

실리콘 유입변압기 진단을 위한 전문가시스템 개발

(Development of the Expert System for Diagnosing Silicone Oil-filled Transformer)

문종필* · 김재철 · 임태훈

(Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim · Tae-Hoon Im)

요 약

본 논문에서는 유증가스 분석법을 이용하여 실리콘 유입변압기를 효과적으로 진단할 수 있는 전문가 시스템의 개발에 관하여 연구하였다. 변압기 진단 방법은 유입기기에 대한 진단 방법으로서 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔고 비교적 효과적인 분석법으로서 신뢰를 얻고 있는 유증가스분석법을 이용하였다. 그러나 유증가스 분석법은 경제 및 규칙의 불확실성이 필연적이기 때문에 이를 처리하기 위하여 소속정도 및 퍼지척도를 적용하여 해결하였다.

개발한 전문가 시스템은 크게 지식베이스 모듈, 추론엔진 모듈, 사용자 인터페이스 모듈로 이루어져 있으며, 지식베이스 모듈은 규칙을 이용한 지식표현을 사용하였고, 추론엔진 모듈은 후방향 추론을 이용하고, 퍼지규칙을 도입하였다. 사용자 인터페이스 모듈은 현장의 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 환경으로 구성하였다. 또한 변압기 개개의 이력 관리를 통하여 좀 더 효과적인 진단을 할 수 있도록 전문가 시스템을 데이터베이스와 연계하였다. 제안한 전문가 시스템에 대하여 실리콘유의 유증가스 데이터를 이용하여 검증한 결과 모든 사례에 대하여 정확한 판단 결과를 얻음으로써 실리콘 유입변압기를 효과적으로 진단할 수 있음을 증명하였다.

Abstract

In this paper, the diagnostic expert system for silicone oil-filled transformer is developed using dissolved gas analysis(DGA). There are many diagnostic methods for diagnostic oil-immersed transformer. But DGA is used to the proposed expert system since it has been verified that DGA is very efficient diagnostic method for transformer. In addition, it is reasonable that fuzzy rule, degree of inclusion and fuzzy measure must be considered to handle the uncertainty nature of gas boundary and rules.

The proposed expert system consists of knowledge base module, inference engine module and human-machine interface(HMI) module. The knowledge base module consists of the knowledge using the rule. The inference engine module is used to the fuzzy rule. The history of the transformer gas data is managed by the database. the effect of the proposed expert system is verified by case studies.

Key Words : Expert System, Dissolved Gas Analysis(DGA), Fuzzy Rule, Database

1. 서 론

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 02-824-2416, Fax : 02-817-0780

E-mail : pichard@ee.ssu.ac.kr

접수일자 : 2003년 8월 4일

1차심사 : 2003년 8월 8일

심사완료 : 2003년 10월 30일

실리콘유는 1974년에 소개된 이후로 전력용 변압기와 배전용 변압기에서 널리 채용되어 사용되고 있으며, 국내에서는 전기철도 차량용 변압기 등에 사

실리콘 유입변압기 진단을 위한 전문가시스템 개발

용되고 있다. 실리콘유가 소개되고 30년 정도 사용되면서 그 평균 수명 또한 증가하고 있으며, 초기 고장 검출에 대한 필요성도 증가하고 있다[1,2].

유입변압기는 운전 중의 열화 등으로 인하여 전기, 기계적인 성능이 저하되어 이상이 발생하게 되며 이 이상을 사전에 감지하여 적절한 조치를 취하지 않으면 큰 사고로 이어지게 된다. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위하여 이상의 징후를 초기 단계에서 검출하여 이상을 정확히 파악하고 그에 적절한 대책을 수립할 필요가 있다[1,2,5].

일반적으로 광유에 대한 이상진단 기법은 여러 가지가 있으나, 현재까지 가장 연구가 많이 진행되어 왔고 효과적인 방법으로써 유증가스 분석법이 있다. 그러나 실리콘유에 대한 유증가스 분석법은 Dowcoming사와 Doble사에서 행한 연구 논문이 있으며 그 외에는 전무한 실정이다[1,2].

