

유증가스 분석법에 Fuzzy 이론을 이용한 전력용 변압기 고장진단 기법 개발

論 文

50C-11-6

Development of Fault Diagnosis for Power Transformer with Fuzzy Theory in Gas Analysis Method

崔仁赫* · 鄭吉朝** · 申明澈***
(In-Hyuk Choi · Gil-Jo Jung · Myong-Chul Shin)

Abstract - In this paper, we described the new IEC method with fuzzy theory for detecting abnormal causes within transformer. The proposed technique presented the solution of limitation in case of lying nearly boundary conditions and not having codes for measured gas values in IEC code. Also, we proved the confidence of diagnosed results in the use of the gases values in real fault transformers.

Key Words : Fault Diagnosis, Power Transformer, IEC Method, Fuzzy Theory

1. 서 론

최근 국내 산업의 발달과 현대화에 의하여 전력수요가 크게 증가하고 안정된 전력공급의 필요성이 점차 커져가고 있다. 그러나 전력을 생산하기 위한 송, 변전 설비는 부지 확보에 어려움이 많아 부하에서 멀리 떨어진 오지에 위치하고 있다. 또한, 국내 전력수요의 대부분은 도심지 및 이와 가까운 산업단지에 집중되고 있으므로, 한국전력에서 원활한 전력공급을 위하여 2002년에는 현재의 345 KV 송전을 765 KV로 격상 공급할 계획이다. 그러나, 765 KV급으로 공급할 경우 단일 설비에서 공급되는 전력량이 크므로, 고장시 정전에 따른 경제적 파급 효과는 지대하다. 이러한 변전기기 중 가장 중요한 기기가 전력용 변압기이다. 현재, 국내외적으로 개발된 변압기 내부 이상원인 검출 기술로는 유증가스 진단, 부분방전(초음파, 누설전류), 온도진단, 팬 및 펌프의 동작진단 등이 있다. 여러 가지 진단 방법중 가장 신뢰성이 우수한 기술은 1970년대 부터 적용되고 있는 유증가스진단 기술이다.^(1,2)

일반적으로, 유입변압기에 아크 또는 부분방전과 같은 국부 과열 현상이 발생하면, 이 열원과 접촉하고 있는 절연유와 절연지 등의 절연물은 열에 의해 열화 분해된다. 절연물의 열열화 현상은 화학반응에 의해 가스를 발생시키며, 이 가스는 절연유중에 용해되고 일부는 유면상의 공간에 방출된다. 이때, 방출되는 가스는 10여종에 이르며, 이상의 종류에 따라 발생가스의 종류 및 농도가 다르게 된다. 현재 개발되

어 사용되고 있는 가스분석에 의한 변압기 내부의 이상원인 검출 기술로는 IEC 법, Roger법, Dornenburg법, 가스 Pattern법 등이 있다. 이러한 방법들은 DGA (Dissolved Gas Analysis) 데이터를 이용한 오랜기간의 고장 진단에 따른 것이다.^(3,4)

본 논문에서는 상기 제시된 여러 가지 유증가스 진단방법 중 표준 진단방법으로서, 세계적으로 전력회사에서 가장 많이 사용되고 있는 IEC 진단법에 Fuzzy 이론을 도입하여 변압기 내부의 이상원인을 진단할 수 있도록 하였다.⁽⁵⁾ 제안된 방법은 1993년 개정된 IEC 진단법에서 많이 발생하는 문제점인 가스비율이 경계조건에 있는 경우의 해석의 난해성 및 해당 조건이 Code에 없는 경우의 해석도 가능하도록 하였다. 또한, 신뢰성을 검증하기 위하여, 실제 운전되고 있는 사고 변압기의 가스 농도를 이용하여 제시된 진단법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 전력용 변압기의 용해가스 및 진단방법

전력용 변압기의 아크나 부분방전에 의한 열적 스트레스는 함침된 절연지와 절연유의 열분해를 일으킨다. 일반적으로 열분해가스는 수소, 저급탄화수소(CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8)가스, CO, CO_2 등이 있다. 유증가스 분석법은 주요가스 분석법, 가스 비율에 의한 분석법, TCG(Total Combustible Gas) 등이 있다. 주요가스 분석법은 고장의 신뢰성있는 분석을 위하여 주요가스의 과거 이력이 필요하며, TCG 방법은 대략적인 절연 열화만을 해석하도록 되어 있어 세부적인 원인분석에 한계성이 있다. 이에 비해, 가스 비율에 의한 분석법은 가스 비율이 규정치에 존재하지 않거나 경계조건에 있는 경우의 해석에 대한 어려움이 있다. 각 분석법 마다 나름대로의 장단점은 있으나, 현재 국제적으로 가장 많이 적용되고 있는 방법은 비율에 의한 분석법이다.⁽⁶⁾ 또한, 비율에 의한 분석방법중 IEC법은 이상원인의 진단 종류가 다른 분석법보다 세분화되어 있고 신뢰성이 높아 국제

