2001년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집 (2001.11.16~17)

유중가스분석법을 이용한 실리콘 유입변압기 고장진단 전문가 시스템

문종필, 김재철, 최준호, 전영재, 김언석
숭실대학교 전기공학과

A Fault Diagnostic Expert System for Silicone Oil-filled Transformer Using Dissolved Gas Analysis

Jong-Fil Moon, Jae-Chul Kim, Joon-Ho Choi, Young-Jae Jun, Oun-seok Kim
Dept of Electrical Engineering In Soongsil University

Abstract - In this paper, we developed the fault diagnostic expert system of silicone-immersed transformer using dissolved gas analysis. The knowledge base module consists of the knowledge using the rule: if 〈condition〉 Then 〈action〉. The inference engine uses the fuzzy rule for the management of uncertainty of the boundary and rule and derivate the Belief and Plausibility of the normality and fault using Dempster-Shafer theory. The expert system is connected to the database and it can manages the history of gas-data of the transformer.

1. 서 론

실리콘(Silicone)유는 1974년에 소개된 이후로 전력용 변압기와 배전용 변압기에서 넓게 채용되어 사용되고 있으며, 국내에서는 전기철도 차량용 변압기 등에 사용되고 있다. 실리콘유가 소개되고 30년 정도 사용되면서, 그 평균 수명이 증가하고 있으며 또한 초기 고장 검출에 대한 필요성도 증가하고 있다.

본 논문에서는 광유와 실리콘유의 가스특성을 비교 후 실리콘유에 가스분석기법을 적용하여 실리콘 유입 변압기의 고장을 효과적으로 검출할 수 있는 전문가시스템을 구성하였다. 전문가 시스템의 지식 베이스 모듈은 규칙을 이용한 지식표현으로 구성하였다. 추론 엔진 모듈은 후방향 추론을 사용하였으며 위험 레벨 경계 및 규칙의 불확실성을 처리하기 위해 퍼지 이론을 적용하였다. 또한 Dempster-Shafer이론을 적용하여 정상 및 사고의 믿음척도와 근사척도를 구하도록 하였다. 또한 본 전문가 시스템을 데이터베이스와 연계하여 각 변압기의 이력을 관리할 수 있도록 하였다.

2. 유중가스 분석법

2.1 기존연구 사례

J. J. Kelly, Q. Su, Hong-Tzer Yang 등은 IEEE 논문 발표를 통하여 광유에 대하여 유중가스 분석을 이용한 변압기 진단에 관한 연구를 수행하였으며, 여기에 퍼지를 적용하여 더 효과적인 결론을 이끌 수 있는 방안을 제시하였다[6]. 그러나 현재 실리콘유에 대한 유중가스 분석은 전무한 실정이며, 이에 관한 IEEE 관련 논문이 없고, 규격 또한 현재 제작중에 있다.

2.2 실리콘유의 일반적인 특성

실리콘유는 기존의 광유에 대한 대체품으로 일반적으로 처음 25년 동안은 물질이 변하지 않고 불에 대하여 안전하며(fire safe) 환경 친화적인 곳에 사용된다. 또한 변압기의 전형적인 온도 상승 한도인 55/65[℃]를 초과하는 곳에 사용된다.

일상적인 조건하에서 실리콘유는 고유의 열적 안정성과 산화에 대한 저항성을 갖기 때문에 산화방지제나 방부제를 채울 필요가 없으며, 건조함과 오염에서의 완전한 격리만 유지된다면, 변압기 기기 자체보다도 수명이 지속되는 특성을 갖는다.

2.3 유중가스 분석법

유입변압기 내부에서 이상(과열, 아크)이 발생하게 되면 열 발생이 수반되며, 이 때 열원에 접속된 절연 재료는 열 분해되어 H_2(수소), CH_4(메탄), C_2H_6(에탄), C_2H_4(에틸렌), C_2H_2(아세틸렌), CO(일산화탄소), CO_2(이산화탄소) 등의 가스를 발생하게 되며, 각 발생가스의 대부분은 절연유에 용해된다. 따라서 유입변압기에서 절연유를 채취하여 유중가스분석을 하게 되면, 발생가스 및 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 실리콘유에서의 유중가스 분석법을 이용한 유입 변압기 고장 진단 방법은 광유의 다양한 방법과는 달리 주요가스를 이용한 분석법이 있으며 이에 관한 IEEE 규격이 현재 제작 중에 있다[1,2].

