

유중 가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장 진단 전문가 시스템

(A Fault Diagnostic Expert System for Power Transformers
Using Dissolved Gas Analysis)

尹龍漢* · 金載哲**
(Yong-Han Yoon · Jae-Chul Kim)

요 약

본 연구에서는 유중 가스 분석법으로 전력용 변압기의 고장 진단을 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 유중 가스 분석법을 적용할 때 나타나는 가스 구성비 및 주요 가스 판정 기준, 고장 진단 규칙의 불확실성은 퍼지 집합 및 퍼지 척도를 이용하여 처리하였다. 또한 변압기의 고장 진단 결과는 사고 및 정상을 나타내는 정량화된 지수로 표현하였다. 제안된 고장 진단 전문가 시스템은 한국 전력 공사의 변압기 유중 가스 기록으로 효용성을 입증하였다.

Abstract

This study develops a fault diagnostic expert system for power transformers using dissolved gas analysis. The uncertainty of gas ratio analysis and key gas analysis in dissolved gas analysis are managed by using a fuzzy set. Also, the uncertainty of the fault diagnostic rules in dissolved gas analysis is handled by using fuzzy measures. To show the diagnostic results as the numerical index, we make the numerical index which presents fault and normal state degree of power transformers. To verify the effectiveness of the proposed fault diagnostic expert system, it has been tested by using the historical gas records to power transformers of Korea Electric Power Corporation.

1. 서 론

전력 설비에 있어서 전력용 변압기는 전력 계

통의 중요한 구성 요소이며 전력의 안정 공급을 위한 역할이 매우 크고, 특히 기간 계통에 있어서는 높은 신뢰도를 유지할 필요가 있다. 그러나 국내의 전력 설비 사고중 전력용 변압기가 차지하는 비율은 약 30[%]이기 때문에 이와 관련된 고장 진단 기술의 확보는 절실한 편이다. 일반적으로 전력용 변압기는 운전중에 각 부분의 열화

*正會員：崇實大學校 生産技術研究所 研究員

**正會員：崇實大學校 電氣工學科 教授

接受日字：1997年 1月 6日

등으로 전기, 기계적인 성능이 저하되어 이상이 발생된다. 따라서 전력용 변압기의 사고를 미연에 방지하기 위해서는 이상의 징후를 초기 단계에서 검출하여 이상의 내용을 정확히 파악하고 대책을 수립해야 한다.

전력용 변압기의 고장 진단 방법으로써 유중 가스 분석법은 절연유중에 용해되어 있는 가스의 분석으로 내부의 이상 유무 및 이상의 종류를 진단하는 방법으로 1960년대에 연구가 추진되어 1970년대에 실용화되었으며, 현재 세계적으로 널리 이용되고 있다.^{1~5)} 그러나 유중 가스 분석법은 진단 결과에 영향을 미치는 요인과 이상 판정 기준이 다양하기 때문에 현실적으로 적용하기 어렵고, 전문적인 지식을 요구하기 때문에 경험적인 판단으로 처리되고 있다. 따라서 유중 가스 분석법을 이용한 전력용 변압기의 고장 진단은 지식 베이스에 기초한 전문가 시스템을 적용하는 연구가 다수 제시되고 있다.^{6~8)} 그러나 지금까지 연구된 결과들은 유중 가스 분석법에 따른 고장 판정에 수학적인 절대 기준을 사용하고, 이를 극복하기 위한 지식 베이스적인 접근에서는 규칙 자체의 불확실성(uncertainty)이 고려되지 않은 문제점을 지니고 있다.

본 연구에서는 유중 가스 분석법의 문제와 전문가의 지식을 규칙화하는 과정에서 나타나는 불확실성을 처리한 전력용 변압기의 고장 진단을 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 유중 가스 분석법에 적용되는 가스 구성비 및 주요 가스 판정 기준의 경계 부근과 지식으로 표현되는 고장 진단 규칙에는 불확실성이 내포되어 있어 정확한 진단을 위해서는 불확실성의 처리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 가스 구성비 및 주요 가스 판정 기준의 경계에서 나타나는 불확실성은 퍼지 집합으로, 고장 진단 규칙의 불확실성은 퍼지 척도를 이용하여 처리하였다. 또한 전력용 변압기의 고장 진단 결과는 사고 및 정상을 나타내는 정량화된 지수로 표현하였다. 제한된 전력용 변압기 고장 진단을 위한 전문가 시스템은 한국 전력 공사의 변압기 유중 가스 기록으로 효용성을 입증하였다.

