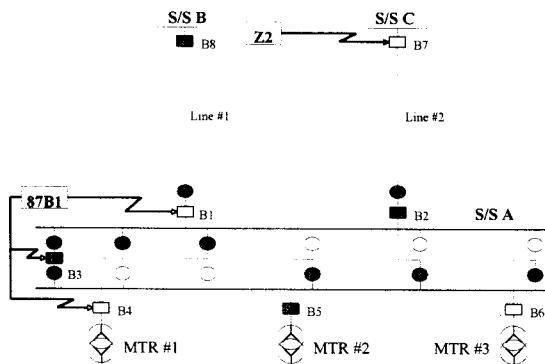


그림 4. 모의 계통

<동작한 보호기기>

A 변전소 : 87B1, CB1, CB4

C 변전소 : Z2, CB7

표 2. 고장진단 결과

사고	오동작	부동작	가능성	순위
HBUS#1		S/S A:CB3	0.95	1
HBUS#2	S/S A:87B1	S/S A:87B2, CB3	0.68	3
LINE#2	S/S A:87B1	S/S A:Z1, Z2, CB3	0.62	4
HBUS#1		S/S A:87B2, CB3	0.69	2
HBUS#1 LINE #2		S/S A:Z1, Z2, CB3	0.62	4
HBUS#2 LINE#2	S/S A:87B1	S/S A:87B2, Z1, Z2, CB3	0.45	8
HBUS#1 HBUS#1 LINE#2		S/S A:87B2, Z1, Z2, CB3	0.50	7
No Fault	S/S A:87B1 S/S C:Z2	S/S A:CB3	0.61	6

4. 결 론

본 논문에서는 지역급전 분소에서의 SCADA 시스템 운전자 지원을 위한 실시간 퍼지 고장진단 전문가 시스템을 개발하였다. 제안된 전문가 시스템은 퍼지추론을 이용하여 송전계통과 다수의 변전소에서 발생하는 다양한 사고를 진단할 수 있도록 하였다. 또한 본 논문에서는 퍼지추론 과정과 더불어 다중사고의 구분, 오동작 또는 부동작한 보호기기의 판정에 관하여 논의하였다.

제안된 전문가 시스템은 가장 복잡한 경우에도 진단시간이 1초 이내로서 실제통에 충분히 적용가능 함을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 전문가 시스템은 1994년부터 의정부 전력소에서 시험운용 중에 있는 전문가 시스템을 더욱 개선한 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Chihiro Fukui, Junzo Kawakami, "An Expert System for Fault Section Estimation using Information from Protective Relays and Circuit Breakers.", IEEE Trans. on PWRD, Vol. PWRD-1, No. 4, pp. 83-90, 1986.
- [2] Kevin Tomsovic, Chen Ching Liu, Paul Ackerman, Steve Pope, "An Expert System as a Dispatchers Aid for the Isolation of Line Section Faults.", IEEE Trans on PWRD, Vol. 2, No. 3, pp. 736-743, 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, 1992.
- [4] 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.
- [5] B. Jeyasurya, S. S. Venkata, S. V. Vadari, J. Postforoosh, "Fault Diagnosis using Substation Computer.", Proc. of CIGRE'89, pp. 289-295, 1989.
- [6] Shunichi Ito, Isao Hata, Taizo Hasegawa et. al., Advanced Operation Guidance Expert System for 500kV Substation, Third Symposium on ESAP, pp. 405-412, 1991, Japan.
- [7] Kazuo Hamamoto, Masakazu Osada, Haruki Oue et. al., 275KV Substation Operation Support System, Third Symposium on ESAP, pp. 419-426, 1991, Japan.
- [8] Syoichi Muto, Tetsuo Matsuda et. al., Supervisory System for Substation with Expert System, Third Symposium on ESAP, pp. 413-418, 1991, Japan.
- [9] S. 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.
- [10] Y. M. Park, H. J. Lee, An Expert System for the Fault Diagnosis in Power Systems, IFAC on PSPPC, pp. 697-701, Aug. 1989.
- [11] H. J. Lee, B. S. Ahn, Y. M. Park, A Fault Diagnosis Expert System for Distribution Substation, submitted and accepted for IEEE Trans. on PWRD.
- [12] H. J. Cho, J. K. Park, H. J. Lee, A Fuzzy Expert System for Fault Diagnosis of Power Systems, Proc. of the International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, pp. 217-222, Sep. 1994, France.