2.4 사고별 유중가스 특성

주요가스성분을 이용한 유중가스분석법의 이상을 판정하는 성분으로서 H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2의 가연성 가스가 있으며, 또한 절연물의 열화를 판정하는 성분으로서 CO, CO_2, CH_4가 있다. 주요가스분석을 통하여 변압기의 상태를 알 수 있는 방법으로는 CO, CO_2는 절연물의 과열과 관련이 있고 추가로 C_2H_4의 유무에 따라 절연유의 과열과 고체절연체의 과열로 나눌 수가 있다. 또한 H_2와 CH_4는 아크사고와 관련이 있으며 추가로 C_2H_2, CO, CO_2의 함유량에 따라 유중아크분해와 고체절연물 아크분해로 나눌 수가 있다. 이것을 정리하고 광유와 실리콘유를 비교하여 표 1에 나타내었다[2,5].

표 1. 광유와 실리콘유의 사고별 유중가스 특성

고장유형 / 가스성분	절연유 과열		고체 절연물가열		유중 아크분해		고체절연물 아크분해	
	MO	SO	MO	SO	MO	SO	MO	SO
H_2	○	○	○	-	◎	◎	◎	◎
CH_4	◎	-	◎	-	○	◎	○	◎
C_2H_6	○	○	○	-	-	○	-	-
C_2H_4	◎	◎	◎	-	○	-	○	-
C_2H_2	-	-	-	-	◎	○	◎	○
CO	-	◎	◎	◎	-	○	◎	◎
CO_2	-	◎	◎	◎	-	-	◎	-

주.MO : 광유, SO : 실리콘유
○ : 발생가스, ◎ : 주요발생가스
IEEE Std. C57.104, IEEE Trial Use Guide P1258

2.5 유중가스 허용기준

현재 IEEE 규격에서는 유중가스 허용기준을 ppm으로 표시하고 있으며 허용기준 초과시 위험으로 구분하고 있다. 광유에 관한 규격은 정상, 주의, 위험 등으로 구분되어 유중가스량을 제시하고 있으나 실리콘유에 관한 규격은 현재 정상과 위험기준만 제시하고 있기 때문에 효과적인 비교를 위하여 위험기준만을 비교하였다. 일반적으로 광유는 실리콘유에 비하여 H_2와 CH_4의 허용기준이 높으며, 이에 반해 실리콘 유는 광유에 비하여 CO, CO_2의 허용기준이 높은 것을 알 수 있다. 또한 C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2는 그 크기의 비에는 차이가 나지만 대체로 작은 값을 보임을 알 수 있다. 광유와 실리콘유의 유중가스 허용기준을 비교하여 다음 표 2에 나타내었다[2,5].

표 2. 광유와 실리콘유의 유중가스 허용기준(위험기준)

허용기준 / 가스성분	허용기준(ppm)	
	MO	SO
H_2	1,800	200
CH_4	1,000	100
C_2H_6	150	30
C_2H_4	200	30
C_2H_2	80	1
CO	1,400	3,000
CO_2	10,000	30,000

3. 전문가 시스템

3.1 정의

전문가는 전문지식을 기억하고 있고 논리적 추론능력에 따라 결론을 도출하며 설득력 있는 설명능력이 있는 사람을 말한다. 전문가시스템은 이와 같은 지식관리능력이 있는 소프트웨어이다. 또한 방법론의 관점에서 본다면 지식기반시스템으로도 부를 수 있다.

일반적인 프로그램과는 달리 전문가시스템은 지식베이스와 추론기관이 분리되어 있어 지식을 일관성 있게 적용할 수 있으며, 사람과 같이 수명의 한계도 없고, 지식을 쉽게 복사·이동시킬 수 있는 장점이 있다. 다음 그림은 전문가 시스템의 구조를 나타낸다[4].

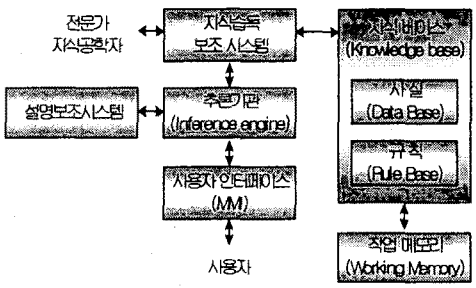

그림 1. 전문가 시스템의 구조

3.2 지식베이스 모듈

지식베이스 모듈은 전문가시스템에서 사용되는 특별한 주제에 대한 지식의 데이터베이스로서 이 데이터베이스는 문제를 해결하는데 필요한 사실과 그러한 사실들을 어떤 목표의 자료로 사용하는 규칙으로 구성된다.