2. 유중 가스 분석법

전력용 변압기 내부에서 이상(부분 방전, 절연 파괴, 국부 과열 등)이 생기면 반드시 열 발생이 수반된다. 이때 열원에 접촉된 절연 재료(절연유, 절연지, press board, bakelite 등)는 열 분해되어 H_2 (수소), CH_4 (메탄), C_2H_2 (아세틸렌), C_2H_4 (에틸렌), C_2H_6 (에탄), CO (일산화탄소), CO_2 (이산화탄소), O_2 (산소), N_2 (질소) 등의 가스가 발생하며, 발생 가스는 대부분 절연유중에 용해된다. 그러므로 전력용 변압기에서 절연유를 채취하여 유중 가스를 분석하면 발생 가스, 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 유중 가스 분석법을 이용한 전력용 변압기 고장 진단 방법으로는 다음과 같은 것이 대표적이다.

- ① 가스 구성비를 이용한 분석^{2, 3)}
- ② 주요 가스를 이용한 분석^{4, 5)}

이와 같은 분석 기준은 전력용 변압기 각각의 전압, 용량, 절연유 열화 방지 방식, 운전 경력에 따라 서로 다르므로 해당 전력용 변압기의 유중 가스 분석 결과에 따라 어떻게 판정하는가는 매우 어려운 문제이다. 그러므로 유중 가스 분석으로 고장 진단을 수행하는데 있어서는 이들 몇 가지 방법을 병용하는 것이 효과적이다.

2.1 가스 구성비를 이용한 분석

유중 가스 분석법의 가스 구성비를 이용한 분석은 다양하지만 대표적으로 사용되는 것은 IEC¹⁾, Rogers²⁾, Dornenburg⁶⁾ 규칙 등이 있다. IEC 규칙은 3종류의 가스 구성비를 사용한 것이며, 가스 성분의 비율(C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6)에 따라 코드가 부여된 후 이상의 종류를 결정하는 방법으로 진단 유형의 종류는 총 9종이다. 진단 내용의 종류로는 크게 경년 열화(정상), 부분 방전(방전 사고), 아크 방전(방전 사고), 과열(온도 사고)로 나눌 수 있다. 이 방법은 이상의 유형을 설명할 수 있는 기준이 다양하다는 것에 장점이 있다.

2.2 주요 가스를 이용한 분석

전력용 변압기에서 내부 사고가 발생하는 요인은 절연유 과열, 유중 아크 분해, 고체 절연물 과열 및 고체 절연물 아크 분해 등을 생각할 수 있다. 일반적으로 이와 같은 이상의 종류에 따른 발생 가스는 표 1과 같다⁴⁾. 표 1의 내용을 근거로 한국 전력 공사에서는 가스 구성비에 의한 판정이 아닌 주요 가스 성분에 따른 기준으로 규격을 설정하고 있다⁵⁾. 이 방법은 발생 가스의 성분을 조사함으로써 이상 판정이 용이하다는 것에 장점이 있다.

표 1. 이상의 종류에 따른 발생 가스
Table 1. Generated gases related to the abnormal types

이상의 종류 가스의 종류	절연유 과열	고체 절연물 과열	유중아크 분해	고체 절연물 아크 분해
수소(H ₂)	○	○	◎	◎
메탄(CH ₄)	◎	◎	○	○
에탄(C ₂ H ₆)	○	○	—	—
에틸렌(C ₂ H ₄)	◎	◎	○	○
아세틸렌(C ₂ H ₂)	—	—	◎	◎
일산화탄소(CO)	—	◎	—	◎
이산화탄소(CO ₂)	—	◎	—	◎

주) ◎ : 심한 이상에 대한 특징적인 발생 가스를 표시
○ : 심하지 않은 이상에 대한 특징적인 발생 가스를 표시
— : 이상과 큰 관계가 없는 발생 가스를 표시

2.3 문제점 및 대책

지금까지 유중 가스 분석법에 의한 전력용 변압기의 고장 진단 방법에 대하여 고찰하였다. 가스 구성비 분석과 주요 가스 분석을 통하여 전력용 변압기의 고장 진단을 수행할 수 있지만 현장에 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다.

실제로 주요 가스 분석에서 C₂H₂의 한국 전력 공사 규격을 적용하면 정상과 요주의의 경계는 20[ppm]이다. 즉, 19[ppm]은 정상으로, 21[ppm]은 요주의로 분류된다. 단, 2[ppm]의 차이로 전력용 변압기의 상태가 정상과 요주의로 나누어지지만 유중 가스의 측정 방법에 따라 가

스 데이터의 오차가 발생됨을 고려할 때 주어진 결과에 대한 정확한 판단은 어려운 문제이다. 가스 구성비에 의한 분석의 경우는 표 2에 나타난 것과 같은 문제가 발생할 수 있다. 즉, IEC 규격에 기초하여 3종류의 가스 비율 조합으로 코드를 구했지만 부합되는 진단 유형이 없을 수도 있는 문제점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 가스 구성비 분석과 주요 가스 분석을 결합한 고장 진단 규칙을 적용하는 연구가 제시되고 있지만 규칙 자체가 가지고 있는 불확실성이 고려되지 않은 모순을 가지고 있다. 결론적으로 유중 가스 분석에 의한 열화 판정 및 진단 결과는 정성적인 수준에 지나지 않으며, 정량적으로 구체적인 수치를 표시하지 못하는 단점을 지니고 있어 현장에서 활용하기에는 곤란한 점이 많다.

