

유증가스를 이용한 변압기 고장진단용 전문가 시스템 개발

°전영재° 윤용한° 김재철° 윤상윤° 최도혁°°

* 숭실대학교 전기공학과 ** 한국건설기술연구원

Fault Diagnostic Expert System Using Dissolved Gas Analysis in Transformer

°Young-jae Jeon° Yong-han Yoon° Jae-chul Kim° Sang-yun Yun° Do-hyuk Choi°°

* Dept. of Electrical Engineering in Soongsil Univ. ** KICT

Abstract

This paper presents the novel fault diagnostic expert system based on dissolved gas analysis(DGA) techniques in power transformer. The uncertainty of key gas analysis, norm threshold, and gas ratio boundaries are managed by using a fuzzy set concept. The uncertainty of rules are handled by fuzzy measures. Trend analysis through the monthly increment of key gas and DGA analysis are combined by the Dempster-Shafer theory, and the state of transformer and confidence factor are yielded by using this combined analysis. To verify the effectiveness of the proposed diagnosis technique, the expert system has been tested by using KEPCO's transformer gas records.

1. 서론

생활양식의 변화에 따른 고소비형 전력부하가 대도시 지역에 편중되어 증가하고 있는 반면 전력설비 증설은 한계점에 이르러 진압 안정도를 악화시키고 심화되면 계통의 전압붕괴로 인한 대규모 연쇄정전 현상이 일어난다. 이러한 현상을 미연에 방지할 수 있는 방법은 대용량 변압기와 같은 대용량 설비의 고장을 사전에 감시하고, 고장 발생시 빠른 시간 내에 해결하는 것이다.

울진중인 변압기의 내부이상을 사전에 감시하기 위한 상태진단법 중에서 신뢰성이 높아 가장 널리 이용되고 있는 방법이 절연유중에 용해된 가스분석에 의한 방법이다. 그러나 가스분석을 위한 기준이 많이 나왔지만 현실적으로 적용하기 어렵고 전문적인 기술을 습득한 사람을 필요로 하기 때문에 아직까지 경험적인 부분으로 남아있다. 이러한 이유로 지식베이스를 근거로 한 전문가 시스템이 진단문제에 적합하다 할 수 있다.

가스분석을 하는데 있어 가스성분비, 주요가스 분석, 가스성분비 경계 등에 불확실성이 존재하고 규칙 자체까지 불확실성이 있어 한가지 방법으로 정확한 진단을 하기에는 어려움이 따른다. 그러므로 가스 구성비, 주요가스 분석, 가스 구성비 경계 등의 불확실성을 퍼지집합 개념을 이용해 다루고, 데이터와 규칙의 불확실성을 포함한 진단결과에 대해 퍼지최도 개념을 적용하는 방향으로 연구가 진행되어왔다[1-2].

본 논문에서는 퍼지집합과 퍼지최도를 이용해 데이터와 규칙의 불확실성을 처리하고 신뢰도지수를 부여했을 뿐만 아니라 월별 증가량을 통한 가스의 경향분석을 Dempster-shafer 이론으로 가스분석과 결합해 보다 정확하고 신뢰성 있는 변압기 진단 및 진단 상태추정을 알 수 있게 하였고 그 상태에 따른 적절한 행동을 제시할 수 있게 되었다.

구축한 전문가시스템의 효과를 검증하기 위하여 한전에서 얻은 가스데이터를 가지고 테스트했다.

2. 변압기 진단방법

사고의 대부분이 초기 악화로부터 알 수 있어 변압기 상태를 초기에 진단할 수 있는 방법이 필요한데 가장 널리 쓰이는 방법이 절연유 중에 용해되어 있는 가스를 분석하는 것이다. 절연유 중에 용해되어 있는 가스를 분석하기 위한 방법은 크게 가스 구성비 분석과 주요 가스 분석으로 나눌 수 있다. 가스의 비율로 변압기 상태를 판별하는 가스 구성비 분석은 관련된 기준이 많이 나와있지만 대동적으로 쓰이는 것에 IEC, Rogers, Dornenburg 비율 등이 있고, 주요 가스 분석은 수소와 탄화수소 계열의 가스, 일산화탄소, 이산화탄소의 가스량을 가지고 변압기 상태를 진단한다[3].

