

전력용 변압기 온라인 유증가스 진단기준치 및 알고리즘에 관한 연구

論 文
54C-5-4

Study on the Criterion and Algorithm for On-line Dissolved Gas of a Power Transformer

陳相範^{*} · 權東震^{*} · 郭周植^{**} · 郭熙魯^{***} · 金載哲^{***}
(Sangbum Chin · Dongjin Kweon · Joosik Kwak · Heero Kwak · Jaechul Kim)

Abstract - In this paper, criterion and algorithm for on-line dissolved gas of a power transformer are studied. For the initial diagnosis of a power transformer, the on-line dissolved gas analysis is one of the most important and acceptable item to preventively diagnose a power transformer. But the criterion and algorithm of this item are not established yet in Korea. In this paper, criterion and alarm level of the on-line dissolved gas analysis are based on the analysis of on-line data of operating transformers, Korea industrial standard and operation manual for a power transformer as well as accumulated data of the preventive diagnosis systems which have been operated at nine substations of Korea Electric Power Co.(KEPCO) since 1997. Therefore, the criterion and alarm level proposed in this paper are to be well suitable and are adaptable for the domestic operational environments and conditions of the power transformer. Considering that the conventional diagnosis system is capable only of accumulating and monitoring data of the power transformer operation, the criteria and the algorithms make it possible to accomplish an ultimate goal of the preventive diagnosis system. It is expected, therefore, that they will have a beneficial effect on broad applications of the preventive diagnosis system and the achievement of manless substation system in the future.

Key Words : Online Dissolved Gas, Criterion, Algorithm, Diagnosis, Transformer

1. 서 론

전력계통의 필수 구성요소인 전력용 변압기에 대한 예방진단기술은 변압기의 운전상태에서 온라인으로 이상 징후를 상시 감시하여 급속히 진행되는 이상 징후에 대하여 경보를 발생함으로써, 불시정전을 방지하고 막대한 산업 손실 및 심리적 불안을 예방한다. 따라서 이러한 변압기 예방진단기술을 안정적으로 적용함으로써 설비의 신뢰도를 향상시켜 전력의 안정공급에 기여할 수 있으며, 감시의 자동화로 운영 및 유지 보수 인력을 감소할 수 있으므로 변전소 종합 자동화시스템의 기반기술을 확보할 수 있다.[1~2]

온라인 유증가스 분석은 변압기 예방진단기술의 중요한 항목으로서, 경제성의 관점에서 변압기의 내부 이상에 의해 발생된 특정가스만을 상시 감시하고, 이상 발생시에는 다종류 유증가스 분석을 이용하여 정밀 진단하는 것을 목적으로 한다. 현재 국내의 예방진단시스템에 적용중인 온라인 유증가스 센서는 유증 용해가스 중에서 주로 수소가스(H₂)를 집중적으로 측정하는 센서로써, 유증의 용해가스를 가스 선택 투과성을 이용한 고분자 투과막(membrane)을 이용하여 분리하

고, 그 가스의 양을 측정한다.

국내에서는 1997년부터 345kV 변전소에 예방진단시스템을 적용하여 현재 9개의 변전소 등에 약 150대 이상의 온라인 유증가스 센서가 부착되어 운전 중에 있으며, 2004년부터 운전중인 765kV 변압기에도 적용되고 있는 상태이다. 하지만, 현재 국내에서 적용중인 온라인 유증가스 센서는 온라인 상태감시로서의 기능만을 담당하여 데이터의 축적에 중점을 두고 있고, 국내 변압기의 운전기준과 환경에 적합한 진단기준치 및 경보 레벨 그리고 진단 알고리즘 등이 설정되어 있지 않는 실정이다.

반면, 일본에서는 1980년대부터 변압기의 이상을 진단하기 위한 각종 이상검출 기술과 이상검출 기술을 종합한 예방진단시스템을 개발하여 활발히 적용하고 있다. 그러나, 일본에서 적용중인 예방진단시스템의 진단 알고리즘은 기술보호에 의해 공개되지 않고 있으며, 일본에서의 진단 알고리즘이 공개된다고 하더라도, 국내 변압기 운전환경과 기준에는 적합하지 않으므로, 진단기준치와 알고리즘은 국내 고유의 기술로 개발하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 국내 전력용 변압기의 운전 환경에 적합한 예방진단시스템의 온라인 유증가스 진단기준치와 진단 알고리즘을 제시하였다. 온라인 유증가스 분석의 진단기준치는 시범 운전되고 있는 예방진단시스템의 축적된 데이터를 분석하고, 운전중인 변압기에서 측정된 데이터와 국내 전력용 변압기의 규격 및 운영기준 등을 종합적으로 분석하여 절대값에 의한 기준치와 증가경향에 의한 기준치를 제시하였다. 또한 유증가스 진단 알고리즘은 온라인 유증가스 센서에