지식베이스를 표현하는 방법에는 규칙, 의미망, 프레임, 논리 등이 있으며 본 논문에서는 규칙을 이용한 지식표현방법을 사용하였다. 이 방법은 조건과 이 조건의 만족시 수행되는 행동의 쌍으로 나타내며 일반적으로 'If 〈조건〉 Then 〈결과〉'의 형식으로 표현된다. 사용한 규칙의 형태는 다음과 같다.

Rule R_i
If 퍼지조건 A_j
Then 결론 B_k
Required 믿음척도 m

사용한 규칙의 형태에 따라 주요 가스 규칙을 만들어 사용하였으며 다음은 그 예이다.

h2 **If** (k?1) **Then** *normal* 0.15
h2 **If** (k?2) **Then** arc 0.20
h2 **If** (k?3) **Then** partial 0.25

3.3 추론엔진 모듈

추론엔진은 전반적인 문제해결에 관한 지식을 갖고 전문가 시스템의 전반을 관장하는 가장 핵심적인 부분이다. 또한 전문가시스템은 전문가의 지식과 경험을 규칙화해서 전문가와 비슷한 결과를 얻는데 목적을 두고 있다. 그러나 전문가의 지식은 추상적이어서 부정확, 불확실, 불완전한 단점이 뒤따른다. 또한 유중가스 허용기준 경계의 불확실성 및 추론 규칙에도 불확실성이 포함되어 있다. 따라서 전문가의 추상적 지식을 수식적 표현으로 적절히 변환하기 위하여 지식베이스의 유중가스 데이터를 근거로 추론엔진 모듈에 퍼지 규칙을 적용하였으며 이를 바탕으로 정상과 사고의 믿음척도 및 근사척도를 구하도록 작성하였다. 다음은 추론엔진모듈의 블록도를 나타낸다.

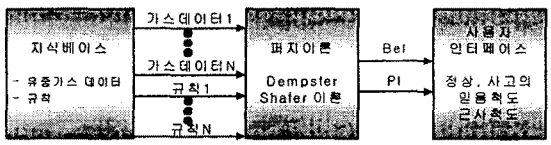

그림 2. 추론엔진모듈

3.3.1 경계의 불확실성 처리

유중가스 허용기준의 경계의 불확실성을 처리하기 위하여 Dombi가 제안한 소속정도 식을 이용하여 처리하였으며 그 식은 다음과 같다[3].

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

여기서 a는 구간의 하한치, b는 구간의 상한치, λ는 변화율, ν는 굴절점이다. 각 가스성분에 대한 파라미터 a, b, λ, ν의 값은 다음과 같다.

표 3. 주요가스성분의 파라미터 설정

	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_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	1 ~ 4						
ν	0.1 ~ 0.7						

3.3.2 규칙의 불확실성 처리

지식에는 필연적으로 불확실성이 내포되어 있다. 이런 규칙의 불확실성을 해결하기 위하여 Dempster-Shafer 이론을 적용하여 규칙의 믿음척도(Belief) 및 근사척도(Plausibility)를 구하여 처리하였으며 그 식은 다음과 같다.

Belief : $Bel(s) = \sum_{s \subset S} m(s)$

Plausibility : $Pl(s) = 1 - Bel(\neg s)$

여기서 m은 규칙의 믿음척도, s는 규칙, ¬는 여집합을 나타낸다.

3.4 사용자 인터페이스 모듈

사용자 인터페이스 모듈은 사용자가 시스템을 원활히 사용할 수 있도록 시스템과 사용자간을 연결해 주는 기능을 갖는다. 본 논문에서는 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 환경으로 구성하였으며, MS Visual Basic 6.0을 사용하여 작성하였다. 주요가스의 성분을 입력하면 추론엔진을 통하여 정상과 사고의 믿음척도 및 근사척도를 유도하고 이를 사용자에게 보여준다. 또한 그 상황에 맞게 행동 지침을 내보내도록 구성하였다.

3.5 데이터 베이스 연계

유중가스 분석법은 변압기의 구조, 용량, 기름량, 제조회사 등의 영향을 많이 받기 때문에 각 변압기별 이력을 관리하여야만 효과적인 진단이 가능할 것이다. 따라서 전문가 시스템을 데이터 베이스와 연계하였으며 전문가시스템에서 저장 및 추론된 데이터를 저장하여 종합적인 관리를 할 수 있도록 구성하였다.