* 正 會 員 : 韓電電力研究院 先任研究員

** 正 會 員 : 韓電電力研究院 責任研究員

*** 正 會 員 : 成均館大學校 電氣電子 및 컴퓨터 工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 8月 29日

最終完了 : 2001年 10月 4日

적으로 전력회사에서 가장 널리 적용하고 있는 분석기법이며, 이러한 이유로 국내에서도 한국전력에서 이 방법을 채택하고 있다. 따라서, 다음에 언급할 퍼지 이론을 개정된 IEC 분석법에 적용하여 분석의 명확성 및 용이성을 도모하였다.

3. IEC법의 퍼지이론 적용

변압기 진단을 위하여 가장 일반적으로 사용되는 유증가스 분석법은 IEC Code법으로서, 새로 개정된 코드법에서는 표 1과 같은 가스조성과 조성비로서 변압기 초기 고장을 진단하고 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 각각의 고장원인은 조성비의 일정한 경계를 기준으로 해서 분류되며, 만약 경험이나 해석기술 부족으로 고장원인은 같지만 조성비가 경계선에서 조금 벗어날 경우 맞지 않는 고장원인으로 결론지을 수 있다.^[2] 또한, 고장유형중 D1, T1, T2의 C₂H₄/C₂H₆의 가스 조성비는 유사하므로 나머지 2개의 조성비가 해당 조건에 맞지 않는 경우에는 해석이 어렵게 되며, PD 및 T1은 해당되는 가스 조성비가 제시되지 않은 관계로 진단이 쉽지 않다. 따라서, 이러한 한계점을 배제할 수 있는 새로운 적용 방법이 필요하다.

표 1 IEC Code에 의한 유증가스 진단

Table 1 Gas diagnosis of IEC code

유형	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
1. PD	-	<0.1	<0.2
2. D1	1<	0.1 ≤ ≤0.5	1<
3. D2	0.6 ≤ ≤2.5	0.1 ≤ ≤1	2<
4. T1	-	-	<1
5. T2	<0.1	1<	1 ≤ ≤4
6. T3	<0.2	1<	4<

여기서, 유형의 세부 내용은 다음과 같다.

- PD : Cold Plasma(Corona) 형태의 부분방전
- D1 : Low Energy 방전
- D2 : High Energy 방전
- T1 : 종이를 갈색으로 변화시키는 300℃ 이하의 열적 결합
- T2 : 종이를 탄화시키는 300℃~700℃ 사이의 열적 결합
- T3 : Oil을 탄화시키고, 금속을 용해시키는 700℃ 이상의 열적 결합

3.1 가스조성비의 퍼지집합

구 IEC 진단법은 IEC에서 이미 코드화 하였기 때문에 별도로 코드화 작업을 할 필요가 없었지만^[7], 개정된 진단법은 코드화가 되어있지 않고 조성비 범위로만 되어있다. 따라서, 본 연구에서는 표 1의 IEC 진단에 의한 각 가스 조성비 범위를 표 2와 같이 코드화하는 작업을 하였다. 표 2에서와 같이 전체 가스 조성비를 a, b, c, d, e의 5가지로 분류하였으며, 각 가스 조성비를 식 1~식 3과 같이 표시하였다.

$$k = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \tag{1}$$

$$j = \frac{CH_4}{H_2} \tag{2}$$

$$m = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \tag{3}$$

따라서, Fuzzy 집합 U₁은 식 4와 같다.

$$U_1 = \{a, b, c, d, e\} \tag{4}$$

여기서, U₁은 가스 조성비의 전체집합을 나타내며, 각 가스 조성비의 소속함수(Membership function) 값을 행렬(Matrix) 벡터로 나타낼 수 있다.

