

Dempster-Shafer 결합 규칙을 이용한 유증 가스 분석법

윤용한, 김재철
 송실대학교 전기공학과

Dissolved Gas Analysis Using the Dempster-Shafer Rule of Combination

Yong-Han Yoon, Jae-Chul Kim
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - This paper presents a new approach to diagnose and detect faults in oil-filled power transformers based on various dissolved gas analyses. A theoretic fuzzy information model is introduced. An inference scheme which yields the 'most' consistent conclusion proposed. A framework is established that allows various dissolved gas analyses to be combined in a systematic way such as the Dempster-Shafer rule. Good diagnosis accuracy is obtained with the proposed approach.

1. 서론

전력용 유입 변압기의 고장 진단 방법으로써 유증 가스 분석법은 절연유중에 용해되어 있는 가스의 분석으로 내부의 고장 유무 및 고장의 종류를 진단하는 방법으로 1960년대에 연구가 추진되어 1970년대에 실용화되었으며, 현재 세계적으로 널리 이용되고 있다.[1-3] 그러나 유증 가스 분석법은 변압기 고장 판정 기준과 진단 결과에 영향을 미치는 요인이 다양하기 때문에 현재에도 경험적인 판단으로 처리되고 있다. 또한, 지금까지 연구된 결과들은 전력용 유입 변압기의 고장 진단에 수학적인 절대 기준을 사용하는 모순이 있으며, 이를 극복하기 위한 지능적인 접근 방법조차도 전문가가 결정해야 할 파라미터가 다수 존재하는 문제점과 어떤 진단 기준에 의하여 어떻게 고장을 판정할 수 있는지 모호한 점이 많이 내포되어 있다.[4-7] 이와 같이 유증 가스 입력 정보의 부정확 및 불확실성, 고장 판정 기준의 다양성은 전력용 유입 변압기의 고장 진단에 부정확성을 나타내는 큰 원인으로 작용한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하는 방법으로서 이미 많은 연구가 이루어진 다양한 퍼지 의사결정(fuzzy decision making) 기법 중 Dempster-Shafer 결합 규칙의 증거 이론(이하 D-S 이론)을 적용한 새로운 유증 가스 분석법을 제안하였다. D-S 이론 기법은 불확실한 현상 및 정보의 처리를 통한 의사결정 문제에 있어서 매우 유용한 방법론을 제공하고 있으며[8-10], 최근 불확실한 정보의 처리를 요구하는 전력 시스템의 여러 문제들에 적용되어 그 효용성이 매우 큰 것으로 인정받고 있다. 본 논문에서 제안한 새로운 유증 가스 분석법은 가스 구성비 분석(IEC 기준)과 주요 가스 분석(한국 전력 공사 기준)을 각각 적용하여 최종 진단 결과를 D-S 이론으로 결합하였다. 따라서 입력된 유증 가스 분석 자료에 따라 다양한 유증 가스 분석 방법이 적용된 후, 전력용 유입 변압기의 진단 결과(고장 유무 인식 및 해석)가 제시되도록 구성하였다.

2. 유증 가스 분석법

전력용 유입 변압기 내부에서 이상(부분 방전, 아크 방전, 국부 과열 등)이 생기면 반드시 열 발생이 수반된다. 이때 열원에 접촉된 절연 재료는 열 분해되어 각종 절연 탄

화물과 H₂(수소), CH₄(메탄), C₂H₂(아세틸렌), C₂H₄(에틸렌), C₂H₆(에탄), CO(일산화탄소), CO₂(이산화탄소), O₂(산소), N₂(질소) 등의 가스가 발생하며, 각 발생 가스는 대부분 절연유중에 용해된다. 그러므로 전력용 변압기에서 절연유를 채취하여 유증 가스를 분석하면 발생 가스 및 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 유증 가스 분석법을 이용한 전력용 유입 변압기 고장 진단 방법으로는 다음과 같은 것이 대표적이다.