따라서 가스 구성비 및 주요 가스 판정 기준의 경계 부근과 지식으로 표현되는 고장 진단 규칙의 불확실성을 고려해야 한다. 즉, 퍼지와 같은 불확실성을 처리할 수 있는 이론의 적용으로 고장 진단 규칙을 생성하고, 규칙을 조합하는 추론 과정에서도 불확실성이 고려된 연산을 수행해야 한다.

표 2. IEC 규격에 의한 가스 구성비 분석의 예
Table 2. Example of gas ratio analysis by the criteria of IEC

(단위 : (PPM))

가스량		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
		20,000	150	50	32	4	110	22
IEC	판정	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		CH ₄ /H ₂		C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
	종류	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		CH ₄ /H ₂		C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
	구분	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		CH ₄ /H ₂		C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
	비율	0.04		0.64		5.00		
	코드	0		0		2		
	판정	unknown						

3. 지식 베이스의 구축

전문가 시스템은 전문가의 지식과 경험을 규칙화해서 컴퓨터 프로그램화한 것으로 전문가와 비슷한 결과를 얻는데 목적을 두고 있다. 그러나 전문가의 지식은 추상적이기 때문에 전문가 시스템은 부정확, 불확실, 불완전한 데이터에 대한

처리가 뛰어난 전문가의 장점을 이용하지 못하고 있다. 본 연구에서는 전문가의 추상적인 지식을 수식적인 표현으로 적절히 변환하기 위하여 불확실성을 취급할 수 있는 퍼지 이론(퍼지 집합, 퍼지 척도)을 도입하여 지식 베이스의 고장 진단 규칙을 구축하였다.

3.1 규칙의 형태

본 연구에서는 생성 규칙을 이용한 지식 표현 방법을 사용하였다. 이 방법은 지식을 조건과 조건의 만족시 수행되는 행동의 쌍으로 나타내며 일반적으로

IF <condition>
THEN <action>

의 형식으로 표현된다. 이 방법은 모든 지식이 통일된 형태로 표현되므로 지식의 첨가와 제거 및 변경이 용이하고, 서술적인 지식을 표시하기에도 적당하다. 본 연구에서의 고장 진단 규칙은 일반적인 생성 규칙에 퍼지 집합과 퍼지 척도를 이용하였으며, 자료 구조의 linked list 기법을 적용하여 프로그래밍 하였다. 구성된 규칙의 형태는 그림 1과 같다.

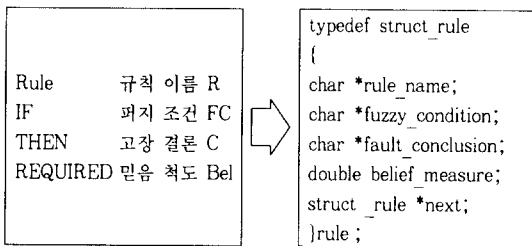


그림 1. 고장 진단 규칙의 형태
Fig. 1. Type of fault diagnostic rules

본 연구에서는 그림 1의 고장 진단 규칙의 형태에 따라 가스 구성비 규칙 20개와 주요 가스 규칙 25개를 IEC 규격과 한국 전력 공사 규격에 기초하여 작성하였다. 고장 진단 규칙에 나타나는 퍼지 조건은 퍼지 집합을, 규칙의 확신 정도를 표시하는 믿음 척도는 퍼지 척도를 이용하였다. 이와 같은 퍼지값은 다양한 사례 연구를 통

하여 결정하였다. 마지막으로 고장을 나타내는 결론은 IEC 진단 유형에 기초하여 normal(정상), partial discharge(부분 방전), arcing discharge(아크 방전), thermal(온도)로 설정하였다. 본 연구에서 사용하고 있는 고장 진단 규칙은 and 조건으로 연결된 것이 아닌 단일 조건에 의한 단일 결론으로 설계되어 있다.