표 2 가스조성비의 코드

Table 2 Code of gas ratio

범위	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
< 0.1	a	a	a
0.1 - 0.2	b	b	a
0.2 - 0.5	c	b	b
0.5 - 0.6	c	c	b
0.6 - 1.0	d	c	b
1.0 - 2.0	d	d	c
2.0 - 2.5	d	d	d
2.5 - 4.0	e	d	d
>4.0	e	d	e

표 3의 6가지 고장원인에 따른 IEC 조성비의 범위를 표 2에서 분류한 코드로 나타내면 표 3과 같다. 표 3에서와 같이 고장은 총 6가지로 분류할 수 있으며, 부분방전 1, 저에너지방전 2, 고에너지방전 3, 저온과열 4, 중온과열 5, 고온과열 6 등으로 표시될 수 있다. 따라서, 고장원인에 대한 전체의 Fuzzy 집합을 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \tag{5}$$

표 3 고장유형의 코드

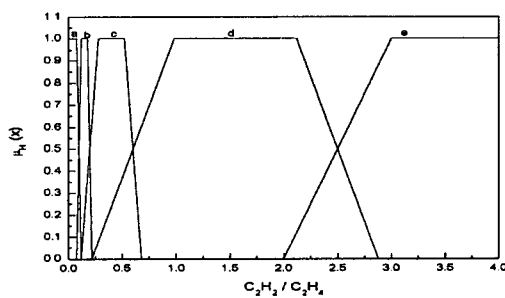
Table 3 Code of faults type

유형	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
1. PD	-	a	a
2. D1	d, e	b	c, d, e
3. D2	d	b, c	d, e
4. T1	-	-	a, b
5. T2	a	d	c, d
6. T3	a, b	d	e

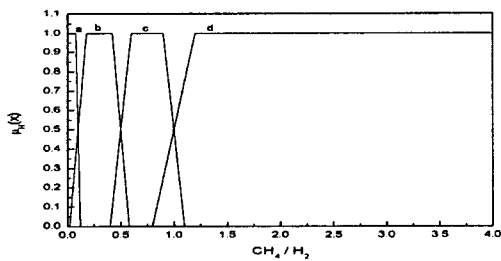
3.2 IEC code의 퍼지화

3.2.1 소속함수의 결정

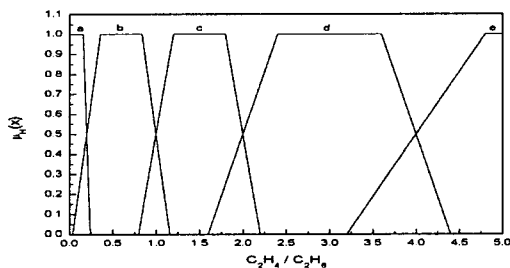
진단 퍼지 프로그램에서 진단 결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 집합의 각 요소가 그 집합에 속하는 정도 혹은 확률이라 할 수 있는 소속함수(Membership function)의 값이라 할 수 있다. 이러한 소속함수는 일반적으로 퍼지 이론에서 마름모형, 삼각형, Cauchy 형을 주로 사용한다. 유형의 선택은 실제의 고장자료를 적절한 자료분석을 통하여 선택하는 것이 바람직하지만, 본 연구에서는 고장유형이 바뀌는 위치에서의 고장유형을 신뢰성 있게 진단하는 것을 목적으로 하기 때문에, 그림 1의 (a), (b), (c)와 같이 마름모형으로 선택하였다.



(a) C₂H₂/C₂H₄의 소속함수
(a) Membership function of C₂H₂/C₂H₄



(b) CH₄/H₂의 소속함수
(b) Membership function of CH₄/H₂

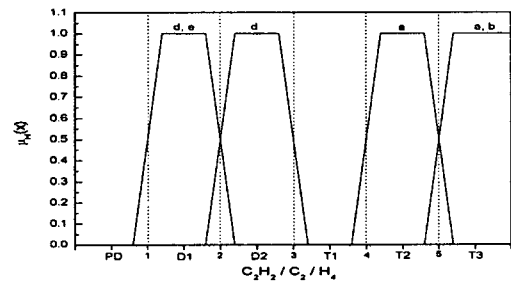


(c) C₂H₄/C₂H₆의 소속함수
(c) Membership function of C₂H₄/C₂H₆

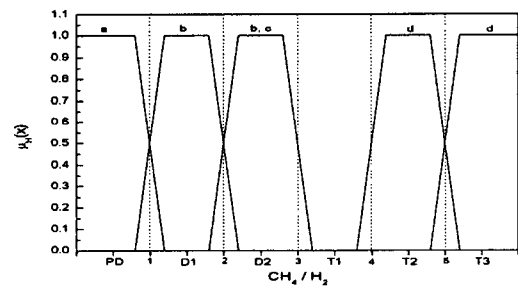
그림 1 가스조성비의 소속함수
Fig 1 Membership function of gas ratio

