

FCM과 유클리디언 기반 거리유사도에 의한 전력용 변압기의 고장진단

論 文

56-6-3

Fault Diagnosis of Power Transformer by FCM and Euclidean Based Distance Measure

李大鍾* · 李鍾弼** · 池平植*** · 林栽尹†

(Dae-Jong Lee · Jong-Pil Lee · Pyeong-Shik Ji · Jae-Yoon Lim)

Abstract - In power system, substation facilities have become too complex and larger according to an extended power system. Also, customers require the high quality of electrical power system. However, some facilities become old and often break down unexpectedly. The unexpected failure may cause a break in power system and loss of profits. Therefore it is important to prevent abrupt faults by monitoring the condition of power systems. Among the various power facilities, power transformers play an important role in the transmission and distribution systems. In this research, we develop intelligent diagnosis technique for predicting faults of power transformer by FCM(Fuzzy c-means) and Euclidean based distance measure. The proposed technique make it possible to measures the possibility and degree of aging as well as the faults occurred in transformer. To demonstrate the validity of proposed method, various experiments are performed and their results are presented.

Key Words : 고장진단, 전력용변압기, FCM

1. 서 론

급속한 산업발달로 인하여 전기 에너지의 수요가 급증함에 따라 전력설비 용량도 증대하고 있다. 또한, 고도화된 첨단 산업사회의 전력 소비자들은 고품질의 전력공급을 요구하고 있어 이를 위해서는 전력계통을 구성하는 전력기기의 안정성 및 신뢰도 확보가 선행되어야 한다. 특히, 전력용 변압기는 수요설비의 증가에 맞추어 대형화 및 초고압화로 이러한 전력용 변압기의 예기치 않은 고장은 막대한 경제적 손실을 유발하므로 사전에 이상 유무를 판단하여 갑작스런 고장을 방지하는 시스템 개발이 절실히 요구된다.

국내 산업현장에서는 변압기의 내부 이상을 조기에 발견하여 사고를 예방하기 위한 목적으로 수소와 아세틸렌 등의 탄화수소 가스들에 대해 절연유중 용존 가스 관리 기준에 의거하고 있다[1]. 이 중에서 절연재의 열화정도를 진단, 변압기의 잔존수명을 예측하여 적절한 교체시기를 결정하기 위해 이산화탄소가스의 농도를 이용한 절연유중 CO₂ 가스 관리기준을 정하여 이 기준에 따라 정상/요주의 등 열화정도를 판정한다. 이러한 CO₂ 가스 관리기준에 의해 요주의가 발생하였을 경우에는 전문가에 의해 이상의 원인을 분석하고 있다. 전력용 변압기는 운전 중 각부의 열화로 전기적 성능이 서서히 감소하므로 기존 진단방식에 의한 획일적인

이상/정상 판단 만으로는 정확한 변압기의 열화 상태를 판단하는 데는 한계가 있다. 즉, 변압기가 정상이라 하더라도 어느 정도 열화가 진행되는 경우가 많으므로 그 열화정도를 수치적으로 제시하여 보다 정밀한 상태를 제시해 줄 필요성이 있다. 그러나 기존방법 만으로는 이분법적인 정상/요주의만을 판정함으로 변압기의 열화추이특성을 진단하지 못하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 가스 조성비에 의한 분석이 어려운 경우에도 퍼지 및 신경회로망 등의 인공지능기법을 활용하여 진단이 가능하도록 시도하고 있다[2-4]. 인공지능기법 중 대표적으로 사용되는 신경회로망을 이용한 패턴분류기인 경우 일반적으로 역전파 알고리즘이 널리 사용된다. 그러나 역전파 알고리즘을 쓸 경우 복잡한 입력 패턴의 분포를 추정하기가 어려우므로 학습단계에서 더 많은 양의 학습 데이터가 필요하게 된다. 또한, 지역적 최소값을 피하기 위한 초기화 작업이 거의 경험적으로 이루어지며, 수렴속도가 지연 등의 문제점을 지니고 있다[5].

본 연구에서는 퍼지기반 클러스터링 방법인 FCM과 유클리디언 거리기반에 의한 전력용 변압기의 고장진단기법을 제안한다. 제안된 방법은 KEPCO(Korea Electric Power Corporation) 기준법에 의해 정상/요주의 여부를 판정하고, 요주의로 판정된 경우 FCM에 의해 구축된 고장 모델과 유클리디언 기반 거리기반의 k-NN 분류기에 의해 전력용 변압기의 열화원인을 판정한다. 또한, 변압기의 이상 유무 판단뿐만 아니라 정상으로 판별된 유입변압기에 대해서 열화추이 및 열화잠재성을 평가할 수 있는 방법도 제안한다. 제안방법들은 사례 연구를 통해 타당성을 입증하였다.

2. 유중가스법을 이용한 변압기 진단 및 문제점 분석

유입변압기를 오랫동안 사용하게 되면 변압기 절연유나

* 正 會 員 : 忠北大學校 BK21忠北情報技術事業團 · 工博

** 正 會 員 : 忠北大學校 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 忠州大學校 電氣工學科 助教授 · 工博

† 교신저자, 正會員 : 大德大學 電氣科 教授 · 工博

E-mail : jyylim@ddc.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 22日

最終完了 : 2007年 5月 2日

절연물속에 포함되어 있는 습기, 연소가스, 고체 불순물 등이 증가하여 국부적인 온도 상승이나 절연지 및 절연유의 열화가 생긴다. 변압기 내부에서 부분방전이나 코로나 방전, 혹은 국부과열 등에 의하여 이상이 발생하게 되면 열 발생이 수반되어 이 열원에 접촉된 절연재료가 분해되어 여러 종류의 가스가 발생하게 된다. 즉, 변압기 내부의 절연재료인 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, 각 발생가스의 대부분은 절연유에 용해된다. 따라서 유입변압기에서 절연유를 채취하여 유증가스를 분석하게 되면, 가스발생 및 가스 발생량의 조성비에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 현재 국내 산업현장에서는 변압기의 내부 이상을 조기에 발견하여 사고를 예방하기 위한 목적으로 수소와 아세틸렌 등의 탄화수소 가스들에 대해 표 1-(a)의 절연유중 용존 가스 관리 기준에 의거하고 있다. 이 중에서 절연재의 열화정도를 진단, 변압기의 잔존수명을 예측하여 적절한 교체시기를 결정하기 위해 이산화탄소가스의 농도를 이용한 표 1-(b)의 절연유중 CO₂ 가스 관리기준을 정하여 이 기준에 따라 정상/요주의 등 열화정도를 판정한다. 표 1에 의해 요주의가 발생하였을 경우에는 표 2에 나타난 IEC의 진단법에 따라 이상의 원인을 분석하고 있다.