3.2 퍼지값의 부여

3.2.1 퍼지 집합

퍼지 집합의 원소는 소속 정도와 원소의 한쌍으로 나타내며 소속 정도는 다음과 같다.

$$\mu: X \rightarrow [0, 1] \tag{1}$$

퍼지 집합 A에 대하여

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \tag{2}$$

여기서, X는 전체 집합이고, μ_A 는 불확실성의 정도이다. 본 연구에서는 효과적인 소속 정도를 설정하기 위해 Dombi의 제안 방법을 이용했다. 이 방법은 계수의 조정을 통해 사용자가 원하는 소속 정도를 설정할 수 있는 장점이 있으며, 수식은 식 (3)과 같다.^{7, 8)}

$$\mu(x) = \frac{(1-\nu)^{a-1} (x-a)^{a-1}}{(1-\nu)^{a-1} (x-a)^{a-1} + (\nu)^{a-1} (b-x)^{a-1}} \tag{3}$$

여기서, a는 구간의 하한치(lower limit), b는 구간의 상한치(upper limit), λ 는 변화율(transition rate), ν 는 굴절점(inflexion point)이다. 변화율 λ 와 굴절점 ν 의 효과를 보이기 위해서 $a=0$,

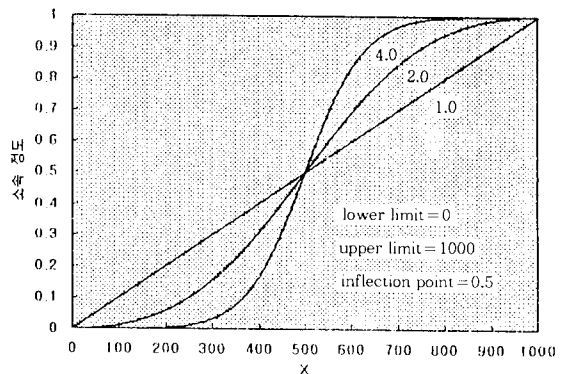


그림 2. λ 의 변화에 따른 소속 정도
Fig. 2. Membership degree with varying λ

b=1,000으로 설정한 상태에서 ν 를 0.5로 고정시킨 후 λ 를 1.0, 2.0, 4.0 으로 변화시켜 그림 2에 나타내었고, λ 를 4.0 으로 고정시킨 후 ν 를 0.10, 0.25, 0.50 으로 변화시켜 그림 3에 나타내었다.

본 연구에서는 가스 구성비 분석과 주요 가스 분석에 필요한 소속 정도를 결정하기 위해서 식 (3)을 이용하였다. 표 3은 가스 구성비 분석에 적용되는 CH₄/H₂에 관한 파라미터(a, b, λ , ν)를 나타내고 있다. 이 때 'ONE'과 'ZERO 좌측'은 IEC의 CH₄/H₂ 코드 규격 ONE과 ZERO의 좌측 경계에 적용되고, 'ZERO 우측'과 'TWO'는 ZERO의 우측과 TWO의 경계에 적용되는 파라미터이다. 즉, a와 b 사이의 구간에서는 식 (3)의 이용으로 해당되는 코드의 소속 정도를 구한다. 그림 4는 표 5의 CH₄/H₂에 관련된 파라미터를 이용한 소속 정도의 예를 그래프로 표시한 것이다.

표 4는 주요 가스 분석에 적용되는 H₂에 관한 파라미터를 나타내고 있다. 이 때 '정상'과 '요주의 좌측'은 한국 전력 공사의 H₂규격 정상과 요주의 좌측 경계에 적용되고, '요주의 우측'과 '사고'는 요주의 우측과 사고의 경계에 적용되는 파라미터이다. 역시 a와 b사이의 구간에서는 식 (3)의 이용으로 해당되는 소속 정도를 구한다.

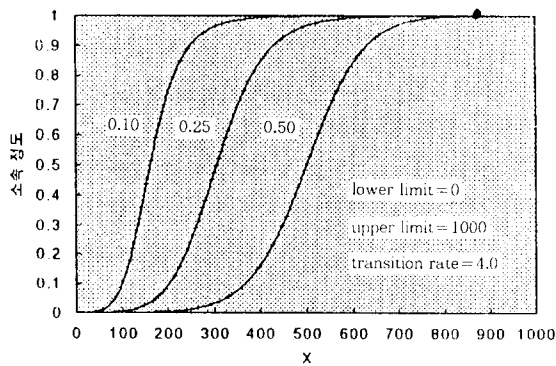


그림 3. ν 의 변화에 따른 소속 정도
Fig. 3. Membership degree with varying ν

표 3. CH₄/H₂에 관한 파라미터의 설정
Table 3. Determination of parameter to CH₄/H₂

구분	ONE	ZERO 좌측	ZERO 우측	TWO
a	0.35	0.06	1.10	0.75
b	0.06	0.12	0.75	1.16
λ	4.0	2.0	2.0	4.0
ν	0.9	0.5	0.5	0.8

3.2.2 퍼지 척도

고장 진단 전문가가 가지고 있는 지식은 애매함이 없이 정확하게 표현되는 경우는 매우 적고, 거의 필연적으로 불확실성이 내포되어 있다. 따라서 수학적 논리와 같이 오직 참이나 거짓이나만을 취급하는 결정론적(deterministic)인 방법으로는 지식을 표현하는 과정에서 나타나는 불확실성을 취급할 수 없다. 본 연구에서는 고장 진단 규칙의 설계시 나타나는 불확실성을 퍼지 척도중의 믿음 척도로 표현하여 고장 진단의 추론 과정에서 고려될 수 있도록 처리하였다.