2.1 가스 구성비율 이용한 분석

유증 가스 분석법에서 가스 구성비율 이용하는 분석 방법은 매우 다양하지만 대표적으로 사용되는 것은 IEC[2], Rogers[1], Dornenburg[1] 기준 등이 있다. IEC 기준은 그 중에서도 가장 일반적으로 사용되고 있는 것으로 5개의 유증 가스로 조합한 3종류의 가스 구성비율 사용한 것이며, 가스 성분의 비율(C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆)에 따라 코드를 부여한 후 고장(이상)의 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. 표 1은 가스 구성비율 이용한 분석에 따른 IEC의 기준을 나타내고 있다.

표 1. 가스 구성비율 분석에 따른 IEC의 기준

가스 구성비율 범위 [ppm/ppm]	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
< 0.1	0	1	0
0.1 ~ 1.0	1	0	0
1.0 ~ 3.0	1	2	1
> 3.0	2	2	2

경우	고장 종류	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
0	경년 열화 (정상)	0	0	0
1	저 에너지 부분 방전	0	1	0
2	고 에너지 부분 방전	1	1	0
3	저 에너지 아크 방전	1, 2	0	1, 2
4	고 에너지 아크 방전	1	0	2
5	과열(< 150°C)	0	0	1
6	과열(150°C ~ 300°C)	0	2	0
7	과열(300°C ~ 700°C)	0	2	1
8	과열(> 700°C)	0	2	2

2.2 주요 가스를 이용한 분석

전력용 유입 변압기에서 내부 사고가 발생하는 요인은 절연유 과열, 유증 아크 분해, 고체 절연물 과열 및 고체 절연물 아크 분해 등을 생각할 수 있다. 일반적으로 이와 같은 고장에 따른 발생 가스는 표 2와 같다. 표 2의 내용을 근거로 나타낸 기준은 한국 전력 공사에서 사용하는 것으로 주요 가스 분석에 따른 방법을 사용하고 있다.[3] 이 방법은 발생 가스의 성분을 조사함으로써 고장 판정이 용이하다는 것에 장점이 있다.

표 2. 주요 가스 분석에 따른 한국 전력 공사의 기준

주요 가스	고장 종류
H ₂	부분 방전
CO & CO ₂	고체 절연물 분해
CH ₄ & C ₂ H ₆	과열(저온)
C ₂ H ₂	아크 방전
C ₂ H ₄	과열(고온)

단위 [ppm]	정상	요주의	고장
H ₂	< 400	400~800	> 800
CO	< 300	300~800	> 800
C ₂ H ₂	< 20	20~100	> 100
CH ₄	< 250	250~750	> 750
C ₂ H ₆	< 250	250~750	> 750
CO ₂	< 4000	4000~7000	> 7000
TCG	< 700	700~1800	> 1800
증가량	-	≥ 250/year	≥ 100/month

(주) TCG(가연성 가스 : total combustible gas)
= H₂ + CH₄ + C₂H₂ + C₂H₄ + C₂H₆ + CO

2.3 문제점

일반적으로 IEC 기준과 같은 가스 구성비 분석으로 전 력용 유입 변압기의 고장 진단을 수행할 수 있지만 현장에 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉 IEC 기준에 기초 하여 3종류의 가스 비율 조합으로 코드를 구했지만 부합되 는 고장 진단 유형이 나타나지 않을 수도 있다는 것이다. 관련 예는 표 3에 나타내었다. 또한 동시 다발적인 사고에 대응할 수 없고, 고장의 심각도를 판정하기 곤란한 문제점 도 가지고 있다.