† 교신저자, 正會員 : (주)태광이엔시 · 工博
E-mail : matt@tge.co.kr

* 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

** 正會員 : 韓電 電力研究院 研究員

*** 正會員 : 崇實大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 2月 22日

最終完了 : 2005年 3月 22日

서 측정된 데이터들을 절대값에 의한 기준치와 증가량에 의한 기준치를 적용하여 진단하도록 구성되었다. 그 결과 본 논문에서 제시한 온라인 유증가스 기준치를 적용한 사고 예방진단 사례를 제시하여 기준치 설정의 타당성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 온라인 유증가스 센서

시험실에서 가스 크로마토그래피를 이용하는 다종류 유증가스 분석방법은 여러 성분의 가스를 높은 정밀도로 분석할 수는 있으나, 구조가 복잡하고, 측정시 고도로 훈련된 숙련자가 필요하며, 가스분석을 위한 시간이 많이 필요한 단점이 있다. 따라서 유증가스 분석 작업의 간편화 및 온라인화를 목적으로 유증가스 측정센서를 변압기에 상시로 부착하여 특정가스(H_2)만을 감지함으로써 변압기 이상의 유무를 판단하는 방법이 적용되고 있다.[3~5]

특정가스 중 수소가스가 가장 널리 이용되고 있는 것은, 변압기의 내부 이상 시 수소가스는 다른 가스와 동반하여 필히 발생하므로 내부이상 및 다른 가스와의 상관관계가 클 뿐만 아니라, 내부이상이 진전됨에 따라 발생하는 수소가스량이 비례적으로 증가하는 경향을 보이고, 투과막을 사용했을 때 평형상태가 되는 시간이 다른 가스에 비해서 훨씬 짧으므로 추출이 쉽기 때문이다.[6~8]

그림 1은 예방진단시스템에 사용된 온라인 유증가스 센서이다. 온라인 유증가스 센서는 선택적 투과막과 전자 가스측정부로 구성되어 있으며, 절연유에 용해된 가스중에서 $H_2(100\%)$, $CO(18\%)$, $C_2H_2(8\%)$, $C_2H_4(1.5\%)$ 가스만을 선택적으로 투과막을 통과시켜, 주변의 산소와 화학반응시킴으로써 전류신호를 발생시키도록 되어 있다. 온라인 유증가스 센서는 주로 변압기의 본체 하부 배유 밸브에 설치되며, 전자 가스측정부에서 측정된 가스농도는 데이터 취득장치로 전송된다. 또한, 서버로의 데이터 전송에 문제가 발생되어도 데이터 백업이 가능하도록 1개월분의 가스 데이터를 자체적으로 저장할 수 있는 기능이 있다. 그리고 캘리브레이터(calibrator) 및 소프트웨어를 통한 가스의 보정이 가능하며, 센서, 전자부 및 구동 소프트웨어의 자기진단 기능이 있어 이상이 발생할 경우 서버로 경보를 출력할 수 있다.[9]

2.2 예방진단기준치 설정에 관한 이론

전력용 변압기와 같은 전력설비를 진단하는 경우의 진단기준치는 법규, 규격, 내규, 제작사의 기준치, 통계치, 경제성 및 안정성 등을 기초로 하여 설정된다. 또한, 이러한 절대 기준값에 의한 진단과 더불어 열화경향에 의한 진단관리를 병행한다.

진단기술은 "설비의 상태를 정량적으로 관측하고, 장래의 상태를 예측하는 기술"로 정의된다. 따라서 진단기술은 현재 시점에서 설비의 열화상태를 진단하는 상태진단기술(condition identification technique)과 장래의 상태를 예측하는 상태예측기술(condition prognosis technique)로 구분될 수 있다. 그러므로 진단기술은 단순히 설비의 상태를 관측하는 것

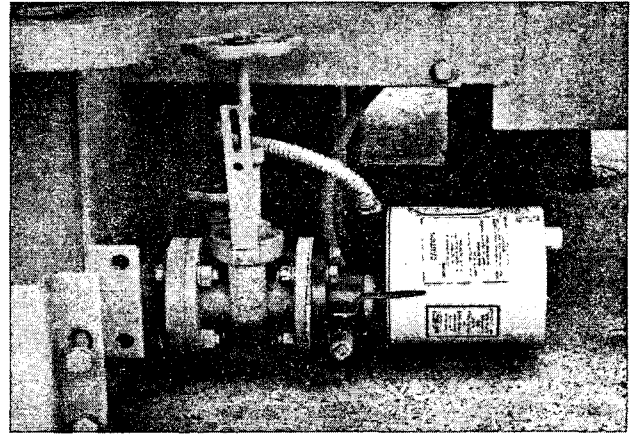


그림 1 온라인 유증가스 센서
Fig. 1 Online dissolved gas sensor

이 아니고, 수명 예상 등 여러 가지 관련 항목을 병용하여 장래의 설비상태를 예측하는 기능이 포함되어야 한다. 따라서 예방진단 기술을 실용화하는 최초의 단계는 설비의 열화에 민감하게 반응하는 이상징후 파라미터(parameter)의 진단기준치를 정하는 것이다. 그림 2는 전력설비의 이상 징후에 따른 열화 진행 그래프이다.[10~12]