본 논문에서는 유증가스 분석법을 이용하여 실리콘 유입변압기를 진단할 수 있는 전문가 시스템을 개발하였다. 우선 광유와 실리콘유의 사고별 가스특성 및 유증가스 허용기준에 관한 관련 규격을 비교, 분석하였으며 실리콘유에 가스분석기법을 적용하여 변압기의 고장을 효과적으로 검출할 수 있도록 하였다. 전문가 시스템은 크게 지식베이스 모듈, 추론엔진 모듈, 사용자 인터페이스 모듈로 이루어지며, 지식베이스 모듈은 규칙을 이용한 지식표현을 사용하여 구성하였고, 추론엔진모듈은 위험 레벨 경계 및 규칙의 불확실성을 처리하기 위하여 퍼지 이론을 적

용하였고, Dempster-Shafer 이론을 적용하여 사고의 믿음척도를 구하도록 하였다. 사용자 인터페이스 모듈은 베이직 언어를 이용하여 구성하였으며, 현장의 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 구성하였다. 그리고 본 전문가 시스템을 데이터베이스와 연계하여 변압기 개개의 이력을 관리하여 보다 효과적인 진단을 수행 할 수 있도록 하였다.

본 논문의 검증을 위하여 IEEE 규격에서 제시된 데이터를 이용하여 검증 실험을 수행하였다. 전문가 시스템을 이용하여 추론한 값과 실제 사고와의 연관성을 분석하여, 전문가 시스템의 유용성을 검증하였고, 또한 이것의 적용으로 실리콘 유입 변압기의 효과적인 유지 및 보수 방안을 제시할 수 있게 되었다.

2. 유증가스 분석법

2.1 유증가스 분석법

유입변압기를 오랫동안 사용하게 되면 변압기 절연유나 절연물 속에 포함되어 있는 습기, 연소가스, 고체 불순물 등이 증가하여 국부적인 온도 상승이나 절연지 및 절연유의 열화가 생긴다. 변압기 내부에서 이상, 즉 부분방전이나 코로나, 혹은 국부과열 등의 현상이 발생하게 되면, 이로 인한 열 발생이 수반되어 이 열원에 접촉된 절연재료, 즉 절연유, 절연지, 프레스 보드 등은 열 분해되어 수소(H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 아세틸렌(C₂H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 등의 가스를 발생하게 되며,

표 1. 광유와 실리콘유의 유증가스 특성

Table 1. Dissolved gas characteristics of mineral and silicone oil

가스성분	고장유형		절연유 과열		고체절연물 과열		유증 아크분해		고체절연물 아크분해	
	MO	SO	MO	SO	MO	SO	MO	SO	MO	SO
H ₂	○	○	○	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎
CH ₄	◎	-	◎	-	○	◎	○	◎	○	◎
C ₂ H ₆	○	○	○	-	-	○	-	-	-	-
C ₂ H ₄	◎	◎	◎	-	○	-	○	-	○	-
C ₂ H ₂	-	-	-	-	◎	○	◎	○	◎	○
CO	-	◎	◎	◎	-	○	◎	◎	◎	◎
CO ₂	-	◎	◎	◎	-	-	◎	-	◎	-

주. MO : 광유, SO : 실리콘유,

○ : 발생가스, ◎ : 주요발생가스

각 발생 가스의 대부분은 절연유에 용해된다[7-9].

따라서 유입변압기에서 절연유를 채취하여 유증 가스를 분석하게 되면, 발생가스 및 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 현재 광유에 대한 유증가스 분석법은 많은 연구가 이루어져 있으며, 관련 규격 또한 다양하다. 따라서 주요가스를 이용한 진단이나 가스 구성비를 이용한 진단 등 다양한 방법이 제시되고 있다. 그러나 실리콘유에서의 유증가스 분석법에 관한 연구는 거의 전무한 실정이며 다만 Dow coming사와 Doble사에서 행한 연구 및 주요가스 분석에 관한 IEEE Trial 규격이 있다.