표 1 KEPCO 기반 판정법칙

Table 1 KEPCO based decision rule for aging cause

(a) 절연유중 용존가스 관리 기준

(단위 : ppm)

판정 가스성분	정 상 (Normal)	요주의 (Caution)	이상 (Abnormal)
H ₂	400 미만	400 이상	800 이상
CO	300 미만	300 이상	800 이상
C ₂ H ₂	20 미만	20 이상	100 이상
CH ₄	250 미만	250 이상	750 이상
C ₂ H ₆	250 미만	250 이상	750 이상
C ₂ H ₄	250 미만	250 이상	750 이상

(b) 절연유중 CO₂ 가스 관리 기준

(단위 : ppm)

CO ₂ Gas	판 정	조 치 사 항
4000 미만	정 상	○ 조치사항 없음
4000 이상	요주의 (Caution)	○ 변압기의 관리방법 변경 1. 절연유 유온을 낮춤 2. 절연유의 절연파괴진압 측정 3. 절연유의 함유수분 분석
7000 초과	이상 (Abnormal)	○ 변압기 절연재 열화도 진단 (절연유, 절연지)

표 2 IEC 기반 고장원인 분석

Table 2 IEC based caution analysis

Case	Characteristic fault	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
PD	Partial discharges	NS	<0.1	<0.2
D1	Discharges of low energy	>1	0.1-0.5	>1
D2	Discharges of high energy	0.6-2.5	0.1-1	>2
T1	Thermal fault (t<300℃)	NS	NS	<1
T2	Thermal fault (300℃<t<700℃)	<0.1	>1	1-4
T3	thermal fault (t>700℃)	<0.2	>1	<4

※ NS : Not significant

앞서 설명된 유증가스 분석법을 통하여 비교적 정확한 변압기 진단을 수행할 수 있지만 현실에 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉, 유증가스 분석법은 변압기의 설치시기, 구조, 용량, 제조회사 등의 영향을 많이 받고 측정 방법에 따라 계측치가 달라진다. 또한, 전력용 변압기는 운전 중 각부의 열화로 전기적 성능이 서서히 저하되므로 기존 진단 방식에 의한 확실적인 이상/정상 판단 만으로는 정확한 변압기의 열화 상태를 판단하는 데는 한계가 있다[6-9].

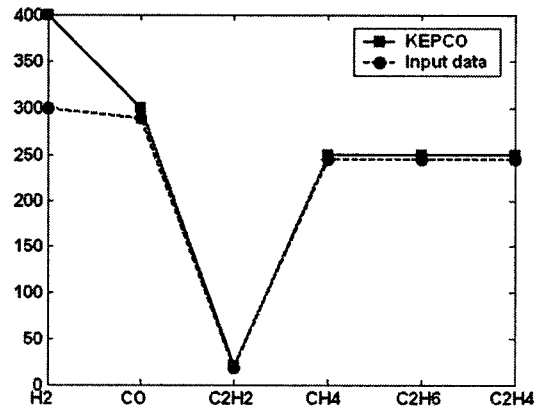


그림 1 열화가 진행된 정상데이터

Fig. 1 Normal data near caution boundary

그림 1에서는 KEPCO 규정에 의해 정상으로 판정된 데이터의 일례를 보이고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 단순한 이진법적인 정상/요주의만을 판정하는 KEPCO 규정에 의하면 정상으로 판별되지만 각각의 가스성분 값들이 요주의에 해당하는 임계값에 근접한 것을 알 수 있다. 즉, KEPCO 규정만으로는 이분법적인 정상/요주의만을 판정함으로써 변압기의 열화추이특성을 진단하지 못하고 있다. 따라서 변압기가 정상이라 하더라도 어느 정도 열화가 진행되는 경우가 많으므로 그 열화정도를 수치적으로 제시하여 보다 정밀한 상태를 제시해줄 필요성이 있다.

KEPCO 기준 판정법칙에 의해 요주의로 판정된 경우 고장원인은 IEC 60599-1999 코드법에 의해 수행된다. IEC 코드법은 이상원인의 진단종류가 다른 분석법보다 세분화되어 있고 신뢰성이 높아 국제적으로 널리 적용되고 있다. 그러나, 가스 조성법에 근거한 IEC 코드법은 그림 2의 A점과 B점에서 보인 바와 같이 가스 비율이 규정치에 존재하지 않거나 경계조건에 있는 경우 진단 전문가에게 의뢰하지 않고는 해석에 어려움이 있다는 단점이 있다. 또한, IEC의 진단 방법은 진단영역이 겹치는 부분이 존재하므로 정확한 원인 분석을 하는 데는 한계가 있다[10-11].

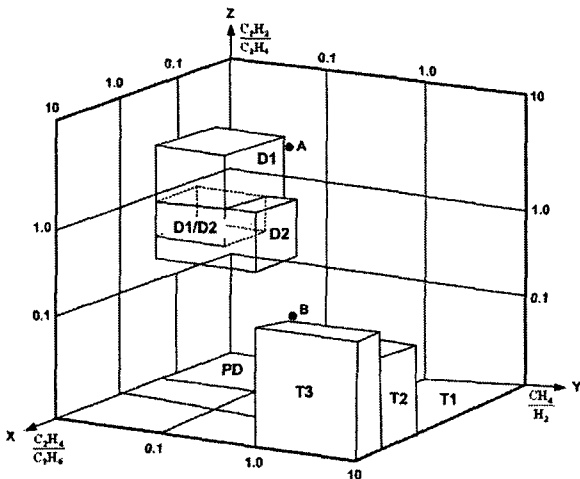


그림 2 IEC 진단법
Fig. 2 IEC code rule

3. 퍼지 군집화 알고리즘을 이용한 고장진단 알고리즘

변압기의 고장진단 및 고장추이 특성을 분석하기 위하여 제안한 진단기법의 기본 구성도는 그림 3에서 보여준다. 제안된 기법은 KEPCO 기준법에 의해 정상/요주의 여부를 판정하고, 요주의로 판정된 경우 퍼지 군집화 알고리즘에 의해 구축된 고장 모델과 유클리디언 기반 거리기반의 k-NN 분류기에 의해 열화의 원인을 판정한다. 즉, 입력 데이터인 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C₂H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 이산화탄소(CO₂) 등 7개의 가스성분을 이용하여 표 1(a)의 절연유중 용존 가스 관리 기준에 의거하여 정상/요주의를 판정한다. 요주의의 열화원인은 IEC 코드법에 근거하여 수행된다.