이상 징후 파라미터는 시간이 진행됨에 따라 특정한 이상에 의하여 변화되는 변수이며, 그림 2의 종축은 시간의 진행에 따라 나타나는 이상의 징후를 나타내는 정보를 의미한다. 그림 2에서 시간 T_D 는 신제품에서 이상이 발생(B점)하기까지의 시간이며, 검출지연시간 T_L 은 이상이 발생하고부터 진단기술에 의하여 이상이 검출(C점)되기까지의 시간을 나타낸다. 또한 T_r 은 이상을 검출하고부터 고장(D점)이 발생하기까지의 시간을 나타낸다. T_E 는 이상발생점에서부터 고장까지 이르는 데 걸리는 총 소요 시간이다. 따라서 이상징후 파라미터의 진단기준치를 적절하게 설정한다면, 검출지연시간 T_L 을 단축시킴으로써 기기의 이상을 조기에 발견하고, 설비가 고장에 이르는 것을 예방할 수 있다.

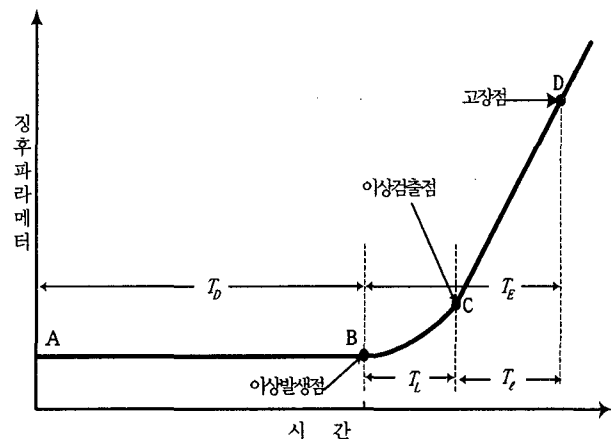


그림 2 전력설비 열화 진행 그래프
Fig. 2 Deterioration graph of power facilities

진단기준치는 주로 정상, 요주의 및 이상 레벨로 나뉘어진다. 정상 레벨은 설비가 정상인 상태로, 정상인 설비에서 데이터의 평균치, 초기치 또는 베이스 라인이다. 요주의 레벨은 설비에 어떤 변화가 있는 것을 의미한다. 이 상태는 운전 조건의 변화가 필요하지만, 반드시 사고로는 이어지지 않는기 때문에 운전자의 주의를 필요로 하는 레벨을 의미한다. 그리고 이상 레벨은 설비가 위험한 상태로 응급한 대책이 필요한 것을 의미한다.

진단기준치를 설정하는 방법을 실용적인 입장에서 분류하면 사람의 경험이나 감각에 기초하는 방법, 규격과 표준치를 이용하는 방법, 그리고 측정된 데이터를 이용하여 통계적으로 결정하는 방법 등이 있다.

2.2.1 사람의 경험이나 감각에 기초하는 방법

손의 감각은 진동과 온도 등의 진단 기준에 아주 우수하다. 정량성이 없는 결점이 있지만, 별도의 계측기가 필요 없는 장점이 있다. 다른 방법에 의해 구체적인 이상원인 및 조치사항 등을 파악하지 못한 경우, 전문가에게 문의하는 경우가 대표적인 사례이다.

2.2.2 규격과 표준치를 이용하는 방법

규격과 표준치를 이용하는 방법은 제작사나 학회 혹은 연구기관에 의해 발표된 기준치 등을 이용하는 방법이다. 이러한 규격, 기준 및 제작사의 권고치 등은 진단 기준에 유용하게 활용될 수 있다. 현재 전력용 변압기의 예방진단시스템에 사용되는 많은 진단 항목들의 진단기준치는 국내에서 사용되는 규격을 이용하고 있다.

2.2.3 통계적인 방법

통계적으로 진단 기준을 결정하는 방법은 설비가 정상일 때와 이상일 때 취득된 데이터를 이용하여 일정한 수순에 따라 진단 기준을 결정하는 방법이다. 이 방법은 정상시와 이상시의 데이터를 모두 알고 있는 경우와 정상시에 취득된 데이터만으로 진단기준치를 설정하는 경우로 나눌 수 있다.

1) 정상시와 이상시의 데이터를 모두 알고 있는 경우

그림 3은 정상인 설비에서의 측정치 빈도분포(정상인 설비의 확률밀도계수 $H_0(x)$)와 이상이 발생한 설비에서의 측정치 빈도분포(이상이 있는 설비의 확률밀도계수 $H_1(x)$)를 나타낸 것이다.