2.2 사고별 유증가스 특성

실리콘 유입변압기의 유증가스 분석법은 일반적으로 다음의 7가지 가스가 대상이 된다. 즉 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO, CO₂이며, 이상을 판정하는 성분으로서 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂의 가연성 가스가 있으며, 또한 실리콘유의 열화를 판정하는 성분으로서 CO, CO₂, CH₄가 있다. 주요가스분석을 통하여 변압기의 상태를 알 수 있는 방법으로는 CO, CO₂는 실리콘유의 과열과 관계가 있고 추가로 C₂H₆, C₂H₄의 유무에 따라 실리콘유의 과열과 고체 절연체의 과열로 나눌 수가 있다. 또한 H₂와 CH₄는 아크사고와 관련이 있으며 추가로 C₂H₂, CO의 함유량에 따라 유증아크분해와 고체 절연물 아크분해로 나눌 수가 있다. 이것을 정리하고 광유와 실리콘유를 비교하여 표 1에 나타내었다[5,6].

2.3 유증가스 허용기준

현재 IEEE 규격에서는 유증가스 허용기준을 ppm 단위로 표시하고 있으며 허용기준 초과시 위험으로 구분하고 있다. 광유에 관한 국제 규격은 정상, 주의, 위험 등으로 구분되어 유증가스량을 제시하고 있으나 실리콘유에 관한 규격은 현재 정상과 위험기준만 제시하고 있기 때문에 효과적인 비교를 위하여 위험 기준만을 비교하였다.

일반적으로 광유는 실리콘유에 비하여 H₂와 CH₄의 허용기준이 높으며, 이에 반해 실리콘유는 광유에 비하여 CO, CO₂의 허용기준이 높은 것을 알 수

있다. 또한 C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂는 그 크기의 비에는 차이가 나지만 대체로 작은 값을 보임을 알 수 있다. 광유와 실리콘유의 유증가스 허용기준을 비교하여 다음 표 2에 나타내었다[5,6].

2.4 유증가스 분석법의 문제점 및 대책

유증가스 분석법을 통하여 비교적 정확한 변압기 진단을 수행할 수 있지만 현실에 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉, 유증가스 분석법은 변압기의 설치시기, 구조, 용량, 유량, 제조회사 등의 영향을 많이 받고, 측정 방법에 따라 계측치가 달라진다. 또한 주요가스 분석을 이용하여 전문가 시스템을 구축할 경우 규칙의 충돌도 발생한다[7,8].

표 2. 광유와 실리콘유의 유증가스 허용(위험)기준
Table 2. Dissolved gas threshold level of mineral and silicone oil

가스성분	허용기준(ppm)	
	광유	실리콘유
H ₂	1,800	200
CH ₄	1,000	100
C ₂ H ₆	150	30
C ₂ H ₄	200	30
C ₂ H ₂	80	1
CO	1,400	3,000
CO ₂	10,000	30,000

한 예로 C₂H₆가 30[ppm]을 넘으면 위험 상태라고 할 때, 29[ppm]은 정상이고 31[ppm]은 위험이다. 단 2[ppm]의 차이로 정상과 이상으로 나누어지지만 측정 및 판독시의 오차가 항상 존재하기 때문에 위와 같이 미소한 차이만으로 정상과 위험을 판정하기에는 곤란하다.

또한 지식에는 항상 불확실성이 존재하기 때문에 아무리 전문가의 지식이라 하더라도 필연적으로 전문가 시스템의 규칙에 불확실성이 존재한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 데이터와 경계 등의 불확실성에 퍼지집합을 이용하고, 규칙의 불확실성에 퍼지척도를 적용하였다.

3. 전문가 시스템의 구성

3.1 전문가 시스템의 정의

전문가란 전문지식을 기억하고 있고 논리적 추론능력에 따라 결론을 도출하며 설득력 있는 설명능력이 있는 사람을 말한다. 전문가 시스템은 이와 같은 지식 관리 능력이 있는 소프트웨어이다[10,11]. 일반적인 프로그램과는 달리 전문가 시스템은 지식베이스와 추론 엔진이 분리되어 있어 지식을 일관성 있게 적용할 수 있으며, 사람과 같이 수명의 한계도 없고, 지식을 쉽게 복사·이동시킬 수 있는 장점이 있다[7,10,11].