IEC 코드법은 개별 가스성분의 크기에 의해 진단하는 방식이 아닌 가스성분의 3가지 조성비 (C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆)를 이용하여 진단이 이루어진다. 따라서 IEC 코드법은 CO₂ 가스성분을 고려하지 않으므로 제안된 방법에서도 CO₂ 가스성분을 고려하지 않았다. 요주의의 원인을 진단하기 위하여 제안된 방법은 입력 가스성분들을 IEC 코드법에서 사용되는 3가지 조성비로 변환한다. 가스 조성법에 근거한 IEC 코드법은 가스 비율이 규정치에 존재하지 않거나 경계조건에 있는 경우 진단 전문가에게 의뢰하지 않고는 해석에 어려움이 있다는 단점이 있다. 또한, IEC의 진단방법

은 진단영역이 겹치는 부분이 존재하므로 정확한 원인 분석을 하는 데는 한계가 있다.

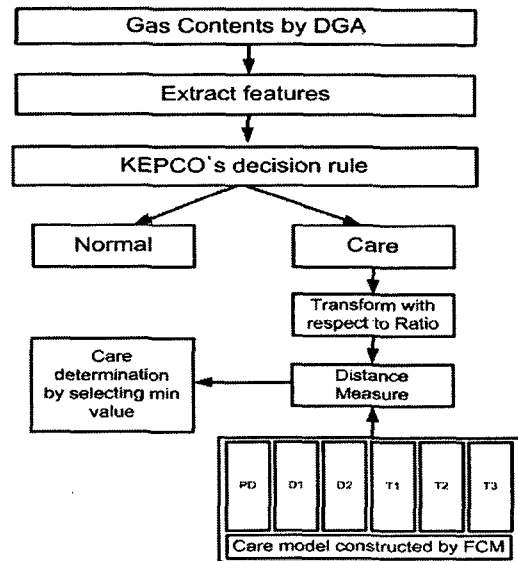


그림 3 변압기 열화 원인 진단과정
Fig. 3 Diagnosis process for power transformer

이러한 문제점을 해결하기 위하여 FCM과 유클리디언 기반 거리측정 방법에 의해 열화의 원인을 판정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 FCM에 의해 변압기의 열화 원인 별로 구축된 고장모델과 조성비로 변환된 입력데이터의 유클리디언 거리를 계산한 후 거리가 가장 작은 즉, 유사도가 가장 높은 모델을 선정하여 열화의 원인을 판단한다. 따라서 제안된 방법을 적용하기 위해서는 우선 신뢰성 높은 열화 원인별 대표 모델의 구축이 선행되어야 한다. 일반적으로 대표 모델은 전문가에 의해 분류된 검증된 요주의 데이터를 이용하여 구축된다. 그러나 실측 데이터 중에서 요주의로 판정된 데이터 만으로는 모든 고장 특성을 반영하기에는 데이터의 양이 적으므로 제안된 진단모델의 신뢰성이 저하될 우려가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 하나의 대안으로서 IEC 코드법을 이용하여 각각의 고장조건에 맞는 대규모 데이터를 생성한 후, FCM에 의해 대표모델을 구축하였다. 우선적으로, 퍼지개념을 도입한 군집화 기법인 FCM에 의해 고장모델을 구축하는 방법을 단계별로 간략히 살펴보면 다음과 같다[12].

[단계 1] 취득하고자 하는 대표점의 수 즉, 클러스터의 수 $c(2 \leq c \leq n)$ 를 정하고, 초기 분할행렬 $U^{(0)}$ 를 초기화한다. 분할행렬에 할당될 소속정도의 값 μ_{ik} 는 다음 식을 만족한다.

$$\mu_{ik} = \mu_{A_i}(x_k) \in [0, 1] \tag{1}$$

[단계 2] 각 단계에서 데이터 x 와 초기 분할행렬값 u 를 이용하여 대표 특징의 중심 $v_{i^{(t)}}$ 을 계산한다.

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^m \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^m} \quad (2)$$

[단계 3] [단계 2]에서 계산된 대표 특징들의 중심값과 데이터 x 와의 거리값 d 에 의하여 분할 행렬 $U^{(r)}$ 을 다음과 같이 갱신한다.

$$\mu_{ik}^{(r+1)} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{jk}^{(r)}}{d_{jk}^{(r+1)}} \right)^{2/(m-1)} \right]^{-1} \quad (3)$$

여기서, m 은 퍼지화 정도를 나타내는 퍼지 수로써 일반적으로 2를 이용한다. 또한, d_{jk} 는 p 차원을 갖는 j 번째 데이터 x_j 와 k 번째 대표 중심값 v_k 와의 유클리디안 거리값을 의미한다.

$$d_{jk} = d(x_j, c_k) = \left[\sum_{i=1}^p (x_{ji} - v_{ki})^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

[단계 5] 다음과 같이 목적함수를 계산한 후, 만약 $\|J(U^{(r)}, v^{(r)}) - J(U^{(r-1)}, v^{(r-1)})\| \leq \epsilon_1$ 이면 알고리즘을 종료하고 그렇지 않으면 [단계 2]로 가서 반복 수행한다.

$$J(U, c_1, c_2, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (5)$$

유입변압기의 고장 모델을 구축하기 위하여 각각의 고장 조건별로 조건범위 내에서 균등분포를 갖는 30,000개의 데이터를 생성하여 총 180,000(3,000개×6조건)개의 데이터를 얻었다. 데이터 생성에 의해 얻어진 열화 데이터를 FCM을 이용하여 열화 원인별로 100개의 모델을 구축하였다. 마지막 단계로, 유클리디안 기반 거리측정방법에 의하여 열화원인을 진단한다. 일반적으로 거리유사도는 조성비로 변환된 입력 데이터와 열화 원인별로 각각 구축된 모델별로 유클리디안 거리를 식 (6)과 같이 계산한 후 식 (7)에 의해 각각의 모델에서 최소값의 거리값을 선택한다. 최종적으로 식 (8)과 같이 최소의 거리값을 갖는 모델을 선택하여 진단이 수행된다.

$$d_{ij}(x) = \sqrt{\sum_{c=1}^3 (x_{ic} - y_c)^2}, \quad \text{for } i=1, 2, \dots, 100 \quad (6)$$

$$d_i = \min(d_{ij}) \quad (7)$$

$$i_o = \arg \min(d_i) \quad (8)$$

여기서, x_{ic} 는 i 번째 열화모델에서 c 번째 조성비의 값을 나타내고, y_c 는 조성비로 변환된 입력데이터의 c 번째 조성비의 값을 나타낸다. 즉, c 가 1일 때 조성비는 C_2H_2/C_2H_4 , c 가 2일 때 조성비는 CH_4/H_2 , c 가 3일 때 조성비는 C_2H_4/C_2H_6 을 의미한다.