여기서, 총 확률밀도계수는 식 (1)과 같다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} H(x) dx = 1 \tag{1}$$

정상인 설비에서의 데이터를 복수회(일반적으로, $n \geq 20$, n : 측정횟수) 측정하면, 그 빈도분포는 그림 3과 같이 정상시의 평균치, 즉 정상설비의 표준치(μ_0)를 중심으로 하는 정규분포 H_0 를 얻을 수 있다. 또한 이상상태에서의 설비에 대하

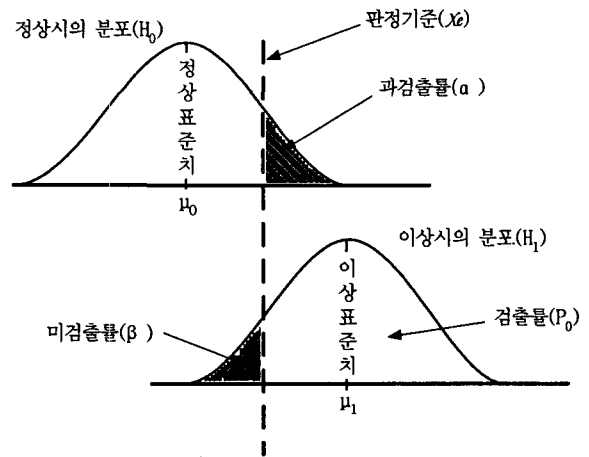


그림 3 진단 기준을 결정하는 통계적 방법

Fig. 3 Statistical analysis method to determine a criterion

여서도 마찬가지로 이상시의 평균치, 즉 이상설비의 표준치(μ_1)를 중심으로 하는 정규분포 H_1 을 얻을 수 있다.

진단기준치(x_c)를 결정하는 것은 과검출률(α)과 미검출률(β)이 최소로 되도록, 정상분포 H_0 와 이상분포 H_1 의 사이에 그림 3과 같이 진단기준치를 설정하고, 측정치가 기준치의 좌측에 있으면 정상으로 진단하고, 우측에 있으면 이상으로 진단하는 것이다. 여기서, α 는 과검출률로 설비가 정상인 경우에도 이상으로 잘못 진단하는 확률을 나타내고, β 는 미검출률로 설비의 이상이 존재하는 경우에도 이상을 발견하지 못할 확률을 나타낸다. 따라서 검출률 P_0 와 미검출률 β 의 관계는 $P_0 + \beta = 1$ 과 같이 간단히 나타낼 수 있다. 따라서 그림 3에서 진단기준치를 크게 하면, 과검출률은 작아지지만 미검출률은 커지고, 반대로 진단기준치를 작게 하면, 미검출률은 작아지지만 과검출률은 커진다. 과검출률과 미검출률을 동시에 작게 하는 것은 불가능하므로, 설비의 중요도를 고려하여 적절한 위치에서 진단기준치를 설정할 필요가 있다. 일반적으로 진단 기준은 과검출률이 20% 이하, 미검출률이 10% 이하인 경우로 결정한다.

2) 정상시의 데이터만으로 진단 기준을 정하는 방법

정상시의 데이터와 이상시의 데이터 모두를 알 수 있는 경우에는, 진단 기준을 설정하기가 편리하나, 일반적으로 이러한 경우는 많지 않다. 이상시의 데이터를 파악하기 곤란한 경우에는 정상시의 데이터만으로 진단 기준을 정하여야 하며, 이때 통계적인 처리가 요구된다.

정상시의 데이터만으로 통계적으로 진단 기준을 정할 때, 진단 기준은 설비가 정상인 경우와 이상인 경우를 구분할 수 있는 기준치를 설정한다. 따라서 진단기준치를 구하기 위해서는 설비가 정상인 경우의 데이터를 최소한 20회 이상 측정하고, 평균치 및 표준편차를 이용하여 진단기준치를 설정할 수 있다. 측정된 정상 상태에서의 데이터를 이용하여 식 (2) 및 식 (3)에서와 같이 평균과 표준편차를 계산한다.

$$\text{평균치} : \mu_0 = (x_1 + x_2 + \dots + x_N) / N \tag{2}$$

$$\text{표준편차} : \sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_0)^2}{(N-1)}} \quad (3)$$

대부분 정상운전시의 데이터는 평균으로부터 표준편차의 2배인 제2표준편차 이내에 위치하며, 소수의 데이터만이 평균으로부터 제2표준편차 이상 떨어져 있다. 따라서 체비셰프의 정리에 의하여 설비가 정상인 상태에서 측정된 데이터가 평균으로부터 표준편차의 3배인 제3표준편차 이내에 존재할 확률은 약 90%이다. 그 결과 정상과 이상 상태를 판정하는 진단기준치 x_e 는 식 (4)와 같이 설정할 수 있다.

$$\text{진단기준치} : x_e = \mu_0 + 3\sigma_0 \quad (4)$$

즉, 측정된 데이터가 진단기준치(x_e) 내에 존재한다면, 설비가 정상적으로 동작하고 있다는 것을 의미한다.[13~15]

2.3 온라인 유증가스 진단기준치

온라인 유증가스 분석을 위한 진단기준치는 센서 제작사의 권고치를 적용한 절대값에 의한 기준치와 변압기의 상태 변화에 따른 열화 경향에 의한 기준치를 모두 적용하였다.