전문가시스템은 크게 지식베이스 모듈과 추론 엔진 모듈, 사용자 인터페이스 모듈로 구분할 수 있지만, 전체적인 구성은 지식 습득 보조 시스템, 작업 메모리, 설명보조시스템을 포함하여 그림 1과 같이 표현 할 수 있다.

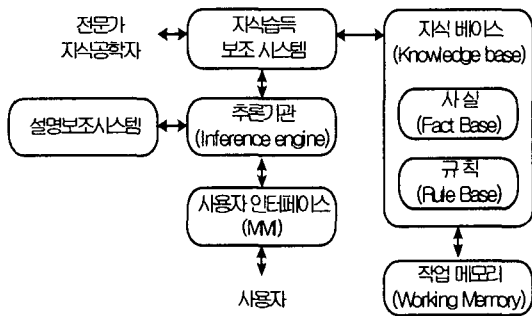


그림 1. 전문가 시스템의 구조
Fig. 1. Configuration of expert system

3.2 지식베이스 모듈

지식베이스 모듈은 전문가 시스템에서 사용되는 특별한 주제에 대한 지식의 데이터베이스로서 이 데이터베이스는 문제를 해결하는데 필요한 사실과 그러한 사실들을 어떤 목표의 자료로 사용하는 규칙으로 구성된다[10,11].

지식베이스를 표현하는 방법에는 규칙(Rule), 의미망(Semantic Net), 프레임(Frame), 논리(Logic) 등이 있으며 본 논문에서는 규칙을 이용한 지식 표현방법을 사용하였다. 이 방법은 조건과 이 조건을 만족할시 수행되는 행동의 쌍으로 나타내며 일반적으로 'If <조건> Then <결과>'의 형식으로 표현된다. 사용한 규칙의 형태는 다음과 같다.

<규칙형태>

Rule	규칙 (R _i)
If	조건 (A _j)
Then	결론 (B _k)
Required	규칙의 믿음 (m)

3.3 추론엔진 모듈

추론엔진은 전반적인 문제해결에 관한 지식을 갖고 전문가 시스템의 전반을 관장하는 가장 핵심적인 부분이다. 또한 전문가 시스템은 전문가의 지식과 경험을 규칙화해서 전문가와 비슷한 결과를 얻는데 목적을 두고 있다. 그러나 전문가의 지식은 추상적이어서 부정확, 불확실, 불완전한 단점이 뒤따른다 [10,11]. 또한 유증가스 허용기준 경계의 불확실성 및 추론 규칙에도 불확실성이 포함되어 있다. 따라서 전문가의 추상적 지식을 수식적 표현으로 적절히 변환하기 위하여 지식베이스의 유증가스 데이터를 근거로 추론엔진 모듈에 퍼지 규칙을 적용하였으며 이를 바탕으로 정상과 사고의 믿음척도를 구하도록 구성하였다. 다음 그림 2는 추론엔진 모듈의 블록도를 나타낸다.

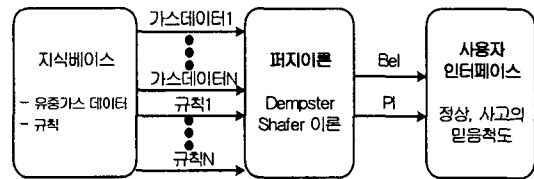


그림 2. 추론엔진 모듈
Fig. 2. Inference engine module

3.3.1 경계의 불확실성 처리

유증가스 관련 규격에서는 유증가스의 위험레벨 기준을 제시하고 있으나, 앞 절에서의 예와 같이 유증가스량의 극히 작은 차이때문에 정상과 위험을 구분하기에는 문제가 있다. 이런 유증가스 허용기준 경계의 불확실성을 처리하기 위하여 퍼지 규칙을 적용하였다. 즉, 이 위험레벨 값에 퍼지함수를 적용하고, 상한치와 하한치를 정하여 그 사이값에 대하여 소속정도를 주도도록 하였다. 효과적인 소속정도를 설정하기 위하여 Dombi가 제안한 소속정도 식을 사용하여 처리하였으며, 다음 식과 같다. 이 방법은 계수

의 조정을 통해 사용자가 원하는 소속정도를 설정할 수 있는 장점이 있다[13].