그러나 위에서 설명한 방법을 이용하여 열화 원인을 판정하였을 경우 오판의 우려가 발생한다. 즉, IEC 코드법에서

PD의 경우 c 가 1에 해당하는 C_2H_2/C_2H_4 는 진단결과에 영향을 주지 않는 조성비이다. 또한, T1의 경우 c 가 1 및 2에 해당하는 C_2H_2/C_2H_4 와 CH_4/H_2 에 해당하는 조성비들은 의미가 없으며 단지 c 가 3에 해당하는 C_2H_4/C_2H_6 조성비만을 이용하여 열화의 원인을 판단한다. 따라서 식 (6)의 유클리디안 거리측정 방법은 PD에 대해서는 식 (9), T1에 대해서는 식 (10)과 같이 열화판정을 위해 사용되는 조성비만을 고려하여 계산되어야 한다.

$$d_{ij}(x) = \sqrt{\sum_{c=2}^3 (x_{ic} - y_c)^2}, \quad \text{for } i=1, 2, \dots, 100 \quad (9)$$

$$d_{ij}(x) = \sqrt{\sum_{c=3}^3 (x_{ic} - y_c)^2}, \quad \text{for } i=1, 2, \dots, 100 \quad (10)$$

사용된 조성비의 차이로 인하여 거리값의 비교가 이루어질수 없으므로 각각 계산된 입력값과 모델간의 유클리디안 거리값을 구한 후 식 (11)과 같이 사용된 조성비의 개수로 나눈 평균값을 구한 후, 최종적으로 식 (12)에 의해 열화원인의 판정이 이루어진다.

$$d_i = \text{mean}(d_{ij}) \quad (11)$$

$$i_o = \arg \min(d_i) \quad (12)$$

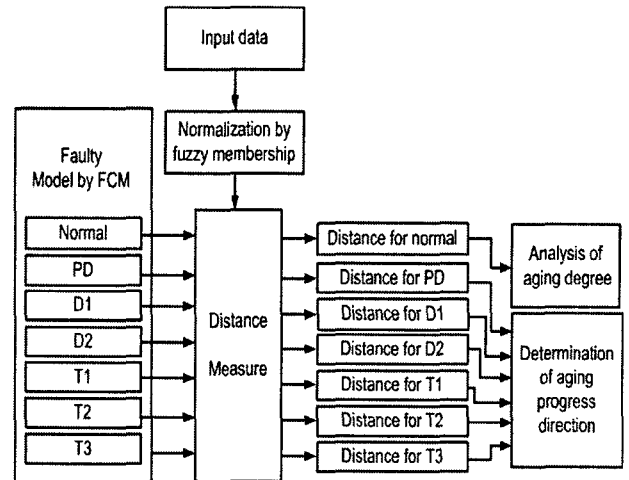


그림 4 열화잠재성 및 열화추이 평가 방법
Fig. 4 Estimation of ageing possibility and direction

변압기가 정상이라 하더라도 열화가 어느 정도 진행된 경우와 진행되지 않고 건전한 변압기가 존재할 수 있다. 보다 정확한 변압기의 상태를 진단하기 위해서는 변압기의 상태가 정상이라 하더라도 변압기의 열화정도를 판단할 필요성이 있다. 본 논문에서는 앞서 제안된 유입변압기의 고장원인 방법뿐만 아니라 정상이라 판정된 변압기의 경우에 대해서도 열화잠재성(열화정도) 및 열화추이를 판단할 수 있는 방법을 제안한다. 그림 4에서는 열화잠재성 및 열화추이 평가 방법을 나타냈다. 그림 4에서 보는 바와 같이 진단하고자 하는 입력 데이터와 구축된 8개의 정상 및 고장모델과의 유클리디안 거리비교에 의해 평가가 이루어진다. 여기서, 입력 데이터는 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C_2H_2), 메

탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄) 등 6개의 가스성분으로 구성되어 있다. 또한 고장모델은 국외규정을 고려한 열화진단 방법에 의해 판정된 열화원인별 데이터를 이용하여 구축하였다. 즉, FCM을 이용하여 열화 원인별로 7개씩 정상 및 고장모델을 구축하였다. 열화잠재성 평가는 입력데이터와 정상상태에 대한 모델과의 유클리디언 거리값을 이용하여 판정한다. 즉, 정상에 해당하는 유클리디언 거리값이 작을수록 정상모델과 유사도가 높다는 것을 의미함으로 해당 값이 작을수록 매우 정상인 상태임을 의미한다. 다음 단계로 열화추이는 입력데이터와 정상을 제외한 다섯 개의 절연 열화 모델과의 유클리디언 거리비교 후에 거리값이 가장 작은 값을 갖는 열화원인을 선택하여 열화추이를 판정한다.

4. 실험 및 결과

4.1 데이터 구성

제안된 기법의 유용성을 보이기 위해 사용된 데이터는 표 3에서 보인 바와 같이 1992년에서 1997년 동안 지역 2곳의 154[kV]와 345[kV]용 변압기에서 취득한 KEPCO 데이터를 이용하였다[8]. 지역 (A)에서는 6개 변전소에 설치 운용중인 177개 변압기에서 942개의 데이터를 취득하였고, 다른 지역 (B)에는 38개의 변전소에 설치된 98개의 변압기에서 472개의 가스성분을 취득하였다. 따라서 데이터는 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C₂H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 이산화탄소(CO₂)로 총 7개의 가스성분으로 구성되어 있는 1,414개이다. 데이터의 구조를 자세히 살펴보면 사용된 데이터 1,414개 중 요주의 데이터는 319개이고 정상 데이터는 1,095개로 구성되어 있다. 요주의 데이터를 국내 전문가에 의해 판정된 고장원인별로 살펴보면, 절연열화 159개, CO₂ 초과 33개, 아크방전 48개, 저온과열 16개, 중온과열 19개, 고온과열 44개로 이루어져 있다.