가스 구성비 분석과 주요 가스 분석을 통해 비교적 정확한 진단을 할 수 있지만 현실에 적용하기에는 어려움이 있어 퍼지집합 개념을 이용해 불확실성을 처리하거나 퍼지최도를 이용해 두 가지 이상의 방법을 가지고 변압기 상태를 진단하려는 시도가 있어 왔다. 그러나 이런 방법을 쓰더라도 심각한 사고에만 명쾌한 결론을 내리고 초기 악화 진단에는 어려움이 있어 월별 증가량을 통한 경향분석 방안을 도입하였다[4].

표 1. 월별 증가량에 따른 상태 기준 (단위 : ppm)

구분	H ₂	HC	상 태
월증가량	H ₂ ≤ 20	HC ≤ 30	정 상
	20 < H ₂ ≤ 50	30 < HC ≤ 100	요 주 의
	50 < H ₂ ≤ 100	100 < HC ≤ 300	요 주 의
	H ₂ > 100	HC ≥ 300	사 고

위의 표와 같이 H₂와 HC(CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆)의 증가량을 4가지 상태로 구별하여 경향 분석을 하였고, 다음 장에 설명될 퍼지이론과 Dempster-Shafer 이론을 이용하여 DGA를 통해 얻은 결과와 경향분석을 통해 얻은 결과를 결합시킴으로써 초기 악화 진단을 정확하게 할 수 있을 뿐만 아니라 앞으로의 경향도 알 수 있어 적절한 유지 보수 대책을 제시할 수 있게 되었다.

3. 퍼지이론과 추론

3.1 기본적인 퍼지 이론

본 논문에서는 효과적인 연산을 위해 Dombi가 제안한 연산자를 사용하였다.

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

여기서, $\lambda < 0$ 이면 $C=A \cup B$ 가 되고 $\lambda > 0$ 이면 $C=A \cap B$ 가 된다. λ 가 0에 가까울수록 λ 의 영향이 크고 λ 가 무한대로 가면 일반적인 연산을 한다.

또한 식 (1)을 이용하기 위해 식 (2)를 사용하여 소속함수를 정했다.

$$\mu(x) = \frac{(1-\nu)^{\lambda-1}(x-a)^\lambda}{(1-\nu)^{\lambda-1}(x-a)^\lambda + \nu^{\lambda-1}(b-x)^\lambda} \quad (2)$$

여기서, a 는 구간의 하한치, b 는 구간의 상한치, λ 는 변화율, ν 는 굴절점이다.

불확실성을 포함한 정보와 다른 종류의 진단방법을 결합할 때 퍼지척도가 상당히 유용한데 기본적인 성질과 정의는 다음과 같다.[5]

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

아래를 만족할 때

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

여기서 P 는 멱집합이고 $m(A)$ 는 집합 A 의 증거인데 기본 할당 확률로 불린다.

믿음척도 $Bel(A)$ 와 근사척도 $P(A)$ 는 다음과 같이 구할 수 있고 역으로 $m(A)$ 도 구할 수 있다.

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (3)$$

$$P(A) = \sum_{B: A \cap B \neq \emptyset} m(B) \quad (4)$$

$$m(A) = \sum_{B \subseteq A} (-1)^{|A-B|} Bel(B) \quad (5)$$

DGA를 이용해 얻은 결과와 경향분석을 통해 얻은 결과를 Dempster-Shafer 결합법칙을 이용했으며 수식은 다음과 같다.

$$m_{1,2}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C)}{1 - K}, \quad A \neq \emptyset \quad (6)$$

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C)$$

여기서, K 는 $m(\emptyset) = 0$ 을 만족시키기 위한 정규화 계수이다.