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

여기서 a는 구간의 하한치, b는 구간의 상한치, λ는 변화율, ν는 굴절점이다.

다음 표 3은 각 가스성분에 대해서 설정된 파라미터 a, b, λ, ν를 나타낸다.

표 3. 주요가스성분의 파라미터 설정
Table 3. Setting the parameters of key gas components

가스성분 파라미터	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
a	160	80	24	24	0.8	2,400	24,000
b	240	120	36	36	1.2	3,600	36,000
λ	4						
ν	0.6						

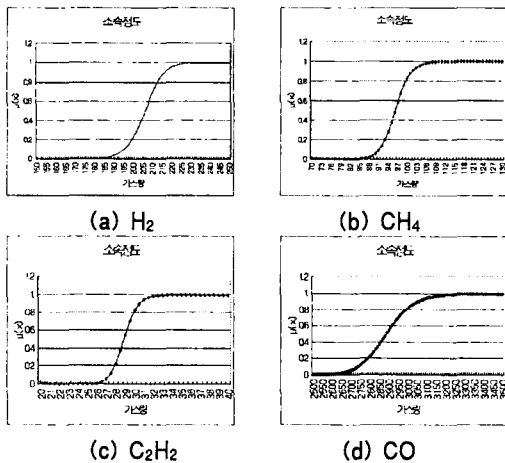


그림 3. 각 가스에 대한 소속정도 함수
Fig. 3. Membership degree of each gas

위의 파라미터를 이용하여 주요 가스성분에 대한 소속정도 함수 μ(x)를 그리면 다음과 같다. 그래프는 λ가 커짐에 따라 선형에서 점점 멀어져서 S형태의 곡선이 되며, ν가 커짐에 따라 점점 기울기가 커지는 곡선을 가지게 된다.

이 소속정도 함수를 사용하여, 기준값보다 더 작은 값에 대해서는 낮은 소속정도 값을 출력하고 기준값보다 약간 높은 값에 대해서는 높은 출력값을 출력하여 위험레벨 경계의 불확실성에 대하여 유연하게 대처할 수 있도록 하였다.

3.3.2 규칙의 불확실성 처리

지식은 애매함 없이 정확한 경우는 드물어 지식에는 거의 필연적으로 불확실성(uncertainty)이 내포되어 있다. 본 논문에서는 이 불확실성을 처리하기 위해 Dempster-Shafer 이론을 사용하였다. 이 이론은 확률에 의해 주관적으로 처리하는 Bayesian 확률을 기반으로 하였으나 주관적인 의미를 부여하기 위해 원래의 상위 및 하위확률이라는 명칭을 각각 믿음(belief)과 근사(plausibility)로 표시하는 방법이다. 일반적으로 퍼지척도를 나타내는 함수 f는 다음과 같이 표현된다.

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

$$\text{만족조건: } m(\emptyset) = 0 \text{ and } \sum_{A \in P(X)} m(A) = 1$$

여기서 P(X)는 전체집합 X의 모든 부분집합을 모은 멱집합(power set)이다. 함수 f는 X의 부분집합 A에 실수값 f(A)를 부여하는데 이 값이 퍼지척도를 나타낸다. m(A)는 집합 A의 증거로 해석할 수 있고 기본 확률 할당으로 불린다. 기본 확률 할당에 따라 믿음척도(belief measure)와 근사척도(plausibility measure)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

$$Pl(A) = \sum_{B | A \cap B \neq \emptyset} m(B)$$

본 논문에서는 유증가스 허용기준 및 발생가스에 대한 고장원인에 대하여 각각 전문가의 지식을 이용하여 규칙을 만들었으며, 각각의 규칙에 대하여 m값을 할당하였다. 이 값들을 퍼지연산을 통하여 최종적인 믿음척도와 근사척도를 도출하였다. 즉, 실리콘 유에서 추출된 유증가스 값을 전문가시스템에 입력

할 경우, 이 경우에 대하여 적용되는 규칙들을 선별 후 각각의 m값을 이용하여 퍼지연산을 한 후에 최종적으로 고장유형과 그 고장유형에 대한 믿음척도를 출력하게 된다.