표 1은 온라인 유증가스 센서 제작사(GE Syprotec)에 의해 제시된 절대치를 이용한 유증가스의 진단기준치이다. 진단기준치 설정을 위한 초기치는 센서가 설치되는 변압기의 특성에 따라 다를 수 있기 때문에, 센서가 변압기에 설치된 직후 2주일 동안에 취득된 값들 중 최대치를 초기치로 이용하였다.

따라서 요주의 및 이상 레벨은 초기치가 70ppm이하인 경우와 71~400ppm인 경우, 그리고 400ppm을 초과하는 경우 등 3단계로 분류하여, 각 대상 변압기의 특성에 맞게 설정된다. 예를 들어 센서 설치 후 2주 동안 취득된 데이터의 최대치가 100ppm이었다면, 초기치가 71~400ppm의 경우가 적용된다. 따라서 표 1에 의해 온라인 유증가스 센서에 적용되는 요주의 레벨은 초기치의 1.5배인 150ppm이고, 또한 이상 레벨은 (초기치+100)의 1.5배인 300ppm이 된다.

또한, 본 논문의 온라인 유증가스를 위한 진단 알고리즘에서는 온라인 감시의 가장 큰 장점인 데이터 증가경향에 의한 진단이 가능하므로, 표 1과 같은 절대치에 의한 진단기준치뿐

표 1 온라인 유증가스 센서 제작사의 진단기준치
Table 1 Criteria of an on-line dissolved gas sensor by a manufacturer

단위 : ppm

정보종류	초기치 (설치 후 2주일 동안의 최대치)			비 고
	70 이하	71 ~ 400	401 이상	
요주의	100	초기치의 1.5배	초기치+200	요주의 경보 긴밀한 주의
이 상	200	(초기치+100)의 1.5배	초기치+300	이상 경보 즉각 조치

만 아니라, 표 2와 같이 가스의 급격한 증가량에 의한 경향분석을 이용한 진단기준치를 동시에 적용하였다.

유증 가스 증가량에 의한 진단기준치의 설정은 통계적으로 진단기준치를 결정하는 방법에 따라 진단 시점을 기준으로 최근 약 3주 동안의 평균치(μ_0 , $n=21$, n :측정횟수) 및 표준편차(σ_0)를 이용하였다. 정상시에 측정된 데이터들을 이용한 진단기준치 설정 방법을 적용하여, 진단기준치(x_e)는 식 (4)를 이용하여 $x_e = \mu_0 + 3\sigma_0$ 를 진단기준치로 설정하였다. 따라서 이 범위를 벗어나는 측정 데이터는 분석 결과로 보아서 정상상태에서 벗어나 내부에 이상이 발생하고 있다는 증상이므로, 이상 경보를 알리고 즉각적인 조치를 취하기 위하여 이상 알람을 발생하도록 처리하였다. 이러한 증가 경향에 의한 진단기준치의 동시 적용은 절대치에 의한 진단기준치의 적용에서 놓치기 쉬운 증가 경향에 의한 이상 검출이 가능하기 때문에 변압기의 예방진단에 있어서 유용한 수단이 될 것이다.

표 2 유증 가스 증가량에 의한 진단기준치
Table 2 Criteria of development of dissolved gas

경보종류	진단기준치 ($x_e = \mu_0 + 3\sigma_0$)	비 고
정 상	일평균값 ≤ 진단기준치	정 상
이 상	일평균값 > 진단기준치	이상경보 즉각조치

2.4 온라인 유증가스 진단 알고리즘

온라인 유증가스 감시항목에서 경보가 발생하면, 변압기의 상태를 파악하고, 조치사항을 제시하기 위하여 온라인 유증가스 진단 알고리즘이 구동된다. 유증가스 진단 알고리즘은 온라인 유증가스 센서에서 측정된 데이터들을 절대값에 의한 기준치와 증가량에 의한 기준치를 적용하여 진단하도록 구성되었다.

절대값에 의한 진단은 2.3절의 표 1에서 제시한 온라인 유증가스 센서의 진단기준치를 적용하였다. 따라서 진단기준치를 위한 초기치를 구하기 위하여 “센서 설치 후 2주일 동안의 최대치”를 초기값으로 사용하였다. 또한 유증 가스 증가량에 의한 진단은 표 2에서 제시한 “최근 3주일 동안의 평균치 + 3 σ_0 ”를 진단기준치로 사용하였다.