퍼지 척도를 나타내는 함수 f 는 일반적으로 다음과 같이 정의할 수 있다.”

$$f: P(X) \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

여기서, $P(X)$ 는 전체 집합 X 의 부분 집합을 포함한 멱집합(power set)이다. 함수 f 는 X 의 부분 집합 A 에 실수값으로 표시되는 퍼지 척도 $f(A)$ 를 부여한다. 즉, 퍼지 척도는 각 원소의 값이 퍼지값을 갖는 것이 아니고, 원소가 포함된 집합이 퍼지값을 갖는다. 퍼지 척도는 다음과 같은 세가지 조건을 만족해야만 한다.

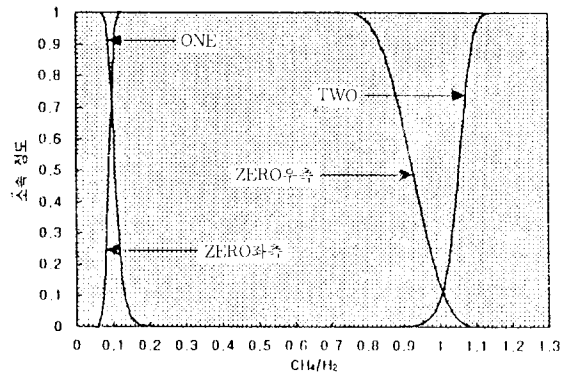


그림 4. CH₄/H₂의 소속 정도
Fig. 4 Membership degree of CH₄/H₂

표 4. H₂에 관한 파라미터의 설정
Table 4. Determination of parameter to H₂

구분	정 상	요주의 좌측	요주의 우측	사 고
a	440	370	850	750
b	350	450	750	850
λ	4.0	2.0	2.0	4.0
ν	0.7	0.5	0.5	0.7

· 경계 조건: $f(\phi) = 0$ and $f(X) = 1$ (5)

· 단조성: 모든 $A, B \in P(X)$ 에 대해,
 $A \subseteq B$ 이면 $f(A) \leq f(B)$ 이다. (6)

· 연속성: $A_1 \subseteq A_2 \subseteq \dots$ 이면
 $\lim_{i \rightarrow \infty} f(A_i) = f(\lim_{i \rightarrow \infty} A_i)$ 이다. (7)

퍼지 척도는 식 (5), 식 (6), 식 (7)의 세가지 정의를 만족하고, 식 (8)을 만족하면 믿음 척도(belief measure) Bel이 되고, 식 (9)를 만족하면 근사 척도(plausibility measure) Pl이 된다. 즉, 믿음 척도라는 것은 확실히 믿음이 가는 정도를 나타내고, 근사 척도라는 것은 있을 수 있는 모든 가능성을 나타내는 정도라는 것을 알 수 있다.

$$\text{Bel}(\bigcup_{i=1}^n A_i) \geq \sum_{i=1}^n \text{Bel}(A_i) - \sum_{i < j} \text{Bel}(A_i \cap A_j) + \dots + (-1)^{n+1} \text{Bel}(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) \quad (8)$$

$$\text{Pl}(\bigcup_{i=1}^n A_i) \leq \sum_{i=1}^n \text{Pl}(A_i) - \sum_{i < j} \text{Pl}(A_i \cup A_j) + \dots + (-1)^{n+1} \text{Pl}(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \quad (9)$$

Bel(A), Pl(A)으로 표현된 믿음 척도와 근사 척도는 식 (10), 식 (11)로 계산된다.

$$\text{Bel}(A) = 1 - \text{Pl}(A) \quad (10)$$

$$\text{Pl}(A) = 1 - \text{Bel}(A) \quad (11)$$

한편, 믿음 척도, 근사 척도, 확률의 관계를 식 (12), 식 (13), 식 (14), 식 (15)로 나타내었다.

$$\text{Bel}(A) + \text{Bel}(A) \leq 1 \quad (12)$$

$$\text{Pl}(A) + \text{Pl}(A) \geq 1 \quad (13)$$

$$\text{P}(A) + \text{P}(A) = 1 \quad (14)$$

$$\text{Pl}(A) \geq \text{P}(A) \geq \text{Bel}(A) \quad (15)$$

본 연구에서 사용한 퍼지 척도는 다음과 같이 정의하였다. 이것은 좀 더 복잡한 문제로 접근하기 위한 한가지 방법론이다.

$$m : P(X) \rightarrow [0, 1] \quad (16)$$

$$\text{만족 조건} : m(\phi) = 0 \text{ and } \sum_{A \in P(X)} m(A) = 1 \quad (17)$$

여기서, $m(A)$ 는 집합 A의 증거로 해석할 수 있고, 기본 할당(basic assignment)으로 불린다. 기본 할당에 따라 믿음 척도와 근사 척도를 다음과 같이 정의할 수 있고, 역으로 $m(A)$ 를 구할 수도 있다.