3.4 사용자 인터페이스 모듈

사용자 인터페이스 모듈은 사용자가 시스템을 원활히 사용할 수 있도록 시스템과 사용자간을 연결해주는 기능을 갖는다. 본 논문에서는 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 환경으로 구성하였다. 주요가스 성분을 입력하면 추론엔진을 통하여 정상과 사고의 믿음척도 및 근사척도를 유도하고 이를 사용자에게 보여준다. 또한 그 상황에 맞게 행동 지침을 내보내도록 구성하였다.

그림 4(a)는 가스 데이터 입력창이며, (b)는 추론된 결과를 보여주는 출력창이다.

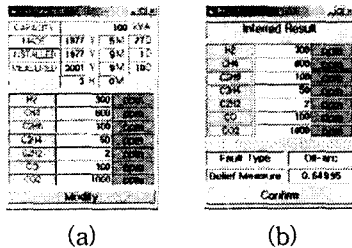


그림 4. 가스데이터 입력 및 추론된 출력결과 창
Fig. 4. Input window of gas data and results window of inference

4. 데이터 베이스 연계

4.1 데이터 베이스의 필요성

유증가스 분석법은 변압기의 구조, 용량, 기름량, 제조회사 등의 영향을 많이 받기 때문에 각 변압기별 이력(변압기 제작 및 설치일시, 가스분석이력, 절연유 교체, 고장점검 일시 등)을 관리하여야만 효과적인 진단이 가능할 것이다. 또한 변압기의 감시 및 진단에 필요한 데이터가 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 증가하는 문제, 또한 저장 시 동일한 데이터의 중복 저장 등의 문제를 해결하기 위해서는 데이터베이스 구축은 필수적이다[14,15].

따라서 본 논문에서는 제안한 전문가 시스템을 데

이터베이스와 연계하여 더 정확한 변압기 이력관리를 할 수 있게 하였으며, 후에 수많은 데이터가 축적될 경우의 확장성을 고려하여, 전문가 시스템에서 저장 및 추론된 데이터를 각 변압기별로 저장하여 종합적인 관리를 할 수 있도록 구성하였다.

통합된 데이터들에 대한 개체와 속성의 특성을 표 4에, 이에 기초한 개체-관계 모델을 그림 5에 나타내었고, 이에 따라 구축된 데이터베이스의 개념도를 그림 6에 나타내었다.

표 4. 개체와 속성의 특성
Table 4. Characteristics of entity and attribute

개체(entity)	속성(attribute)
변압기	변압기 규격, 전산화 번호, 제작년월, 설치년월
연결	변압기 ID, 전산화 번호
입력데이터	취득일 및 시간, 주요가스별 가스량
출력데이터	취득일 및 시간, 믿음척도, 근사척도, 행동지침