표 3. '판정 불가' 형태가 존재하는 관련 예

가스량 [PPM]	판정						
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
20000	150	50	32	4	110	22	
IEC	종류	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		CH ₄ /H ₂		C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	
	구분						
	비율	0.04		0.64		5.00	
	코드	0		0		2	
판정	판정 불가(unknown)						

주요 가스 분석 기준은 전력용 유입 변압기 각각의 전 압, 용량, 절연유 열화 방지 방식, 운전 경력이 서로 다르므 로 해당 변압기의 유중 가스 분석 결과에 따라 어떻게 적 용·판정하는가는 매우 어려운 문제이다. 현실적으로는 판 정 기준을 일괄적으로 적용하고 있기 때문이다.

참고적으로 IEC 기준과 한국 전력 공사 기준을 서로 비교하면 변압기 고장 판정에 있어 상당한 차이점을 발 견할 수 있다. 표 4는 IEC 기준과 한국 전력 공사 기준 을 1000대의 같은 변압기에 적용하여 상호 비교한 것으 로, '정상'의 관점에서 비교한다면 상당한 차이를 보이고 있다. 그러므로 유중 가스 분석으로 전력용 유입 변압기의 고장 진단을 수행하는데 있어서는 이들 몇 가지 방법을 병 용하는 것이 효과적이다.

표 4. IEC 기준과 한국 전력 공사 기준의 상호 비교

IEC 기준	정상	부분 방전	아크 방전	과열	판정 불가
		89	180	112	288
한국 전력 공사 기준	정상	요주의	이상	위험	
		703	186	84	27

따라서 본 논문에서는 유중 가스 분석에 관련된 대표 적인 방법 중에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 가스 구 성비를 이용한 분석 방법과 주요 가스를 이용한 분석 방법

을 각각 적용한 후 이를 D-S 이론으로 결합한 새로운 유 중 가스 분석 방법을 제안한다.

3. Dempster-Shaper 결합 규칙

인간의 불확실한 지식을 표현하고 이용하는 방법에 대해서는 Probabilistic Approach, Bayesian Approach, Dempster-Shafer Thoery of Evidence, Fuzzy Logic Ceryainty Factors 등 많은 연구가 이미 이루어졌다.[9] 이들 방법의 공통적인 특징은 전문가로 하여금 예측의 불확실성을 확률적인 수치로 표현하도록 하는 데에 있 다. 그러나 이러한 방법들에 의해 파악된 예측치는 너무 주관적이기 때문에 동일한 상황에서도 전문가마다 상이 할 수 있는 문제점을 안고 있다. 이 문제에 대한 해결책 으로서 복수의 전문가들로부터 불확실한 상황에 대한 예 측치를 파악하고 이를 예측치를 종합하는 방안들이 제시 되었다. 불확실한 상황에 대한 예측에 있어서 의견이 종 합되는 전문가의 수가 증가할수록 예측의 정확성도 증가 한다는 사실은 많은 연구자들에 의해 이미 밝혀진 바가 있다.[9]

본 논문은 복수 의견의 종합 방법으로 1967년에 Dempster에 의해 최초로 소개되었으며, 1976년 이후에 는 Shafer에 보다 발전된 D-S 이론을 사용하였다. D-S 이론은 원래 서로 독립적인 복수의 증거가 의사 결정에 미치는 영향을 종합하는 방법으로 개발되었고, 후에는 불확실한 의견을 종합하는 데에도 효과적으로 사용될 수 있다는 것이 증명되었다. 또한 D-S 이론은 전문가가 예 측치를 주관적인 확률로 표현할 때 자신의 의견에 대한 자신감을 표현할 수 있기 때문에 별도의 비중을 적용하 지 않더라도 다수 전문가의 의견을 객관적으로 종합할 수 있다는 장점이 있다.

3.1 Dempster-Shafer 결합 규칙[8, 10]

불확실성(uncertainty)에는 'Vagueness', 'Ambiguity' 두 가지가 있다. 퍼지 집합 이론으로 다루어지는 vagueness는 경계의 불확실성으로 인한 불확실성을 나 타내며, 퍼지 척도도 다루어지는 ambiguity는 어느 크리 슿 집합(crisp set)에 소속되느냐의 선택상의 불확실성을 나타낸다. 변압기 진단과 같은 문제는 '정상' 또는 '이상' 과 같은 진단 결과가 주어진 진단 자료로 파악하여 결정 하는 문제이기 때문에 선택의 문제로서 퍼지 척도 문제 라고 할 수 있다.