본 논문에서 데이터베이스 설계를 위한 개체와 속성의 특성을 요약하면 표 4와 같다.

표 4. 개체와 속성의 특성

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

이와 같은 데이터 개체의 공동 속성으로 각 개체간의 관계를 개체-관계 모델로 표시한 후 이 모델을 바탕으로 데이터 베이스를 구축하였으며 그림 4와 그림 5에 표시하였다.

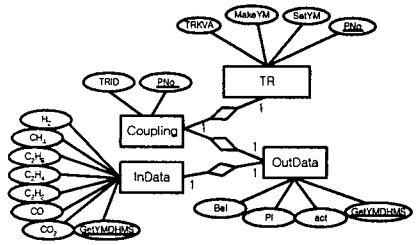

그림 4. DB 개체-관계 모델

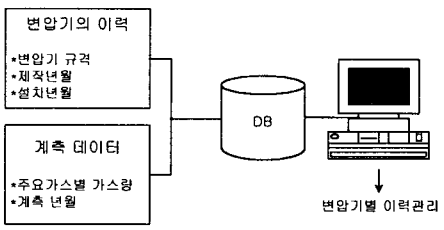

그림 4. 데이터 베이스 구성

4. 사례연구

현재 실리콘유의 실제 유중가스 데이터를 얻기 어려운 관계로 본 논문에서는 IEEE 규격에서 제시한 예제 데이터를 이용하여 전문가 시스템을 검증하여 보았다. 다음 표는 그 입력 데이터 및 전문가 시스템 추론결과를 보여준다.

우선 1, 4는 비교를 위하여 확실한 정상과 사고의 데이터를 입력하였다. 결과는 정상과 사고를 확실히 구분하여 주었다. 또한 2, 3번은 온도사고임에는 틀림없으나 C_2H_6, C_2H_4의 양에 따라 절연유의 사고인지 혹은 고체절연체에서의 사고인지를 구분하여 나타내고 있다.

표 5. 가스 데이터 및 추론 결과

	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	결과
1	10	20	5	5	0	100	N.Bel = 0.75 F.Bel = 0.20 아크(고체)
2	150	20	50	50	0	4500	N.Bel = 0.15 F.Bel = 0.80 온도(절연유)
3	250	200	0	0	0	4500	N.Bel = 0.15 F.Bel = 0.80 온도(고체)
4	300	600	100	50	2	100	N.Bel = 0.10 F.Bel = 0.85 아크(유중)

주. N.Bel : Belief of Nomality
F.Bel : Belief of Fault

5. 결 론

본 논문에서는 실리콘 유입변압기의 고장진단을 위한 전문가 시스템을 구축하였다. 지식과 규칙의 불확실성을 처리하기 위하여 퍼지 규칙을 도입하였으며, 추론을 통하여 정상과 사고의 믿음척도 및 근사척도를 유도하였다. 또한 유중가스분석법의 단점인 변압기에 따라 가스량이 영향을 많이 받는 문제를 해결하기 위하여 데이터베이스를 연계하여 개개의 변압기별 이력을 관리할 수 있도록 하였다. 사례연구를 통하여 본 전문가시스템을 검증하였으며 향후 실증 실험을 통한 더 많은 연구가 이루어진다면 유중가스 분석을 이용하여 실리콘 유입변압기를 효과적으로 진단 할 수 있을 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

[1] Wayne J. Chatterton, "An Update on Silicone Transformer Fluid: Manufacturing, Maintenance and End of Life Options", Conference record of the IEEE International Simposium on Electrical Insulation, April 2000.

[2] IEEE P-1258, Trial-Use Guide for the Interpretation of Gases Generated in Silicone-Immersed Transformer Draft-9, IEEE Inc, NY, August 13, 1999.

[3] J. Dombi, Membership Function as an Evaluation, Fuzzy Set and Systems, 35, 1990.

[4] 전영재, "유중가스 분석법을 이용한 변압기 고장진단 전문가 시스템", 숭실대학교 석사학위논문, 1996년.

[5] IEEE Std. C57.104, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformer, 1991.

[6] J. J. Kelly, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis", IEEE Trans. on IA, Vol. IA-16, No. 6, pp. 777-782, Nov. 1980.