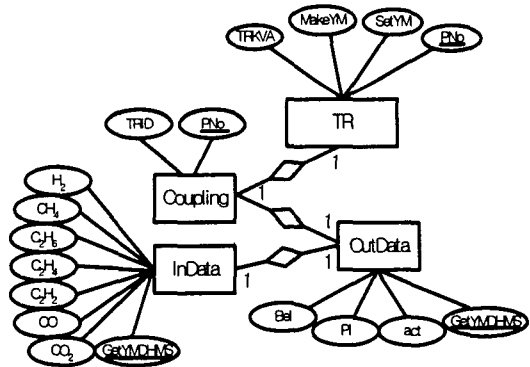


그림 5. DB 개체-관계 모델
Fig. 5. DB entity-relationship model

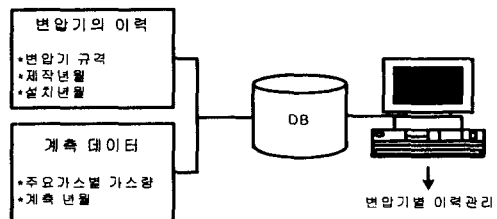


그림 6. 데이터 베이스 구성
Fig. 6. Construction of database

5. 사례연구

본 논문에서는 IEEE 규격에서 제시한 4개의 예제 데이터 및 1개의 실 데이터를 이용하여 전문가 시스템을 검증하여 보았다. 첫 번째 사례연구는 정상데이터이며, 두 번째는 절연유의 과열사고, 세 번째는 고체절연물의 과열사고, 네 번째는 절연유의 아크사고, 다섯 번째는 고체절연물의 아크사고이다. 표 5, 6, 7, 8, 9는 각 가스 데이터에 대한 사례연구 결과이다.

표 5. 사례연구 1
Table 5. Case study 1

가스성분	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
가스량	10	20	5	5	0	100
IEEE	정상					
전문가 시스템	아크(고체절연물) 사고의 믿음척도 : 0.1115					

첫 번째 사례연구 1에서는 가스데이터가 기준을 초과하는 항목이 없으므로 IEEE 규격은 정상으로 판정하며, 제안한 전문가시스템은 사고의 믿음척도를 0.1115로 도출하여 정상으로 판정하여 정상임을 나타내었다.

표 6. 사례연구 2
Table 6. Case study 2

가스성분	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
가스량	150	20	50	50	0	4500
IEEE	과열(절연유)					
전문가 시스템	과열(절연유) 사고의 믿음척도 : 0.9036					

표 7. 사례연구 3
Table 7. Case study 3

가스성분	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
가스량	250	200	0	0	0	4500
IEEE	과열(고체절연물)					
전문가 시스템	과열(고체절연물) 사고의 믿음척도 : 0.9234					

사례연구 2와 3에서는 CO의 양으로 보아 과열 사

고임에는 틀림없으나 C₂H₆, C₂H₄의 양에 따라 절연유에 대한 것인지, 고체절연물에 대한 것인지를 구분하여준다. 즉 과열사고임이 분명할 때, C₂H₆, C₂H₄의 양이 있으면 절연유에 대한 과열사고가 되고, C₂H₆, C₂H₄의 양이 없으면 고체절연물에 대한 과열사고가 된다. 여기에서도 개발한 전문가시스템은 절연유와 고체의 과열사고도 확실히 구분하여 주었고, 사고의 믿음척도를 각각 0.9036, 0.9234로 주었다.

표 8. 사례연구 4
Table 8. Case study 4

가스성분	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
가스량	300	600	100	50	2	100
IEEE	아크(절연유)					
전문가 시스템	아크(절연유) 사고의 믿음척도 : 0.6500					

표 8의 사례연구 4에서는 H₂, CH₄의 양으로 보아 아크 사고임에는 틀림없으나 CO의 양이 미미하기 때문에 절연유에 대한 아크사고로 판정되었다. 전문가 시스템도 IEEE에서 판정한 방법과 같이 절연유에 대한 아크사고를 나타내었으며 사고의 믿음척도는 0.6500을 도출하였다.

표 9. 사례연구 5
Table 9. Case study 5

가스성분	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
가스량	5480	2790	39	308	448	3190
IEEE	아크(고체절연물)					
전문가 시스템	아크(고체절연물) 사고의 믿음척도 : 0.8539					

마지막으로 사례연구 5에서는 모든 데이터가 기준치를 넘고 있으나, 그 비로 볼 때 H₂, CH₄, C₂H₂, CO가 특히 기준을 많이 초과하고 있어 IEEE에서는 고체절연물의 아크사고로 판정하였고, 전문가 시스템에서도 고체절연물의 아크사고로 판정하였으며, 사고의 믿음척도는 0.8539이었다.

6. 결 론

본 논문에서는 유증가스 분석법을 이용하여 실리

콘 유입변압기를 효율적으로 진단할 수 있는 전문가 시스템을 구축하였다.