D-S 이론은 퍼지 척도의 한 이론으로 임의 증거의 가설에 대한 증거도를 m(basic probability assignment) 으로 나타내며 이는 0에서부터 1사이의 값으로 나타낸 다. 다수의 증거가 존재할 때 이들의 지지도를 식 (1)과 같은 Dempster 결합 규칙을 적용하여 합성 증거도를 계 산하며 이로부터 최종적으로 가설에 대한 식 (3)의 믿 음 척도(belief measure)를 구한다.

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

$$m_{1,2}(A) = 0, \quad A = \emptyset$$

$$\text{단, } K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C), \quad m_{1,2}(\emptyset) = 0 \quad (2)$$

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

여기서 가설이라 함은 진단의 경우 '정상', '이상' 등과 같은 결론의 대상을 말한다. 증거도는 '정상', '요주의', '이상' 등과 같은 단순 가설만이 아니고 '요주의 또는 이 상' 같은 복합 가설에도 배정될 수 있으며, 하나의 증거 가 모든 가설에 대하여 취할 수 있는 증거도는 합하여 1 이 되어야 한다.

위의 식에서 A, B, C는 '정상', '이상'과 같은 가설을 나타내며 $m_1(B)$ 은 가설 B에 대한 증거 1의 증거도를 나타낸다. 또한 $m_{1,2}(A)$ 는 증거 1 및 증거 2를 동시에 고려한 합성 증거도를 나타낸다. K는 교집합이 없는 가설에 배정된 증거도의 합을 나타내며 이는 다른 가설에 배정된 합성 증거도를 정규화하는데 이용된다. 이와 같은 결합 규칙을 모든 증거의 쌍에 적용을 하여 최종 증거도를 계산하는데 이때 결합의 순서는 결과 값에 영향을 미치지 않기 때문에 D-S 결합 규칙은 병렬 처리가 가능하여 추론시 속도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

주어진 증거에서는 정보(자료)에 대한 모순과 부정 확이 있을 수 있다. 따라서 이와 같은 것의 평가는 확률 정보 이론(probabilistic information theory)의 엔트로피(entropy)와 유사하게 계산될 수 있다. 식 (4)는 'confusion'으로, 식 (5)는 'vagueness'로 참조할 수 있다. 이들 척도는 정보의 질을 평가하는데 사용할 수 있고, 결론적으로 진단의 최종 결과에 대한 신뢰도 부여에 사용될 수도 있다.

$$C(m) = - \sum_{m(A) \neq 0} m(A) \cdot \log \text{Bel}(A) \quad (4)$$

$$V(m) = - \sum_{m(A) \neq 0} m(A) \cdot \log |A| \quad (5)$$

단, |·|는 cardinality이다.

최종적인 결론은 각 가설에 대한 최종 지지도의 값으로 내릴 수 있으며 이는 가장 큰 지지도를 결론으로 할 수도 있으며 또는 복합 가설에 포함된 지지도를 단순 가설에 배분한 결과로 판정할 수도 있는 등의 다양한 비퍼지화(defuzzification)의 방법에 따라 결론을 내릴 수 있다.

3.2 규칙의 형태 [7, 8]

본 논문에서는 잘못된 정보나 측정도 적절하게 분석에 이용하기 위해 규칙의 형태를 퍼지 집합과 퍼지 척도의 이용으로 다음과 같이 구성하였다.