그림 1에서와 같이 소속함수의 최대 Grade는 1이고 최소는 0으로 하였으며, 마름모의 기울기는 표 2의 각 가스조성비의 코드 a, b, c, d, e를 구성하고 있는 기준 조성비중 큰 값에서 작은 값을 뺀 값의 20%를 기준치에 더하거나 빼어서 결정하였다. 예를 들어, C₂H₂/C₂H₄에서 코드 c의 조성비 범위는 0.2에서 0.6까지이며, 0.6에서 0.2를 뺀 0.4의 20%는 0.08이므로 기우는 선은 0.2쪽에서 0.12와 0.28 사이, 0.6에서는 0.52와 0.68 사이에 분포된다.

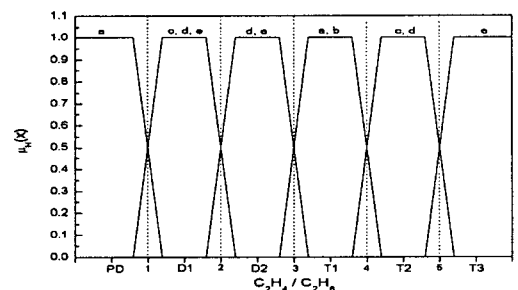
그림 2의 (a), (b), (c)는 각 가스조성비에서 고장원인에 대한 소속함수를 나타낸다. 그림 2에서와 같이 소속함수 유형도 그림 1과 유사한 마름모형을 사용하였다. 그림 2의 각 가스비에서 고장원인에 대한 코드 소속함수의 기울기는 그림 1의 각 가스조성에서 코드값의 기울기와 같다.



(a) C₂H₂/C₂H₄에서 각 코드의 고장원인에 대한 소속함수
(a) Membership function of each fault in C₂H₂/C₂H₄



(b) CH₄/H₂에서 각 코드의 고장원인에 대한 소속함수
(b) Membership function of each fault in CH₄/H₂



(c) C₂H₄/C₂H₆에서 각 코드의 고장원인에 대한 소속함수
(c) Membership function of each fault in C₂H₄/C₂H₆

그림 2 고장원인에 대한 소속함수
Fig 2 Membership function of each fault for codes

3.2.2 퍼지 벡터

소속함수는 C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆의 3가지 가스조성에서 a, b, c, d, e의 5개 코드의 조성비에 대한 소속함수와 고장원인에 대한 소속함수의 r가지로 되어 있다. 그러므로, 소속함수의 구성원이 되는 퍼지 벡터도 조성비와 고장원인의 2가지로 구성되며, 조성비에 의한 퍼지벡터를 F_r, F_f로 두면, 먼저 3개의 가스조성비 (k, j, m)로 구성된 퍼지벡터 F_r은 식 (6)과 같이 된다.

$$F_r = \begin{bmatrix} w_1^{\circ} \mu_k & w_1^{\circ} \mu_k & w_1^{\circ} \mu_k & w_1^{\circ} \mu_k & w_1^{\circ} \mu_k \\ w_2^{\circ} \mu_j & w_2^{\circ} \mu_j & w_2^{\circ} \mu_j & w_2^{\circ} \mu_j & w_2^{\circ} \mu_j \\ w_3^{\circ} \mu_m & w_3^{\circ} \mu_m & w_3^{\circ} \mu_m & w_3^{\circ} \mu_m & w_3^{\circ} \mu_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서와 같이 가스조성비는 j, k, m의 세가지이고, 코드는 a, b, c, d, e의 5개이기 때문에, 각 가스조성비에서 코드로 표시되는 퍼지벡터는 총 15개의 원소로 구성되며, w는 가중치함수(Weight function)를 나타낸다.