전문가 시스템은 지식베이스 모듈, 추론엔진 모듈, 사용자 인터페이스 모듈로 이루어지며, 지식 베이스 모듈은 규칙을 이용한 지식표현을 사용하였으며, 전문가의 서술적 지식을 규칙으로 수치화 하였다. 추론엔진 모듈은 입력된 변압기 가스량에 규칙을 적용하여 사고의 유무 및 사고의 종류를 추론하도록 하였다. 특히 데이터 취득에 대한 불확실성 및 경계의 불확실성을 처리하기 위하여 퍼지 규칙 및 Dombi가 제안한 소속정도 식을 사용하였다. 또한 규칙의 불확실성을 해결하기 위하여 각 규칙에 믿음을 주고 Dempster-Shafer 이론을 적용하여 정상과 사고의 믿음척도를 유도하였다. 사용자 인터페이스 모듈은 GUI 환경으로 비주얼하게 구성하였으며, 초보자도 데이터 입력만으로 쉽게 사용할 수 있도록 구성하였다.

또한 본 전문가 시스템을 데이터 베이스와 연계하였다. 따라서 전문가 시스템에서는 개개의 변압기별 이력을 관리할 수 있게 되어 보다 정확한 진단을 할 수 있도록 설계하였다. 데이터 베이스는 각 요구사항들을 분석하여 개체-관계 모델로 표현 후 MS-Access를 이용하여 구축하였다.

사례연구에서는 실리콘 유입변압기의 유증가스 데이터를 이용하여 본 전문가 시스템을 검증하여 보았으며, 전문가 시스템에서 도출한 결과는 실제 결과와 같음을 알 수 있었다.

본 논문은 숭실대학교의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

References

- [1] Wayne J. Chatterton, "An Update on Silicone Transformer Fluid: Manufacturing, Maintenance and End of Life Options", Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, April 2000.
- [2] Toskey G. A, "Manufacturing Considerations for Silicone Fluid Filled Transformer", Conference on Electrical Electronics Insulation, 1995.
- [3] 황석중 외, 전철용 변압기 기술개발에 관한 연구, 전력연구원, 1998년 2월.
- [4] 정길조 외, 765kV 변전기기 예방진단시스템 개발(2차년도 중간보고서), 한국전력공사 전력연구원, 2000년 11

- 월.
- [5] IEEE P-1258, Trial-Use Guide for the Interpretation of Cases Generated in Silicone-Immersed Transformer Draft-9, 1999.
- [6] IEEE Std. C57.104, IEEE Guide for the Interpretation of Cases Generated in Oil-Immersed Transformer, 1991.
- [7] Jae-Chul Kim, et. al, "Application of LVO3 for Dissolved Gas Analysis for Power Transformer", The Transaction of KIEE, Vol. A47, No. 6, 1998.
- [8] 김재철 외, "유증가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장진단용 코오벤 네트워크", 대한전기학회 논문지, 제 47권 6호, 1998년.
- [9] J. J. Kelly, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis", IEEE Trans. on IA, Vol. IA-16, No. 6, pp. 777-782, Nov. 1980.
- [10] Joseph Giarratano, Expert Systems, PWS-KENT Publishing Company, 1989.
- [11] 이재규 외, 전문가 시스템 원리와 개발, 지영사, 1998년.
- [12] Chin-Teng Lin, Neural Fuzzy System, Prentice Hall, 1996.
- [13] J. Dombi, "Membership Function as an Evaluation", Fuzzy Set and Systems, 35, pp. 1-21, 1990.
- [14] Jae-Chul Kim, et. al, "The Monitoring Program and Database Construction for Diagnosing Distribution Transformer in On-line", The Conference of KIEE, pp. 177-179, Nov. 2000.
- [15] Korth F.H, Database Systems Concepts Third Edition, McGraw-Hill.

◇ 저자소개 ◇

문종필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2002년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정 및 기초전력공학공동연구소 전임연구원.

김재철 (金載哲)

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

임태훈 (林兌勳)

1954년생. 1989 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1993 연세대학교 산업대학원 졸업(석사). 2004년 숭실대학교 대학원 졸업(박사). 현재 지에스 텔레텍 사업본부장.