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

측정한 진단 자료를 가지고 퍼지 소속 함수를 이용해 A_j 를 구하고, A_j 와 r 을 근거로 해서 결론 B_k 의 퍼지 값을 구한다. 그리고 구성된 사고 딱 집합에서 같은 딱 집합에 속한 규칙들은 다음 수식으로 각 진단 결과에 대한 근사 척도를 구할 수 있다.

$$Pl^{i+1}(B_k) = Pl^i(B_k) \cup (Pl^i(B_k) \cap r(R_i)) \quad (6)$$

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (7)$$

식 (6)은 믿음 척도가 낮은 규칙이 최종 결론에 적은 영향을 미치고 같은 결론에 많은 증거가 나오면 근사 척도가 커지도록 하였다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 내용을 검증하기 위해서 다음과 같은 사례 연구를 실시하였다.

4.1 사례 연구 1

▶ 가스 농도

$H_2=50, CH_4=32, C_2H_2=4, C_2H_4=110,$
 $C_2H_6=22, CO=1500, CO_2=20000$

- ▶ 과열(<150°C) : Some supporting evidence
- ▶ Confusion = 0.871, Vagueness = 0.067

4.1 사례 연구 2

▶ 가스 농도

$H_2=200, CH_4=680, C_2H_2=88, C_2H_4=1600,$
 $C_2H_6=190, CO=1100, CO_2=15000$

- ▶ 과열(>700°C) : Significant supporting evidence
- ▶ Confusion = 0.715, Vagueness = 0.147

5. 결론

전력용 유압 변압기의 진단과 같은 분야는 문제의 성격상 다양한 정보와 다양한 진단 방법을 종합적으로 고려할 수 있는 Dempster-Shafer 이론과 같은 퍼지 의사 결정 기법을 적용할 경우 종래의 진단 방법에 비하여 신뢰성을 크게 높일 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서 제안한 새로운 유중 가스 분석법은 가스 구성비 분석(IEC 기준)과 주요 가스 분석(한국 전력 공사 기준)을 각각 적용하여 최종 진단 결과를 Dempster-Shafer 이론으로 결합하였다. 따라서 입력된 유중 가스 분석 자료에 따라 다양한 유중 가스 분석 방법이 적용된 후, 전력용 유압 변압기의 진단 결과(고장 유무 인식 및 해석)가 제시되도록 구성하였다. 본 논문에서 제안된 유중 가스 분석법은 한국 전력 공사의 변압기 유중 가스 기록으로 그 효용성을 입증하였다. 따라서 유중 가스 분석만으로 현실성 있는 변압기 진단 및 상태 추정이 가능하게 되었고, 이것의 적용으로 적절한 유지 및 보수 대책 방안을 제시할 수 있게 되었다. 향후 다양한 유중 가스 분석법 뿐만 아니라 부분 방전 측정법, 진동 신호 분석법 등과 같은 다른 방법론의 전력용 변압기 진단을 수행하여 그 결과를 Dempster-Shafer 이론으로 결합한다면 더욱 신뢰성 있는 변압기 진단을 수행할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 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.
- [2] IEC Publication 599-1978, *Interpretation of The Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in Service*
- [3] 남창현 외, 변압기 유중 가스 상시 감시 시스템의 운용 연구(연구 보고서), 전력연구원, 1994.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Jae-Chul Kim et. al., "Expert System for Fault Diagnosis of Transformer," *Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 45-53, March 1997.
- [7] 윤용한 외, "유중 가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장 진단용 코호넨 네트워크," *대한전기학회 논문지*, Vol. 47, No. 6, pp. 741-745, June 1998.
- [8] G.J. Klir and T.A. Folger, *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice Hall, Inc., 1988
- [9] 변지석, "전문가 그룹의 의견을 종합하는 데 있어서 Probabilistic Approach와 Dempster-Shafer Approach의 비교 분석," *한국전문가시스템학회 추계학술대회 논문집*, pp. 261-267, November 1994.
- [10] 이승재, "Dempster-Shafer 증거 이론을 이용한 지능형 보호 계전기," *전력계통 보호기술 연구회 소식지(기술 해설)*, 창간호, pp. 12-14, October 1998.