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (18)$$

$$\text{Pl}(A) = \sum_{B: A \cap B \neq \phi} m(B) \quad (19)$$

$$m(A) = \sum_{B \subseteq A} (-1)^{|A-B|} \text{Bel}(B) \quad (20)$$

여기서, $|\cdot|$: cardinality이다.

본 연구에서 적용하고 있는 고장 진단 규칙의 믿음 척도 값은 전술한 것처럼 다양한 사례 연구를 통하여 결정하였고, 구체적인 이용은 추론 과정에서 기술된다.

4. 고장 진단을 위한 추론

본 연구의 추론 부분은 취득한 유증 가스를 근거로 지식 베이스의 고장 진단 규칙을 적용해서 각 고장 명집합의 근사 척도를 구한 후, 고장 명집합의 근사 척도를 바탕으로 전력용 변압기의 현 상태(정상, 요주의, 이상) 판정 및 사고와 정상에 해당되는 믿음 척도를 출력하는 것이 주목적이다. 만약 전력용 변압기의 상태가 이상으로 판정된다면 어떠한 이상인지도 조사한다. 이와 같은 진단을 위해서는 불확실성이 고려된 규칙의 퍼지 연산(여집합, 교집합, 합집합) 과정이 필수적이다.

4.1 퍼지 연산

퍼지 집합 A의 여집합을 $\mu_c(x)$ 라고 하면, 즉 $C = A^c$ 이면,

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x), \quad x \in X \quad (21)$$

교집합 $C = A \cap B$ 는,

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (22)$$

합집합 $C = A \cup B$ 는,

$$\mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (23)$$

일반적인 \min , \max 함수는 실제 사람이 적용하는 논리와 상이하므로 본 연구에서는 식 (24)와 같은 퍼지 연산자를 사용했다.^{10, 11)}

$$\mu_c(x) = \frac{1}{1 + \left(\left(\frac{1}{\mu_A(x)} - 1 \right)^\lambda + \left(\frac{1}{\mu_B(x)} - 1 \right)^\lambda \right)^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (24)$$

여기서, $\lambda < 0$ 이면 $C = A \cup B$ 가 되고, $\lambda > 0$ 이면 $C = A \cap B$ 가 된다. $|\lambda|$ 가 무한대로 가면 일반적인 연산을 하고, 0에 가까울수록 λ 의 영향이 커서 교집합의 값은 더욱 작게하고, 합집합의 값은 더욱 크게 한다. 본 연구에서는 교집합의 λ 값을 0.9로, 합집합의 λ 값을 -0.7 로 설정하였다. 0.4와 0.7의 교집합, 합집합을 일반적인 \min , \max 방법과 본 연구에서 사용한 연산자와 비교하면 표 5와 같다.

표 5. 퍼지 연산자의 예
Table 5. Example of fuzzy operator

0.4 \cap 0.7	min	$\lambda = 0.9$	$\lambda = 0.7$	$\lambda = 0.5$
	0.4	0.328015	0.288551	0.220646
0.4 \cup 0.7	max	$\lambda = -0.9$	$\lambda = -0.7$	$\lambda = -0.5$
	0.7	0.761153	0.793190	0.846022

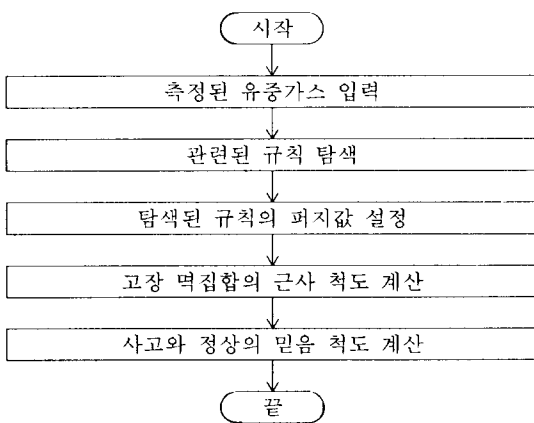


그림 5. 추론 절차에 관한 순서도
Fig. 5. Flowchart to inference sequence

4.2 추론 과정

본 연구의 추론 제어 전략은 후방향 추론 (backward chaining inference)을 사용하였으며, 탐색 방법은 고장 노드가 생성되어 있는 순서대로 확장시키는 넓이 우선 탐색 (breadth first search) 방법을 사용하였다. 고장 먹집합은 정상, 부분 방전, 아크 방전, 온도를 전체 집합으로 하는 먹집합으로 구성하였으며, 고장 먹집합과 관계된 규칙들을 식 (25)로 결합하여 고장 먹집합의 근사 척도를 구한다.^{10, 11)}