3.2 규칙의 형태

지식기반 시스템의 기본적인 특성은 지식의 추가나 삭제가 편

리하고 존재하는 지식의 변환에 용이하다는 것이다. 또한 잘못된 데이터나 측정도 적절하게 분석에 이용해야 하는데 이를 위해서 규칙의 형태를 퍼지 집합과 퍼지 척도를 이용해 다음과 같이 구성하였다.

Rule R_i
IF 퍼지 조건 A_j
THEN 결론 B_k
REQUIRED r (믿음 척도)

측정한 데이터를 가지고 식 (2)를 이용해 A_j 를 구하고 A_j 와 r 을 근거로 해서 결론 B_k 의 퍼지값을 구한다. 구성된 사고 멱집합에서 같은 멱집합에 속한 규칙들을 아래의 수식으로 구할 수 있다.

$$P^{R_i+1}(B_k) = P^i(B_k) \cup (P^{R_i}(B_k) \cap r(R_i)) \quad (7)$$

여기서, $P^{R_i}(B_k)$ 는 조건질의 퍼지값이고 $r(R_i)$ 은 규칙의 믿음척도이다. 식 (7)은 식 (1)을 이용해 연산을 하는데 믿음척도가 낮은 규칙이 최종 결론에 적은 영향을 미치고 같은 결론에 많은 증거가 나오면 근사척도가 커지도록 수식화 하였다.

3.3 전체적인 추론

본 논문에서 제안한 변압기 고장 진단용 전문가시스템의 전체적인 추론과정은 그림 1과 같다.

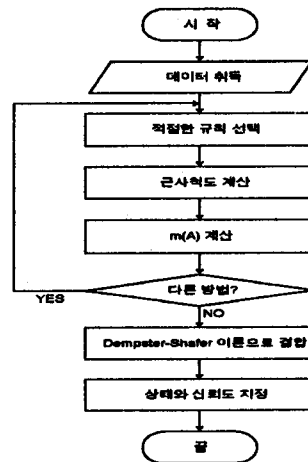


그림 1. 전체적인 추론 순서도

데이터 취득 후에 DGA를 이용해 적절한 규칙을 얻는다. 얻은 규칙들을 식 (7)을 이용해 각 노드에서 근사척도를 구한다. 근사척도를 이용해 믿음척도를 구하고 이 과정에서 발생하는 충돌을 해소하기 위해 퍼지제한을 이용하여 상호간의 충돌을 해소한다. 믿음척도와 근사척도를 가지고 식 (5)를 이용해 멱집합의 $m(A)$ 를 구한다.

월별 증가량을 통한 경향분석을 DGA와 똑같은 방법으로 하고 얻은 결과를 Dempster-Shafer 이론으로 DGA와 결합해 상태와 신뢰도 지수를 출력한다. 신뢰도 지수는 믿음척도의 값을 출력했으며 믿음척도의 값이 0.4 이하였을 때는 정상, 0.4에서 0.7 사이

에서는 요주의, 0.7 이상에서는 사고로 출력한다. 믿음최도가 속한 단계에 따라 적절한 보수 방안이 제시된다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 변압기 사고진단용 전문가시스템의 효과를 보이기 위해 2가지 사례를 보였다. 사례연구 1은 아크사고와 온도사고의 증거가 비슷하게 나오는 경우이고 사례연구 2는 온도사고와 정상 증거가 비슷하게 나오는 경우이다. 여기서 Case 1은 한달 전의 가스데이터이고 Case 2는 테스트한 날의 가스데이터이다.

표 2. 사례연구 1의 변압기 가스데이터 (단위 : ppm)

구분	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Case 1	95	6	23	24	5	19	33
Case 2	379	0	528	3179	2314	3020	320

표 3. 사례연구 2의 변압기 가스데이터 (단위 : ppm)

구분	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Case 1	450	68	5	13	3	7	8
Case 2	20000	1500	50	32	3.7	119	22

<사례연구 1의 결과>

IEC criteria : unknown

Rogers rate : unknown

제안한 방법 : 상태 - 사고(아크)

신뢰도 - 0.967

취할 행동 : 즉시 재검사를 하고 적절한 조치를 취한다.