온라인 유증가스 진단 알고리즘의 결과에 따라, 절대 기준치에 의한 요주의 경보가 발생되었을 때에는 변압기에 부착된 유증가스 센서의 현장 값을 확인하고, 주의상태에서 지속적인 유증가스의 증가경향을 감시하도록 하였다. 또한 절대 기준치에 의하여 이상 경보가 발생한 경우와 일평균 가스량이 증가량에 의한 진단기준치를 초과하여 이상 경보가 발생한 경우에는 다종류 가스 분석, 음향 방출 신호 측정을 통한 부분방전의 위치 추정 등의 정밀분석과 같은 즉각적인 조치사항을 제시하였다. 그리고 변압기의 종합적인 진단에 유용한 추가 정보를 얻기 위하여 다른 온라인 진단 항목인 냉각팬과 펌프 등의 진단 항목에서 경보가 발생했는지 여부도 확인하도록 구성하였다. 또한 추가로 감시제어시스템의 부호출

쓰(buchholtz) 계전기의 동작 여부를 확인할 것을 제시하였다.

그림 4는 온라인 유증가스 진단 알고리즘의 흐름도이다.

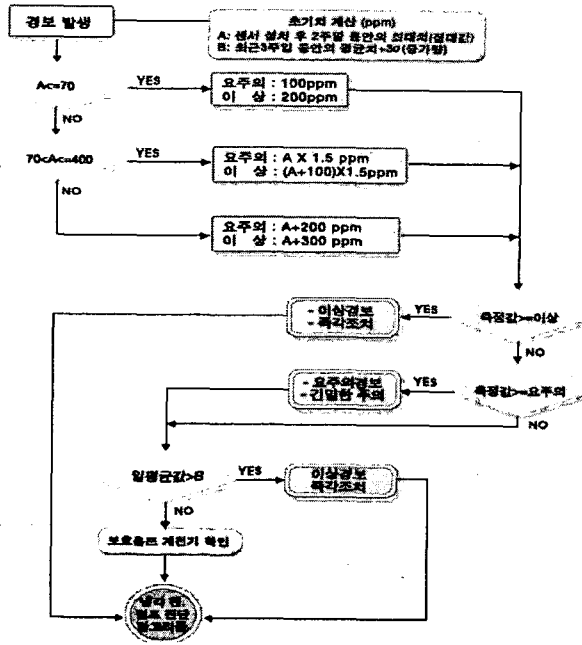


그림 4 온라인 유증가스 진단 알고리즘의 흐름도
Fig. 4 Flow chart of online dissolved gas diagnosis algorithm

2.5 진단기준치에 의한 이상 진단 사례

본 절에서는 운전 중인 변압기에 설치된 온라인 유증가스 센서를 이용하여 본 논문에서 제시한 진단기준치에 의해 변압기의 사고를 예방한 사례를 제시하였다.

유증가스의 이상 징후가 발견된 변압기는 1997년에 제작된 345kV 변압기로, 변압기 내부 보강 공사를 위하여 온라인 유증가스 센서를 탈착 후 재부착한 변압기이다. 변압기는 내부 보강 공사 후 약 2주일 동안 정상적으로 동작한 후, 유증가스가 급증하기 시작하여 요주의 및 이상 레벨을 거쳐 유증가스 센서의 한계 측정치인 2,000ppm에 도달하였다.

그림 5는 변압기에 부착된 유증가스 센서에 의해 정상인 상태에서부터 요주의 및 이상 경보가 발생된 후, 내부 정밀점검이 이루어지기까지 약 한달 동안의 유증가스 데이터를 분석한 그래프이다. 또한, 표 3은 유증가스 센서를 재설치한 후 2주일 동안의 일평균 유증가스 데이터이다. 표 3에서처럼 설치 후 13일째 되는 날에 140ppm의 가스량을 나타내었고, 그 다음날에는 292ppm으로 급격하게 증가되었다.

이러한 유증가스량의 변화를 절대값에 의한 진단기준치로 적용하면, 온라인 유증가스 센서 설치 후 2주 동안의 최대치는 43ppm이기 때문에, 표 1에서 초기치가 70ppm이하인 경우의 진단 기준 레벨이 적용되게 된다. 그 결과 13일째 측정된 140ppm은 요주의 레벨인 100ppm을 초과하여 요주의 경보를 발생하게 되고, 14일째 측정값인 292ppm은 이상 레벨인 200ppm을 초과하여 이상 경보를 발생하게 된다.