표 3 데이터의 구성

Table 3 Data structure

Case	지역(A)	지역 (B)	합 계	
요주의	절연열화	125	34	159
	CO ₂ 초과	23	10	33
	아크방전	11	37	48
	저온과열	15	1	16
	중온과열	16	3	19
	고온과열	36	8	44
	소 계	226	93	319
정상	716	379	1095	
합 계	942	472	1414	

4.2 열화원인 진단 결과

국내에서는 유입 변압기의 열화진단을 위해 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C₂H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 이산화탄소(CO₂)로 총 7개의 가스성분을 이용하지

만, 국제적으로 통용되는 IEC 코드법은 이산화탄소(CO₂)를 고려하지 않고 나머지 6개의 가스성분에 대한 3가지 조성비(C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆)를 이용하여 진단이 이루어진다. 따라서 본 연구에서도 표 3에서 나타난 데이터 중에서 이산화탄소(CO₂)에 해당되는 CO₂ 초과데이터는 고려하지 않고 나머지 요주의 데이터 286개와 정상 데이터 1095개를 이용하여 제안방법의 타당성을 검증하였다.

그림 5에서는 요주의 데이터 286개를 이용하여 열화원인을 분석한 결과를 나타냈다. 그림 5에서 보는 바와 같이 IEC 코드법으로는 총 요주의 데이터 286개 중 10개는 D1, 2개는 D2, 77개는 T1, 75개는 T2, 49개는 T3 등을 열화원인으로 판정하였고, 나머지 73개의 데이터에 대해서는 고장의 원인을 분류할 수 없는 판정불능(NI : Not identification)으로 진단결과를 나타냈다.

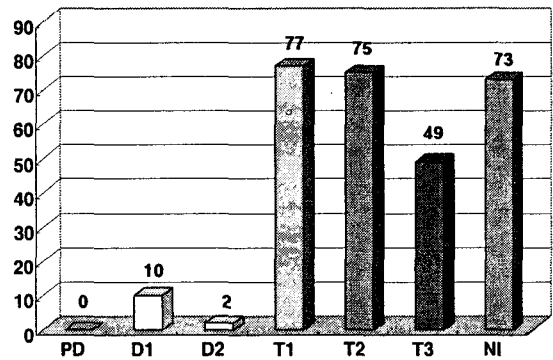


그림 5 IEC 코드법에 의한 열화원인 진단결과

Fig. 5 Decision results by IEC code rule

표 4 IEC 코드법과 제안방법의 진단결과

Table 4 Decision result by proposed method and IEC code

Case	IEC	제안방법		
		일치개수	비일치개수	계
PD	0	0	0	0
D1	10	10	0	10
D2	2	2	0	2
T1	77	77	0	77
T2	75	74	1	75
T3	49	49	0	49
합 계	213	212	1	213

표 4에서는 IEC 코드법에 의해 열화원인을 판정한 213개의 데이터를 이용하여 제안된 방법과 진단결과의 차이점을 나타냈다. 표 4에서 보는 바와 같이 213개의 데이터 중에서 한 개를 제외한 212개의 데이터가 IEC 코드법과 진단결과가 일치함을 확인할 수 있다. IEC 코드법과 제안방법과 진단결과가 상이한 데이터를 표 5(a)에 나타냈다. 표 5(a)에서 보는 바와 같이 IEC 코드법은 T2로 열화원인을 판정한 반면에 제안방법은 T1으로 열화원인을 판정하였다. 두 방법의 차이점을 분석하기 위하여 표 5(b)에서는 IEC 코드법에 의

한 T1과 T2의 판정기준을 나타냈다. 표 5(b)의 판정기준으로부터 표 5(a)에 나타낸 조성비 중에서 C₂H₂/C₂H₄와 CH₄/H₂에 해당하는 조성비는 T1과 T2의 기준범위를 모두 만족한다. 반면에 C₂H₄/C₂H₆은 1.01로서 T1(<0.1)의 기준은 만족하지 않고 T2(1-4)의 범위를 만족하여 IEC 코드법에서는 T2로 판정하였다. 그러나 C₂H₄/C₂H₆는 1.01로서 T1의 임계값인 1과 거의 근사한 값을 가지고 있다. 이는 계측기의 측정 오차범위를 고려해 볼 때 열화원인이 T1 또는 T2라고 단정하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 이렇듯 거의 비슷한 범위를 갖는 데이터에 대해서는 가스성분을 재 측정하거나 전문가의 의견을 반영하여 최종 진단결과를 도출하는 것이 바람직 할 것으로 분석된다.

표 5 IEC 코드법과 제안방법의 진단결과 비교
Table 5 Comparison of proposed method with IEC code

(a) 가스 조성비 및 진단결과

C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	IEC	제안방법
0.00	10.57	1.01	T2	T1

(b) T1, T2에 대한 IEC 코드법

Case	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
T1	NS	NS	<1
T2	<0.1	>1	1-4

그림 6에서는 IEC 코드법에 의해 판정불능으로 진단한 데이터를 제안방법으로 판정한 진단결과를 나타냈다. 그림 6에서 보는 바와 같이 73개의 판정불능 데이터 중에서 3개는 D1으로, 11개는 D2, 10개는 T1, 30개는 T2, 19개는 T3로 각각 열화원인으로 진단하였다. 표 6에서는 세 경우의 사례들에 대해서 IEC 코드법과 제안방법에 의한 진단결과를 비교하여 나타냈다. 표 6(a)에서는 취득된 가스성분의 양을 나타냈고, 표 6(b)와 (c)에서는 IEC 코드법에 D2 판정기준 값과 세 가지의 사례에 대한 조성비를 나타냈다. 표 6(c)의 사례 1의 경우 C₂H₂/C₂H₄와 CH₄/H₂값의 두 조성비에 대한 IEC 코드법의 조건은 만족하지만 C₂H₄/C₂H₆의 조성비에 대하여 IEC 코드법에서는 판정을 낼 수 없는 영역에 존재한다. 그러나 C₂H₄/C₂H₆값이 1.000으로서 조건범위 1 값에 매우 근접한 수치를 갖고 있다. 이럴 경우 수치의 값이 판정기준 값과 근사하므로 전문가 입장에서는 고장원인은 T1으로 판정을 낼 가능성이 높다. 또 다른 사례들(2, 3)의 경우에도 IEC 코드법으로는 판정불능이지만 제안된 방법은 조건 범위 내에 만족하는 값을 갖지 않지만 거의 근접한 범위를 갖는 고장모델로 진단함으로써 IEC 코드법의 문제점을 개선함을 확인할 수 있었다.