고장원인에서 코드로 표시되는 퍼지벡터는 가스조성비에서와 같이 3개의 가스조성비에 대하여 6개의 코드로 표시되기 때문에 각각의 고장에 대하여 F_r는 식 (7)과 같이 15개의 원소로 구성된 퍼지벡터로 표시되며, 고장유형이 6가지이므로 고장원인에 대한 퍼지벡터는 F_f(1), F_f(2) ... F_f(6)의 6가지로 결정된다. 예를 들어, 첫 번째 고장형태인 PD(부분방전)는 아래 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, F_r의 소속함수의 값을 모두 합한 것을 기준유형정도 T_r(k) (k=1, 2, ... 6)로 정의할 때 PD에 해당되는 T_s(1)는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$F_f(1) = \begin{bmatrix} \frac{\mu_{a_1} w_1}{R_k} & \frac{\mu_{b_1} w_1}{R_k} & \frac{\mu_{c_1} w_1}{R_k} & \frac{\mu_{d_1} w_1}{R_k} & \frac{\mu_{e_1} w_1}{R_k} \\ \frac{\mu_{a_2} w_2}{R_j} & \frac{\mu_{b_2} w_2}{R_j} & \frac{\mu_{c_2} w_2}{R_j} & \frac{\mu_{d_2} w_2}{R_j} & \frac{\mu_{e_2} w_2}{R_j} \\ \frac{\mu_{a_3} w_3}{R_m} & \frac{\mu_{b_3} w_3}{R_m} & \frac{\mu_{c_3} w_3}{R_m} & \frac{\mu_{d_3} w_3}{R_m} & \frac{\mu_{e_3} w_3}{R_m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_s(1) = \frac{\mu_{a_1} w_1}{R_k} + \frac{\mu_{b_1} w_1}{R_k} + \dots + \frac{\mu_{e_3} w_3}{R_m} \quad (8)$$

3.2.3 IEC 조성비에 의한 퍼지진단 방법

가스분석 결과로부터 얻은 각 가스의 데이터를 이용하여 본 연구에서 수행하고자 하는 퍼지 진단방법을 요약하면 다음과 같이 다섯 단계로 구분하여 설명할 수 있다.

1 단계 : 입력된 가스량으로 부터 3가지 C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆의 가스비를 계산한다.

2 단계 : 그림 1에서 각 코드 조성비의 범위에 소속되는 정도를 정량화한 소속함수 값을 계산한다.

$$F_r = \{ \mu_1^r, \mu_2^r, \dots, \mu_{15}^r \} \quad (9)$$

그리고, 그림 2에서는 고장유형별로 해당 가스조성의 소속함수값을 결정한다.

$$F_f(1) = (\mu_1^f(1), \mu_2^f(1), \mu_3^f(1), \dots, \mu_{15}^f(1)) \quad (10)$$

$$F_f(6) = (\mu_1^f(6), \mu_2^f(6), \mu_3^f(6), \dots, \mu_{15}^f(6))$$

3 단계 : 2단계에서 결정한 F_r과 F_f의 각 벡터값의 곱으로 기준유형의 정도를 계산한다.

$$F_p(k) = F_f(k) * F_r, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (11)$$

실제 F_p(k)는 가스조성비에 대한 소속정도와 고장원인에 대한 소속정도를 곱해서 나타낸 것이기 때문에 이는 가스조성비를 고려한 고장정도를 나타낸 것이다. 예를 들어 어떤 고장원인에 해당되는 소속정도를 1이라고 할 때, 가스조성비가 소속되는 정도가 0.7이라고 하면 두 곱은 0.7이 되어 실제의 고장원인은 0.7의 소속함수를 가지게 된다.

4 단계 : 각 고장에 대한 근접정도를 계산한다.

$$F(k) = \frac{F_p(k)}{T_s(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

식(12)는 어떠한 고장원인에서 기준이 되는 값에 대한 현재의 값의 비이므로, 이는 각 고장에 대한 현재 값의 근접정도이다.

5 단계 : Fuzzy이론에서 최대값 정의를 이용하여, 가장 우세한 값을 가지는 퍼지벡터를 고장원인으로 결정하였다.

$$F_d = \text{Max}\{F(1), F(2), \dots, F(6)\} \quad (13)$$

만약 F_d 값 중 가장 큰 값이 F(1)로 결정된다면, 고장원인은 표 3에 따라 "PD(부분방전)"으로 판정될 것이다.

예를들어, 40년간 사용된 132/66kV, 18MVA 변압기의 고장원인을 제안된 IEC 조성비에 의한 퍼지 진단법에 적용한 결과는 다음과 같다. 대상 변압기의 가스 농도는 H₂ = 24, C₂H₂ = 150, C₂H₄ = 43, C₂H₆ = 5, CH₄ = 13, CO = 598, CO₂ = 1,580, O₂ = 7,685, N₂ = 66,850이며, 단위는 ppm이다.

1 단계 : 가스조성비는 식 (1)~식 (3)에 의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k &= 150/43 = 3.49 \\ j &= 13/24 = 0.54 \\ m &= 43/5 = 8.6 \end{aligned}$$

2 단계 : F_r = {C₁₁ C₁₂ C₁₃ C₁₄ C₁₅ C₂₁ C₂₂ C₂₃ C₂₄

$$\begin{aligned}
 & \{C_{25} \ C_{31} \ C_{32} \ C_{33} \ C_{34} \ C_{35}\} \\
 & = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0.25 \ 0.7 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\} \\
 F_r(1) & = \{x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{24} \\
 & \quad x_{25} \ x_{31} \ x_{32} \ x_{33} \ x_{34} \ x_{35}\} \\
 & = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\} \\
 T_s(1) & = x_{11} + x_{12} + \dots + x_{35} \\
 & = 2 \\
 F_r(2) & = \{0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1\} \\
 T_s(2) & = 6 \\
 F_r(3) & = \{0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1\} \\
 T_s(3) & = 5 \\
 F_r(4) & = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\} \\
 T_s(4) & = 2 \\
 F_r(5) & = \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0\} \\
 T_s(5) & = 4 \\
 F_r(6) & = \{1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\} \\
 T_s(6) & = 4
 \end{aligned}$$

3 단계 : $F_p(1) = F_r(1) * F_r = 0$
 $F_p(2) = F_r(2) * F_r = 2.25$
 $F_p(3) = F_r(3) * F_r = 1.95$
 $F_p(4) = F_r(4) * F_r = 0$
 $F_p(5) = F_r(5) * F_r = 0$
 $F_p(6) = F_r(6) * F_r = 1$

4 단계 : $F(1) = F_p(1) / T_s(1) = 0$
 $F(2) = F_p(2) / T_s(2) = 0.375$
 $F(3) = F_p(3) / T_s(3) = 0.39$
 $F(4) = F_p(4) / T_s(4) = 0$
 $F(5) = F_p(5) / T_s(5) = 0$
 $F(6) = F_p(6) / T_s(6) = 0.25$

5단계 : $F_d = \text{Max}\{F(1) \ F(2) \ F(3) \ F(4) \ F(5) \ F(6)\}$
 $= F(3)$

따라서, F_d 가 $F(3)$ 이므로, 고장원인은 "고에너지 방전"이 된다. 이는 국가에서 지정한 전력연구원내의 변압기 절연유 분석기관인 "한국교정·시험기관(KOLAS)"의 시험결과와 일치한다.

예제 1

한국전력 변전소에서 운용하고 있는 이상이 발생된 변압기의 가스농도가 아래와 같다. 이를 제안된 방법에 의해 해석하면 다음과 같다.
 $H_2 = 200, C_2H_2 = 10, C_2H_4 = 150, C_2H_6 = 30, CH_4 = 600,$
 $CO = 180, CO_2 = 771, O_2 = 5,985, N_2 = 81,854$ 이며, 단위는 ppm이다.

1 단계 : $k = 0.07, j = 3, m = 5$

2 단계 : $F_r = \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\}$

3 단계 : $F_p(1) = 0, F_p(2) = 1, F_p(3) = 1, F_p(4) = 0, F_p(5) = 2, F_p(6) = 3$

4 단계 : $F = \{0 \ 0.17 \ 0.2 \ 0 \ 0.5 \ 0.75\}$

5단계 : $F_d = \text{Max}\{F(1) \ F(2) \ F(3) \ F(4) \ F(5) \ F(6)\}$
 $= F(6)$

따라서, F_d 가 $F(6)$ 이므로, 금속을 용해시키는 "700℃ 이상의 열적 결함"이 된다. 계산된 결과는 전력연구원내의 "한국교정·시험기관(KOLAS)"의 시험결과와 일치한다.

예제 2

국내 원자력 발전소에서 사용하고 있는 이상이 발생된 변압기의 가스농도가 아래와 같다. 이를 제안된 방법에 의해 해석하면 다음과 같다.

$H_2 = 266, C_2H_2 = 1, C_2H_4 = 862, C_2H_6 = 328, CH_4 = 584,$
 $CO = 919, CO_2 = 1,870, O_2 = 8,180, N_2 = 62,830$ 이며, 단위는 ppm이다.

1 단계 : $k = 0.001, j = 2.19, m = 2.63$

2 단계 : $F_r = \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0\}$

3 단계 : $F_p(1) = 0, F_p(2) = 1, F_p(3) = 1, F_p(4) = 0, F_p(5) = 3, F_p(6) = 2$

4 단계 : $F = \{0 \ 0.17 \ 0.2 \ 0 \ 0.75 \ 0.5\}$

5단계 : $F_d = \text{Max}\{F(1) \ F(2) \ F(3) \ F(4) \ F(5) \ F(6)\}$
 $= F(5)$

따라서, F_d 가 $F(5)$ 이므로, 종이를 탄화시키는 "300℃~700℃ 사이의 열적 결함"이 된다. 상기 결과는 전력연구원내의 "한국교정·시험기관(KOLAS)"의 시험결과와 일치한다.

4. 결 론

이상과 같이 전력용 변압기의 유증가스 분석법중 가장 널리 사용되고 있는 IEC 분석법에 Fuzzy 이론을 적용한 결과는 다음과 같다.

- (1) 전력용 변압기의 유증가스 분석법중 국제 표준 진단방법인 IEC 진단법에 Fuzzy 이론을 도입하였다. 1993년 진단기준 개정후, IEC 진단법에 Fuzzy 이론을 통한 접근은 국내 최초이다.
- (2) 제안된 방법에 의하면, IEC법을 이용한 진단시 문제점으로 대두되고 있는 가스비율이 경계조건에 있는 경우의

해석의 난해성 및 해당 조건이 Code에 분류되지 않은 경우에도 해석이 가능하도록 하였다.

(3) 본 방법의 신뢰성을 검증하기 위하여, 실제 운전되고 있는 사고 변압기의 가스 농도를 적용한 결과, 진단의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

향후, 제안된 방법의 신뢰성을 높이기 위해서는 정확한 각 가스의 소속함수를 구하여야 한다. 따라서, 신설 및 운전중인 전력용 변압기에 대한 주기적이고 체계적인 절연유 분석 관리가 필요하며, 이의 분석 결과를 데이터베이스화 함으로서 신뢰성있는 고장유형(Fault Pattern)이 구해질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력, "765kV 변전기기 예방진단 시스템개발 1차년도 보고서", 1999. 11.
 [2] 한국전력, "765kV 변전기기 예방진단 시스템개발 2차년도 보고서", 2000. 11.

[3] 최인혁, 권동진, 정길조, 김광화, "변압기 예방진단을 위한 유증가스 전문가 시스템 구축 연구", 1999년도 대한전기학회 추계학술대회, pp. 1019-1021.
 [4] 최인혁, 권동진, 정길조, 김광화, "가스분석을 이용한 변압기의 이상진단 알고리즘 연구", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1903-1905.
 [5] O. Vanegas, Y. Mizuno and K. Naito, "Diagnosis of oil-insulated power apparatus by using neural network simulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, June 1997, pp. 290-299.
 [6] I. Yasmwo, S. Kimio, M. Kamba and K. Masanari, "Development of oil-dissolved gas detector for diagnosis of transformers", IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, Jan., 1990.
 [7] R. R. Roger, "IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas in oil analysis", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 13, No. 5, pp. 348-354, 1978.

저 자 소 개



최 인 혁 (崔 仁 赫)

1963년 4월 13일 생. 1986년 성균관대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.
Tel : 042-865-5875, Fax : 042-865-5844
E-Mail : idhyuk@kepri.re.kr



신 명 철 (申 明 澈)

1947년 4월 3일 생. 1970년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~1983년 미국 코넬대 전기공학과 교환교수. 2000년~2001년 미국 펜실바니아 주립대 전기공학과 교환교수. 1978~현재 성균관대 공대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수.
Tel : 031-290-7103, Fax : 031-290-7179
E-mail : mcshin@speed.skku.ac.kr



정 길 조 (鄭 吉 朝)

1949년 8월 16일 생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 전력연구원 전력계통연구실 송변전기술그룹 그룹장.
Tel : 042-865-5870, Fax : 042-865-5844
E-mail : jungkjo@kepri.re.kr