적절한 조치후 보름이 지나면 재검사를 한다.

기존의 IEC, Rogers 성분비 기준을 가지고 분석한 결과 기준에 맞는 것이 없고 Dornenburg 규격으로는 아크사고와 온도사고가 같은 비율로 나온다. 본 논문에서 제안한 방법에 따라 분석을 하면 가스 구성비 분석과 주요가스 분석을 통해 아크사고와 온도사고의 증거가 비슷하게 나타나지만 아크사고라는 것을 알 수 있고, Dempster-Shafer 이론으로 가스 증가량을 통한 경향분석과 결합한 결과 사고일 확률이 0.967로써 사고라는 것을 명확하게 알 수 있었다. 따라서 변압기 상태가 명백한 고장상태이므로 즉시 변압기를 재검사하고 적절한 조치를 취하라는 제안을 나타내었다.

<사례연구 2의 결과>

IEC Criteria : unknown

Rogers rate : thermal

제안한 방법 : 상태 - 요주의(온도)

신뢰도 - 0.609

취할 행동 : 보름 후에 재검사를 한다.

이 사례는 가스 구성비로 분석하면 온도사고와 정상의 증거가 동시에 나타나고 주요 가스 분석을 통해 분석을 하면 일산화탄소와 이산화탄소의 양이 많아 온도사고로 볼 수 있다. 그러나 온도사고의 증거를 보여주는 다른 주요가스에 C₂H₂를 제외한 탄화수소계열의 가스, 즉 CH₄, C₂H₄, C₂H₆가 있는데 가스량이 비교적 적어 완전한 온도사고라 보기 어렵다. 가스 성분비와 주요 가스 분석을 통하면 정상 증거보다 온도사고 증거가 높게 나타나는데 월별 증가량을 통해 분석하는 경향분석에는 온도사고보다 정상의 증거가 높게 나타나 이것을 Dempster-Shafer 이론으로 결합을 하면 사고일 확률이 0.607이 된다. 이 정도는 사고확률이 약간 높게 나타나기는 하지만 명백한 사고상태라 보기 어려워 '요주의' 판정을 내리고 보름 후에 재검사를 하라는 제안을 한다.

5. 결론 및 향후계획

본 논문은 고장이 의심되는 변압기의 초기상태를 진단하고 보수하는 방안을 제시하였으며 퍼지집합과 퍼지척도 개념을 이용해 데이터와 규칙의 불확실성을 처리했다. 일반적으로 널리 쓰이는 DGA를 보완하고 월별 증가량을 통한 경향분석을 결합함으로써 보다 정확하고 신뢰성 있는 변압기 진단 및 진단 상태추정을 알 수 있게 하였을 뿐만 아니라 변압기 상태에 따른 적절한 행동도 가능해졌다.

향후 DGA 추론시 일어나는 충돌 해소와 보다 합리적인 경향 분석이 필요하며 변압기 상태뿐만 아니라 설치년도, 기름량, 사고 기록 등을 포함한 진단방안도 고려할 예정이다. 또한 초음파를 이용한 진단법과 진동을 이용한 진단법을 추가하여 보다 완전한 전문가시스템을 구축할 예정이다.

6. 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 대학 부설연구소 연구과제 "변압기 고장진단을 위한 전문가 시스템에 관한 연구"에 따른 연구비로 수행되었음.

참고문헌

- [1] C.E. Lin, J.M. Ling and C.L. Huang, "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis and Maintenance Using Dissolved Gas Analysis," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 8, No 1, January 1993
- [2] K. Tomsovic, M. Tapper and T. Ingrvarsson, "A Fuzzy information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp. 1638-1646
- [3] JOSEPH J. KELLY, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-16, No 6, November 1980
- [4] 남창현 외2명, "변압기 유중가스 상시 감시 시스템의 운용 연구," June 1995
- [5] G.J. Klir and T.A. Folger, *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice-Hall, New Jersey, 1988.