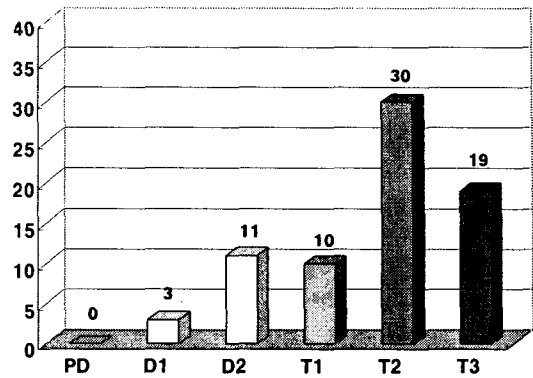


그림 6 판정불능 데이터에 대한 열화원인
Fig. 6 Causes of aging

표 6 IEC 코드법과 제안방법의 비교
Table 6 Comparison of proposed method with IEC code

(a) 가스성분

사례	가스성분						KEPCO 판정	판정 가스
	H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄		
1	36	301	0	16	6	6	요주의	CO
2	17	737	0	13	6	6	요주의	CO
3	71	87	68	84	256	265	요주의	C ₂ H ₂

(b) IEC 코드법에 의한 D1의 판정기준

C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
NS	NS	<1

(c) 조성비

사례	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	적용 기법	
				IEC	제안방법
1	0.000	0.444	1.000	판정불능	T1
2	0.000	0.765	1.000	판정불능	T1
3	0.257	1.183	1.035	판정불능	T1

4.3 열화잠재성 및 열화추이 결과

본 연구에서 제안된 국외 규정을 고려한 열화잠재성 및 열화추이를 평가하기 위하여 본 연구에서 제안된 분석기법은 입력데이터와 FCM에 의해 미리 구축된 정상데이터 간의 거리척도에 의해 열화의 진행정도를 결정하고, 열화 진행방향은 입력데이터와 고장데이터(D1~T3)간의 거리척도를 구한 후, 거리척도 값이 적은 즉, 유사도가 높은 고장모델을 선점함으로써 고장진행방향을 결정하였다. 한편, KEPCO의 실측 데이터 중 열화원인이 PD인 데이터가 존재하지 않아 본 연구에서는 열화원인이 PD인 경우에는 고려하지 않았다.

그림 7에서는 KEPCO 데이터 중에서 정상데이터인 1,095 개를 입력데이터로 사용하여 FCM에 의해 구축된 정상모델과의 거리비교에 의해 산출된 열화추이 값을 나타냈다. 그림 7에서 y축 값은 열화 잠재성을 나타낸다. 여기서, y 축 값 1의 의미는 정상과 요주의의 경계범위를 나타내므로 y 축 값이 1에 근접한 데이터인 경우 열화의 진행정도가 심해짐을 의미한다. 그림 8에서는 정상 데이터에 대한 열화 잠재성에 따른 데이터의 분포도를 나타냈다. 그림 8로부터 대부분의 변압기는 열화잠재성이 10[%] 이내로 건전한 것으로 분석되었다.

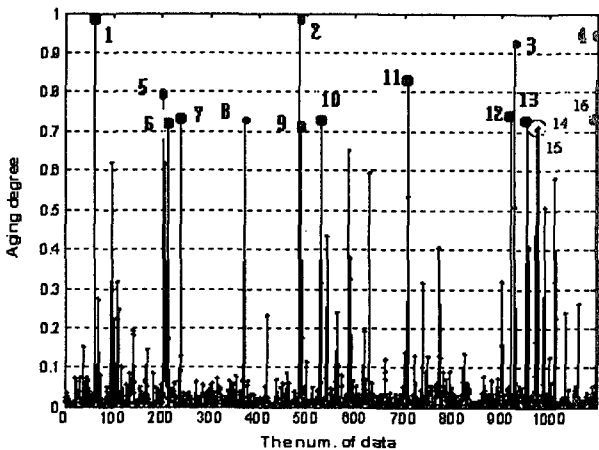


그림 7 정상데이터에 대한 열화잠재성 평가
Fig. 7 Estimation of aging possibility

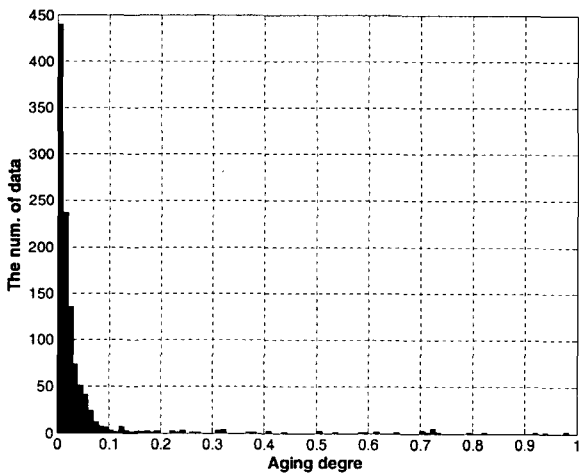


그림 8 정상데이터에 대한 열화정도 분포도
Fig. 8 Distribution of aging degree for normal data

그러나 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 열화 잠재성이 0.7(70[%]) 이상 진행된 변압기는 16대로 나타났으며, 특히 90[%] 이상 진행된 변압기가 4대인 것으로 분석되었다. 표 7에서는 70[%] 이상의 열화잠재성을 보이는 변압기의 가스 성분과 열화추이 방향을 나타냈다. 그림 9 및 그림 10은 표 7에 나타난 사례 중에서 90[%] 이상의 열화잠재성을 보인 사례들(사례 1, 사례2)에 대한 가스성분값을 KEPCO의 판정 기준과 비교하여 나타냈다. 사례 1의 경우 그림 9에서 보인

바와 같이 C₂H₄의 가스성분값이 244로서 KEPCO의 판정기준인 250 미만으로 정상이라 판정되지만 해당 가스값이 판정기준에 매우 근접해 있으므로 열화가 90[%] 이상 진행되고 있다고 판단할 수 있다. 또한 사례 1의 데이터를 FCM에 의해 이미 구축된 고장모델과 유클리디언 거리기반 오차값을 계산한 결과 D1과는 1.4087, D2와는 1.4113, T1은 1.3617, T2는 0.2553, T3는 1.3305로 나타나 오차값이 가장 작은 T2로 진행방향을 결정하였다. 사례 2에 대해서 나타낸 그림 10의 경우에도 마찬가지로 KEPCO의 판정기준에 정상이라 판정되더라도 판정 기준값에 매우 근접해 있으므로 어느 정도 열화가 진행되고 있다고 판단할 수 있다. 제안된 기법은 이러한 열화진행정도가 정량적인 값을 제시함으로써 보다 정밀한 정보를 사용자에게 제공할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 11에서는 열화진행 정도가 0.5[%] 이하인 정상 데이터의 가스 성분값을 나타냈다. 그림 11에서 보는 바와 같이 각각의 가스 성분값의 크기가 매우 작아 열화가 거의 진행되지 않음을 확인할 수 있었다.

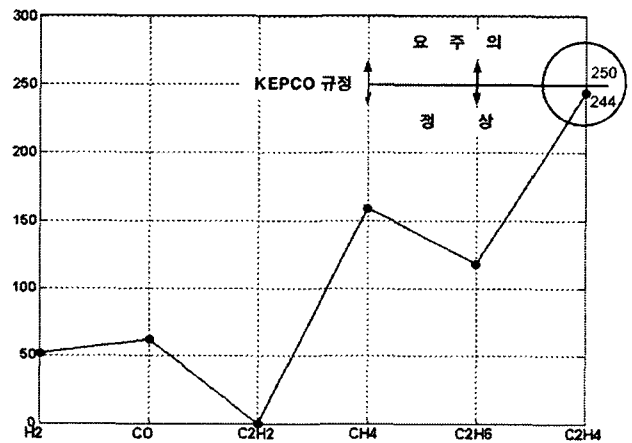


그림 9 열화 정도 및 열화 추이 평가 (사례 1)
Fig. 9 Estimation of aging possibility and direction(Case1)

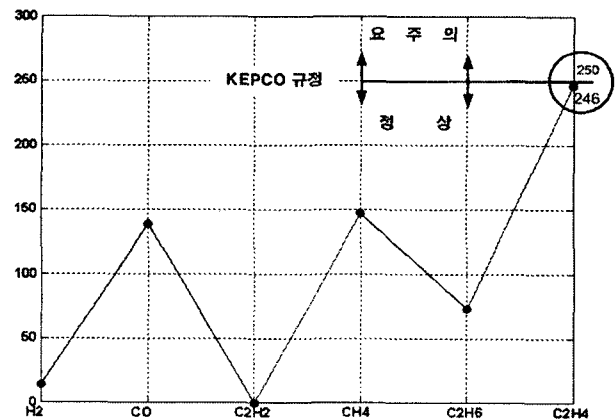


그림 10 열화 정도 및 열화 추이 평가 (사례 2)
Fig. 10 Estimation of aging possibility and direction(Case2)

표 7 70[%] 이상의 열화잠재성을 나타낸 사례들
Table 7 Cases with ageing degree above 70%

사례	가스 성분						열화 잠재성 (%)	열화 추이
	H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄		
1	52	62	0	159	118	244	98	T2
2	14	139	0	147	73	246	98	T2
3	49	64	19	38	36	31	92	D1
4	17	230	0	146	94	239	94	T2
5	19	89	0	72	51	223	79	T2
6	31	41	17	71	165	62	71	D1
7	24	116	17	49	20	52	72	D1
8	19	104	17	54	44	18	72	D1
9	21	57	0	132	69	212	70	T2
10	19	38	17	19	23	17	72	D1
11	22	61	17	41	177	183	83	D1
12	5	24	17	28	29	132	73	D1
13	9	100	17	43	111	15	72	D1
14	31	69	0	112	179	214	71	T2
15	15	25	3	42	82	214	71	T2
16	14	108	17	20	26	11	72	D1

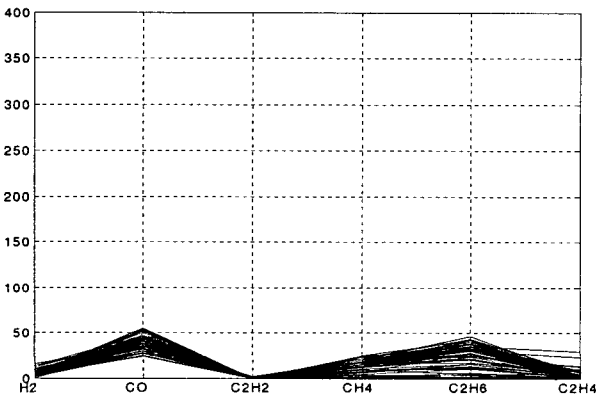


그림 11 0.5[%] 이하의 열화잠재성을 갖는 변압기
Fig. 11 Transformer with aging possibility below 0.5%

표 8(a)에서는 1992년에서 1997년도 대구지역 신영주 #1-1호기 변압기에서 취득한 가스성분들을 이용하여 제안된 전력용 유입변압기의 고장진단 결과를 나타냈다. 표 8(a)에서 보는 바와 같이 1992년도에는 변압기의 상태가 정상으로 판정되었으나, T2의 열화 진행방향으로 열화잠재성이 36.9[%]로 어느 정도 열화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 1993년도 2월에 취득한 가스들을 이용하여 진단한 결과 변압기는 T2 열화진행 방향으로 열화잠재성이 98.4[%]로 열화가 1992년도에 비해 급속히 진행되고 있는 것으로 나타났다. 1993년도 9월에 취득한 가스성분을 이용하여 분석한 결과 변압기는 요주의인 것으로 나타났으며, 일차 점검 후 지속적인 관리에 의해 1995년 6월에는 변압기가 정상으로 판정되었으나, 70.1[%]의 열화잠재성을 나타내 지속적인 유지관리가 필요한 것으로 분석되었다.

표 8 대구전력 신영주 #1-1 변압기 특성
Table 8 A transformer in Daegu Substation

(a) 경년변화에 따른 열화추이

날짜	가스 성분							열화 잠재성 (%)	열화 추이	비고
	H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO ₂			
92.07	30	164	0	122	43	174	1271	36.9	T2	
93.02	14	139	0	147	73	246	855	98.4	T2	
93.09	34	235	0	248	112	386	1855	요주의	T2	점검
95.06	21	57	0	132	69	212	1296	70.1	T2	
96.02	226	163	0	1873	699	2691	1783	위험	T2	점검
97.03	29	70	0	311	130	549	1103	요주의	T3	점검
97.06	58	111	0	465	188	843	1549	이상	T3	점검
97.07	74	184	0	526	195	862	1836	이상	T3	점검
97.08	69	210	0	542	198	851	1890	이상	T3	점검
97.09	57	233	0	574	221	936	2023	이상	T3	점검
97.12	444	77	12	1311	331	1980	804	위험	T3	교체

(b) 경년변화에 따른 열화추이 및 열화원인 분석

날짜	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	IEC	제안방법
1993.09	0.000	7.294	3.446	T2	T2
1996.02	0.000	8.288	3.850	T2	T2
1997.03	0.000	10.724	4.233	T3	T3
1997.06	0.000	8.017	4.484	T3	T3
1997.07	0.000	7.108	4.421	T3	T3
1997.08	0.000	7.855	4.298	T3	T3
1997.09	0.000	10.070	4.235	T3	T3
1997.12	0.006	2.953	5.982	T3	T3