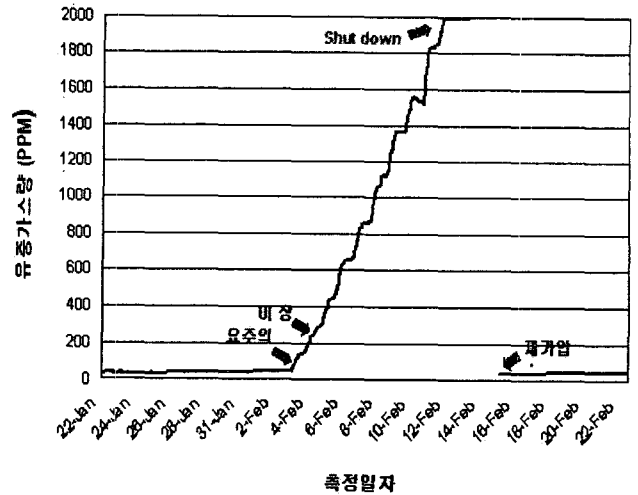


그림 5 이상변압기의 유증가스량 증가 경향
Fig. 5 Development of dissolved gas in an abnormal ansformer

또한 증가 경향에 의한 진단기준치를 적용하면, 진단기준치를 구하기 위하여 최근 약 2주일 동안의 평균치와 표준편차를 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 계산하였다. 따라서 평균치는 33ppm, 표준편차는 4.8이 된다. 그 결과 증가 경향에 의한 진단기준치는 식 (4)에 의해 $33+(3 \times 4.8) = 47\text{ppm}$ 이 되고, 13일째 측정된 일평균값 140ppm은 진단기준치를 초과하여 이상 경보를 발생하는 판정이 된다. 따라서, 증가 경향에 의한 진단기준치를 적용할 때, 변압기 내부 이상에 의하여 급격하게 증가하는 이상을 쉽게 감지할 수 있었다. 따라서 두가지 진단 기준을 함께 적용한다면 급격하게 열화되는 이상과 시간에 따라 열화되는 이상을 모두 검출할 수 있었다.

이러한 온라인 유증가스 센서에 의해 진단된 이상 변압기의 진단 결과를 바탕으로, 온라인 유증가스 센서 데이터의 신뢰성 검증과 정밀한 분석을 위하여, 현장에서 절연유를 채취하여 시험실에서 다종류 유증가스 분석을 실시하였다.

표 4는 정상 운전시와 이상 경보 발생 후, 그리고 변압기 내부 보수 후에 각각 가스 크로마토그래피에 의해 분석된 다종류 유증가스 분석 결과이다. 표 4와 같이 경보 발생 후에 분석된 결과는 이상 경보를 초과하는 다량의 수소가스가 검출되어, 온라인 유증가스 센서에 의해 검출된 결과가 유효함을 증명할 수 있었다.

표 3 이상변압기의 온라인 가스 분석 데이터
Table 3 Online dissolved gas analysis data of an abnormal transformer

단위 : ppm

날 짜	1	2	3	4	5	6	7
일평균값	29	29	28	28	29	32	32

날 짜	8	9	10	11	12	13	14
일평균값	34	35	37	39	43	140	292
					최대값	요주의	이 상

표 4 이상변압기의 다종류 유증가스 분석 결과

Table 4 Result of dissolved multigas analysis in an abnormal transformer

단위 : ppm

회수	일시	발생가스량 (진단 기준 : 요주의/이상)								비고
		H ₂ (400/800)	CO ₂ (5000/7000)	C ₂ H ₂ (20/60)	C ₂ H ₄ (300/750)	C ₂ H ₆ (250/750)	CH ₄ (250/750)	CO (350/600)	TCG (200이상/월)	
1	'02. 01	0	104	0	0	0	0	0	0	정상
2	'02. 05.	0	290	0	0	0	0	20	20	정상
3	'04. 02. (경보발생후)	1,302	175	0	0	0	2	44	1,348	H ₂ 이상
4	'04. 02. (내부보수후)	0	0	0	0	0	0	4	4	정상

수소 가스의 갑작스런 증가는 변압기 내부 부분방전에 의한 국부적인 높은 온도 때문에 발생하는 이상으로 분석된다. 이러한 분석 결과에 따라, 변압기를 임시 휴전하고 내부를 정밀점검하였다. 변압기 내부 정밀점검 결과, 변전소 소내의 전원을 공급하는 3차 붓싱축을 보수 후 재조립하는 과정에서 접촉 불량으로 변압기 내부에 부분적으로 아크가 발생된 것으로 확인되었다. 따라서 변압기 내부의 이상 부위를 보수한 후, 절연유를 여과하여 변압기를 재가압 하였으며, 재가압 후 온라인 유증가스 센서에 의한 측정 데이터는 그림 5에서처럼 정상적으로 안정되게 나타났다. 또한, 재가압 후 절연유를 채취하여 정밀 분석한 다종류 유증 가스분석 결과도 표 4에서처럼 정상적으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 온라인 유증가스 센서의 진단기준치는 변압기 내부에 이상이 발생한 초기에 유증가스의 변화를 감지하기에 충분히 적합한 것을 확인하였고, 현장 적용에 있어서의 신뢰성도 확보할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기 온라인 유증가스의 진단기준치 및 알고리즘에 관하여 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 온라인 유증가스 분석의 진단기준치는 운전중인 변압기에서 측정된 데이터와 제작사에서 제시한 권고치 및 국내 환경 등을 종합적으로 분석하여 절대값에 의한 기준치와 증가경향에 의한 기준치를 제시하였다.
2. 증가 경향에 의한 진단기준치의 동시 적용은 절대값에 의한 진단기준치에서 놓치기 쉬운 열화의 진전에 의한 이상 검출이 가능하기 때문에 변압기의 예방진단에 있어서 유용한 수단으로, 본 논문에서 제시한 온라인 유증가스 기준치