$$PI^k(C_i) = PI^{k-1}(C_i) \cap (FC_i \cup Bel_i) \quad (25)$$

식 (25)에서 FC 는 규칙 R 의 조건절 퍼지값이고, Bel 은 믿음 척도이다. i 는 취득한 유증 가스 데이터로 적용할 수 있는 동일 결론을 갖는 고장 진단 규칙들을 의미하고, k 는 i 의 수를 나타내기 때문에 식 (25)는 동일 결론의 i 를 변화시키면서 k 번 만큼 반복된 추론 연산을 수행하게 된다. 이때 근사척도의 초기값 $PI^0(\cdot)$ 는 1.0으로 설정한다. 예를 들어 현재 취득된 유증 가스 데이터를 통해서 적용할 수 있는 규칙중 '정상'의 결론을 가진 규칙이 4개 존재한다면 정상에 관계된 근사 척도를 구하기 위해서 식 (25)는 4번 반복 수행된다. 즉 PI^0 (정상)의 값이 정상에 해당되는 근사 척도의 값이다. 식 (24)의 이용으로 퍼지 연산을 수행하면 믿음 척도가 낮은 규칙이 최종 결론에 적은 영향을 미치도록 하고, 같은 결론에 많은 증거가 수집되면 근사 척도가 커지도록 정식화된다. 즉, 취득한 유증 가스 데이터를 식 (3)의 이용으로 조건절의 퍼지값인 FC 를 구하고, FC 와 규칙의 믿음 척도 Bel 에 기초한 고장 결론 C 의 퍼지값은 식 (25)의 이용으로 결정된다. 고장 결론 C 의 퍼지값이 고장 먹집합의 근사 척도가 된다. 따라서 고장 먹집합의 근사 척도를 구함으로써 믿음 척도와 근사 척도의 관계를 이용하여 사고와 정상의 믿음 척도를 구할 수 있다. 이에 관계된 추론의 순서도는 그림 5와 같다.

5. 사례 연구

제안된 고장 진단 전문가 시스템의 효용성을 검증하기 위해서 본 연구에서는 한국 전력 공사의 협조로 취득한 1991년부터 1995년 사이의 전

표 6. 사례연구 1

Table 6. Case study 1 [단위:PPM]

가스량	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
판정	948	23	29	319	0	927	185
IEC	thermal(>700[°C] thermal fault)						
Rogers	unknown						
KEPCO 판정결과	이상						
제안한 방법	이상(온도)						
	사고의 믿음 척도 : 0.64			정상의 믿음 척도 : 0.23			

력용 변압기 유중 가스 데이터 4,000여건을 사례 연구 대상으로 선정하였다. 사고 데이터 100여개, 요주의 데이터 6,00여개, 정상 데이터 3200여개를 기초로 전력용 변압기의 고장 진단에 대한 추론의 정확성을 검증하였으며, 그 중 대표적인 사례 연구는 다음과 같다.

5.1 사례 연구 1

사례 연구 1에서 사용한 유중 가스 데이터와 그에 따른 진단 결과는 표 6과 같다.

IEC 규격은 온도 사고를 나타내고, Rogers 규격은 일치되는 것이 없다. 그러나 가스 구성비 및 주요 가스를 통해서 분석할 때 온도 사고이므로 한국 전력 공사에서는 이상으로 판정했고, 본 연구에서 제안한 추론 방법에서도 같은 결과를 얻었다. 지식 베이스를 통해 얻은 사고와 정상의 믿음 척도는 각각 0.64, 0.23이다. 또한 유중 가스 분석을 통해 사고 원인이 조임부 이완, 절연 불량, 전환기 접점의 접촉 불량 등으로 예상되고, 전력용 변압기는 이상 상태이므로 즉시 검사를 수행해야 된다는 진단 결과를 제시하였다.

표 7. 사례연구 2

Table 7. Case study 2 (단위:[PPM])

가스량	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
판정	482	113	626	55	0	31	19
IEC	unknown						
Rogers	unknown						
KEPCO 판정결과	요주의						
제안한 방법	요주의(아크 방전)						
	사고의 믿음 척도 : 0.58			정상의 믿음 척도 : 0.39			

5.2 사례 연구 2

사례 연구 2에서 사용한 유중 가스 데이터와 그에 따른 진단 결과는 표 7과 같다.

IEC 규격과 와 Rogers 규격은 일치되는 것이 없다. 사례 연구 2는 유중 가스량이 비교적 적어 각종 규격과 일치하지 않지만 한국 전력 공사에서는 주요 가스 분석에 의하여 요주의로 판정하였다. 본 연구에서 제안한 추론 방법에 의하면 전력용 변압기의 상태는 부분 방전으로 인한 요주의로 판정하였다. 지식 베이스를 통해 얻은 사고와 정상의 믿음 척도는 각각 0.58, 0.39이다. 또한 유중 가스 분석을 통해 사고 원인이 권선의 층간 단락, 권선의 용단, 탭 전환기 접점의 아크 단락 등으로 예상되고, 전력용 변압기는 요주의 상태이므로 3개월 후에 재검사를 수행해야 된다는 진단 결과를 제시하였다.

6. 결론

전력 수요가 증가하면서 전력용 변압기에 관련된 사고도 증가하는 추세에 있다. 전력용 변압기 사고는 정전 구역이 넓어 공급 지장 및 복구에 따른 경제적 손실은 물론 사회에 미치는 심리적 영향이 크기 때문에 고 신뢰도 운전을 위한 고장 진단 기술이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 전력용 변압기의 상태를 진단하는 방법중에 가장 널리 쓰이고 있는 유중 가스 분석법을 보완함으로써 전력용 변압기 예방 진단의 기초 자료로 사용하고자 하였다.

본 연구에서 제안한 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 유중 가스 분석법은 이상 판정 기준이 다양하고, 진단 결과에 영향을 미치는 요인이 다수 존재하며, 유중 가스 데이터의 취득시 불확실성이 포함되어 있기 때문에 현실적으로 사용하기 어렵다. 그러나 본 연구에서는 퍼지 집합의 적용으로 전력용 변압기의 상태와 환경에 부합되는 진단을 시도하였다.
- (2) 가스 구성비 분석과 주요 가스 분석을 복합적으로 사용한 고장 진단 전문가 시스템을 구축했을 경우 지식 베이스를 구성하는 규칙들은

불확실성이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 퍼지 척도의 도입으로 규칙의 불확실성을 해결하였다.

- (3) 본 연구에서는 변압기의 고장 진단 결과를 사고 및 정상을 나타내는 정량화된 지수로 도출하여 전력용 변압기의 진단 상태를 쉽게 파악할 수 있다.
- (4) 본 연구에서는 유중 가스 분석법을 이용한 전력용 변압기의 고장 진단을 지식 베이스에 기초한 전문가 시스템으로 수행한다. 따라서 비전문가라도 쉽고 편리하게 전력용 변압기를 진단할 수 있다.
- (5) 제안된 고장 진단 전문가 시스템은 한국 전력공사의 변압기 유중 가스 기록으로 효용성을 입증하였다. 따라서 유중 가스 분석만으로 현실성 있는 진단 및 상태 추정이 가능하게 되었고, 이것의 적용으로 적절한 유지, 보수 방안을 제시할 수 있게 되었다.

향후 규칙의 증가에 따라 추론 과정에서 발생하는 규칙의 충돌 해소와 유중 가스 데이터의 경향 분석이 필요하며, 전력용 변압기의 유중 가스 상태뿐만 아니라 전력용 변압기의 설치 년도, 유량, 사고 기록 등을 고려한 진단이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) P. S. Pugh and H. H. Wagner, "Detection of Incipient Faults in Transformer by Gas Analysis," *AIEE Transactions*, Vol. 80, pp. 189~195, June 1961.
- 2) R. R. Rogers, "IEEE And IEC Codes to Interpret Incipient Faults In Transformers Using Gas in Oil Analysis," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 5, pp. 349~354, October 1978.
- 3) IEC Publication 599~1978, Interpretation of The Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in Service.
- 4) J. J. Kelly, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 16, No. 6, pp. 777~782, November 1980.
- 5) 남창현 외, 변압기 유중 가스 상시 감시 시스템의 운용 연구 (연구보고서), 전력연구원, June 1995.
- 6) C. E. Lin, J. M. Ling, and C. L. Huang, "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 231~238, January 1993.
- 7) K. Tomsovic, M. Tapper, and T. Ingvarsson, "A Fuzzy information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1638~1646, July 1993.
- 8) K. Tomsovic and B. Baer, "Methods of Approximate Reasoning for Power System Equipment Condition and Reliability Analysis," *Proceedings of The International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems at Orlando, Florida, U.S.A.*, pp. 310~315, January 28.~February 2. 1996.
- 9) G. J. Klir and T. A. Folger, Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice-Hall International Editions, Inc., 1988.
- 10) 김재철 외, "유중가스를 이용한 변압기 고장진단용 전문가 시스템 개발," 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 859~861, July 1996.
- 11) 김재철 외, "변압기 고장 진단을 위한 하이브리드형 전문가 시스템," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 143~145, November 1996.

◇ 著 者 紹 介 ◇



윤 용 한(尹龍漢)

1967년 8월 28일생. 1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1992년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 생산기술연구소 연구원.



김 재 철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수, 학과장.