1996년도 2월에 진단한 결과 변압기는 최고의 경계 레벨인 위험으로 판정되어 점검 및 유지관리를 하였으나, 1997년도 3월에도 변압기가 요주의 것으로 나타났다. 특이할 만한 사항은 1996년 2월까지만 해도 열화진행방향이 T2로 분석되었으나, 1997년 3월에는 열화진행방향이 T3인 것으로 나타났다. 그 원인으로서 열화가 진행된 변압기는 내부적으로 불안정하여 세밀한 점검 및 보수가 이루어지지 않는 한, 지속적인 열화에 의해 다량의 가스성분들이 방출되어 T2에서 T3로 진행방향이 변경된 것으로 분석된다. 요주의로 판정된 변압기에 대해서 1997년 6월에서 9월까지 매월 1회씩 유지관리하면서 변압기를 관리했음에도 불구하고 이상으로 판정되었다. 1997년 12월에 취득한 가스를 분석한 결과 변압기는 최고경계 레벨인 위험으로 판정되어 교체한 것으로 나타났다. 표 8(b)에서는 요주의 이상의 판정을 받은 가스성분들을 이용하여 IEC 코드법과 제안방법에 의해 열화원인을 진단한 결과를 나타냈다. 표 8(b)에서 보는 바와 같이 IEC 코드법과 제안된 방법이 일치된 진단결과를 나타냈다. 이상의 두 지역에서 설치된 변압기를 대상으로 실험한 결과 제안된 전력용 유입변압기 고장예지 기법이 기존의 IEC코드법에 비해 우수하며, 진단결과의 성능 또한 우수함을 확인 하였다.

5. 결 론

국내 전력용 변압기 진단방법으로 KEPCO의 절연유중 용존가스 관리기준에 의해 변압기의 정상/요주의를 판정한 후, 요주의로 판정될 경우 IEC 코드법에 근거하여 고장원인을 판단한다. 그러나 KEPCO 규정은 주요가스 성분의 양과 기준값과 비교하는 이분법적인 판단을 하고 있어 이분법 자체가 지니고 있는 특성에 의해 오판을 할 확률이 높다. 또한, 고장원인 분석을 위해 사용되는 IEC 코드법은 가스비율이 규정치에 존재하지 않거나 경계조건에 있는 경우 전문가에게 의뢰하지 않고는 해석에 어려움이 있다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 FCM과 유클리디언 기반 거리유사도에 의한 전력용 변압기의 고장 진단 기법을 제안하였다. 진단방법은 입력 데이터와 FCM에 의해 미리 구축된 대표모델과의 유사도를 수정된 유클리디언 기반 거리척도법에 의해 산출한 후, 최종적으로 유사도가 가장 높은 대표모델을 선택하여 이루어진다. 제안된 방법의 타당성을 보이기 위해 실측 데이터를 이용하여 실험한 결과, 국제 판정기준인 IEC 코드법의 조건범위 내에 존재하는 데이터에 대해서는 제안방법과 IEC 방법 모두 일치된 진단결과를 보였다. 또한 IEC 코드법으로는 진단할 수 없는 데이터에 대해서도 제안된 방법은 열화원인을 판정하여 기존 방법에 비하여 우수한 진단 성능을 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-125) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Pyeong Shik Ji, Jae Yoon Lim, Jong Pil Lee, "Aging characteristics of power transformer oil and development of its analysis using KSOM", TENCON 99, Proceedings of the IEEE Region, Vol. 2, pp. 1026-1029, 1999.
- [2] Magn-Hui Wang, Hong-Chan Chang, "Novel clustering method for coherency identification using an artificial neural network," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 9, Nov. pp. 2056-2062, 1994.
- [3] J. L. Naredo, P. Moreno, C. R. Fuerte, "A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.16, pp. 643-647, 2001.
- [4] V. Miranda, A. R. G. Castro, "Improving the IEC table for transformer failure diagnosis with knowledge extraction from neural networks," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, pp. 2509-2516, 2005.
- [5] Hong-Tzer Yang; Chiung-Chou Liao, "Adaptive fuzzy diagnosis system for dissolved gas analysis of power transformers," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, pp. 1342-1350, 1999.
- [6] Z. Yan, M. Dong, Y. Shang, M. Muhr, "Ageing Diagnosis and Life Estimation of Paper Insulation for Operating Power Transformer", International Conference on Solid Dielectrics, Vol. 2, pp. 715-718, 2004.
- [7] Zhenyuan Wang, Yilu Liu, Paul J. Griffin, "A Combined ANN and Expert System Tool for Transformer Fault Diagnosis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1224-1229, 1998.
- [8] Ganyun Kv, Haozhong Cheng, Haibao Zhai, Lixin Dong, "Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier", Electric Power System Research, Vol. 75, pp. 9-15, 2005.
- [9] Q. Su, L. L. Lai, P. Austin, "A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient in a Transformer", International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management(APSCOM), pp. 344-348, 2000
- [10] K. F. Thang, R. K. Aggarwal, A. J. McGrail, D. G. Esp, "Analysis of Power Transformer Dissolved Gas Data Using the Self-Organizing Map", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1241-1248, 2003.
- [11] H. T. Yang et al, "Intelligent Decision Support for Diagnosis of Incipient Transformer Faults Using Self-Organizing Polynomial Networks", IEEE Trans., Power System, Vol. 13, No. 3, pp. 946-952, 1998.
- [12] Bezdec, J.C., Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York, 1981.

저 자 소 개



이 대 중 (李大鍾)

1969년 2월 25일생. 1995년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사), 2002년 동 대학원 졸업(공학박사). 2006년~현재 충북대학교 BK21충북정보 기술사업단 초빙조교수

E-mail : djmidori@empal.com



이 중 필 (李鍾弼)

1970년 12월 14일생. 1996년 충북대학교 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : jolious@ddc.ac.kr



지 평 식 (池平植)

1964년 3월 5일생. 1994년 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사), 1998년 동대학원 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사), 현재 충주대학교 전기공학과 조교수

E-mail : psji@chungju.ac.kr



임 재 윤 (林栽尹)

1961년 8월 4일생. 1984년 충북대 공대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1999~2000 미국 Texas A&M Univ. 방문교수, 2006~2007 캐나다 Victoria Univ. 방문교수, 현재 대덕대학 전기과 교수

Tel : 042-866-0332

Fax : 042-866-0339

E-mail : jyylim@ddc.ac.kr