를 적용한 사고 예방진단 사례를 제시함으로써 기준치 설정의 타당성을 검토하였다.

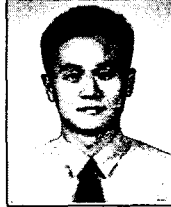
3. 유증가스 진단 알고리즘은 온라인 유증가스 센서에서 측정된 데이터들을 절대값에 의한 기준치와 증가량에 의한 기준치를 적용하여 순차적으로 진단하도록 구성하였다. 그 결과 요주의 및 이상의 알람을 발생시키고, 적절한 조치를 취하여 변압기의 사고를 사전에 예방할 수 있도록 설계하였다.

본 논문에서 제시한 전력용 변압기 예방진단기준치 및 알고리즘은 국내 전력용 변압기의 운전 환경에 적합하며, 각 변압기의 운전환경과 운전 조건에 따라 유동적으로 적용될 수 있다. 그 결과, 그 동안 변압기 운전 데이터의 축적과 모니터링의 역할만 수행하였던 온라인 유증가스 진단의 궁극적인 목적을 달성할 수 있게 되었으며, 이것은 예방진단시스템의 활용과 확대 적용에 크게 기여할 뿐만 아니라, 향후 변전소 무인화 시스템의 적용에도 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 광희로 외, "전력기기 예방진단 기술 연구", 한국전력공사 보고서, pp.19~115, 1988.
- [2] 변전기기 사고현황 분석, 한전 평생전문가그룹 자료집, 1999.
- [3] 변압기 가스분석 및 상태진단 결과보고서, 전력연구원, 1997.
- [4] 변압기 유증가스 감시장치의 실용화 개발, 전력연구원, 1997.
- [5] 권동진, 최인혁, 정길조, 신명철, "가스분석기법을 이용한 전력용 변압기 내부 이상진단을 위한 진단 알고리즘 및 전문가시스템 개발," 한국조명·전기설비학회 논문지, 15, No. 5, pp.68~74, 2001.
- [6] G. Belanger, G. Missout and J.P. Gibeault, "Laboratory Testing of a Sensor for Hydrogen Dissolved in Transformer Oil," IEEE Trans. EI, Vol. 15, No. 2, pp.144~148, 1980.
- [7] M. Yamada et al., "Automatic Field Monitoring of Dissolved Gases in Transformer Oil," IEEE Trans. PAS, Vol. 100, 4, pp.1538~1544, 1981.
- [8] H. Tsukioka et. al., "New Apparatus for Detecting H₂, CO and CH₄ Dissolved in Transformer Oil," IEEE Trans. EI, Vol. 18, No. 4, pp.409~419, 1983.
- [9] TNU 및 Hydran 201i 사용설명서, SYPROTEC, 1999.
- [10] "設備診斷 技術入門," 日本プラントメンテナンス協會
- [11] "預知保全(CBM)の進め方," 日本プラントメンテナンス協會
- [12] "設備診斷 べからず集," 日本プラントメンテナンス協會
- [13] 우정수, 강석복 역, "확률의 입문," 자유아카데미
- [14] 김동희, "確率과 統計," 正益社
- [15] 김종빈, "통계학 2," 세경사

저 자 소 개



진 상 범(陳相範)

1970년 11월 11일생. 1995년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 (주)태광이엔시 부설연구소 진단2

팀 팀장

E-mail : matt@tge.co.kr



권 동 진(權東震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

E-mail : djkweon@kepri.re.kr



곽 주 식(郭周植)

1972년 1월10일생. 충북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년~현재 한전전력연구원 전력계통연구실 연구원.

E-mail : kwakjs@kepri.re.kr



곽 희 로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생, 1967년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1986년 MIT Visiting Scientist, 현재 숭실대 전기제어시스템 공학부 교수 및 부총장

E-mail : hrkwak@ssu.ac.kr



김 재 철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 숭실대 전기제어시스템공학부 교수

E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr