

Establishment of Diagnostic Criteria in the Preventive Diagnostic System for the Power Transformer

權 東 震[†] · 具 敎 善^{*} · 郭 周 植^{**} · 禹 貞 旭^{**} · 姜 鍊 旭^{**}

(Dong-Jin Kweon · Kyo-Sun Koo · Joo-Sik Kwak · Jung-Wook Woo · Yeon-Woog Kang)

Abstract - The preventive diagnostic technique prevents transformers from power failure through giving alarm and observing transformers in service. And it helps to establish the plan for optimum maintenance of the transformer as well as to find location or cause of fault using accumulated data. Data detection and experience of the preventive diagnostic system need to establish the preventive diagnostic algorithm regarding interrelationship between detected data and deterioration of equipment. Therefore in-depth analysis about the preventive diagnosis system is required.

KEPCO has adopted the preventive diagnostic system at nine 345kV substations since 1997. Techniques for component sensors of the preventive diagnostic system were settled but diagnostic algorithm, diagnostic criteria and practical use of accumulated data are not yet established. This paper, to build up the base of preventive diagnostic algorithm for the power transformer, investigated the preventive diagnostic criteria for the power transformer.

Key Words : Preventive Diagnostic System, Transformer, Preventive Diagnostic Criteria, Algorithm, Substation

1. 서 론

변압기 예방진단시스템은 변압기의 운전상태에서 온라인으로 이상징후를 상시 감시하여 급속한 이상 진행시 경보를 발하여 불시정전을 방지하며, 축적된 데이터로 변압기의 상태에 따른 최적의 유지보수 계획을 수립하고, 고장시 누적된 데이터로 이상원인 및 이상위치를 판정하기 위한 것으로, 각종 온라인 이상검출 기술을 종합하여 변전소 운전입장에서 시스템화한 것이다.

변압기 예방진단시스템은 1980년대부터 미국, 일본을 중심으로 개발되어 왔으며, 일본의 경우, 변전소의 무인화, 자동화의 입장에서 예방진단시스템과 감시제어시스템을 통합한 변전소 자동화시스템을 적용하고 있다. 특히 일본은 중전기 제작사별로 예방진단시스템을 개발하여, 변압기 납품시에 예방진단시스템도 같이 공급하고 있으며, 전력회사는 변전소의 중요도에 따라 예방진단 항목을 선택하여 적용하고 있다.[1,2] 미국을 비롯한 유럽에서는 일본에 비하여 변전소 전체에 대한 자동화시스템 개발은 저조하나, 미국에서는 변압기 및 차단기에 대해, 유럽에서는 GIS를 대상으로 설비별 진단장치 개발에 주력하고

있다.[3]

국내에서는 1980년대 중반부터 변압기 및 GIS에 적용되는 각종 센서 및 이상검출장치를 개발하여 왔다.[4,5] 특히 초음파 측정기술을 이용한 변압기 부분방전 측정장치, 수소가스 및 가연성가스 측정장치, 피뢰기 누설전류 측정장치 및 GIS 부분방전 측정장치 등을 개발하여 왔다. 이러한 연구를 기반으로 한 국전력공사에서는 1997년에 4개의 345kV 변전소에 예방진단시스템을 적용하였고, 1998년에는 5개의 345kV 변전소에 예방진단시스템이 추가로 적용하였으며, 2004년에 2개의 765kV 변전소에도 예방진단시스템을 적용하였다.[6]

그러나 현재 운전중인 변압기 예방진단시스템의 경우, 각종 센서의 적용기술은 확보되어 있으나, 예방진단 기술이 도입되기 시작하는 초기상태임에 따라 아직까지 측정 데이터의 활용 기법이나 진단 알고리즘이 확립되어 있지 않은 상태이다. 진단 기준치나 알고리즘의 적용은 예방진단시스템에 누적되는 데이터의 분석이 지속적으로 이루어져야하고, 이와 더불어 국내 변압기 운영기준 및 운전환경을 반영한 합리적인 진단기준치 설정이 필요하다.

본 논문에서는 1997년부터 운전되고 있는 9개의 345kV 변전소의 예방진단시스템을 대상으로 하여, 국내 변압기 운영기준 및 운전환경의 반영하여 예방진단시스템에 적용되는 진단 항목별 기준치를 설정하였다.

2. 예방진단 기준치 설정 기법

진단기술은 “설비의 상태를 정량적으로 관측하고, 장애의

† 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博
E-Mail : djkweon@kepri.re.kr

* 正會員 : 韓電 電力研究院 研究員

** 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

接受日字 : 2005年 7月 12日

最終完了 : 2005年 8月 18日

상태를 예측하는 기술”로 정의된다. 따라서 진단기술은 현재 시점에서 설비의 열화상태를 진단하는 상태진단기술(condition identification technique)과 장래의 상태를 예측하는 상태예측 기술(condition prognosis technique)로 구분될 수 있다. 그러므로 진단기술은 단순히 설비의 상태를 관측하는 것이 아니고, 수명 예상 등 여러 가지 관련 항목을 병용하여 장래의 설비상태를 예측하는 기능이 포함되어야 한다.

예방진단 기술을 실용화하는 최초의 단계는 설비의 열화에 민감하게 반응하는 이상징후 파라미터의 진단기준치를 정하는 것이다. 이상징후 파라미터는 시간이 진행됨에 따라 특정한 이상에 의하여 변화되는 변수이며, 이상징후 파라미터의 진단기준치를 적절하게 설정한다면, 검출지연시간을 단축시킴으로써 기기의 이상을 조기에 발견하고, 설비가 고장에 이르는 것을 예방할 수 있다.

변압기의 진단기준치는 주로 정상, 요주의 및 이상 레벨로 나눌 수 있다. 정상 레벨은 변압기가 정상인 상태로, 정상인 변압기에서 측정된 데이터의 평균치, 초기치 또는 베이스 라인이다. 요주의 레벨은 변압기에 어떤 변화가 있는 것을 의미한다. 이 상태는 운전조건의 변화가 필요하지만, 반드시 사고로는 이어지지 않는기 때문에 운전자의 주의를 필요로 하는 레벨을 의미한다. 그리고 이상 레벨은 변압기가 위험한 상태로 응급한 대책이 필요한 것을 의미한다.

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

2.1 규격과 표준치를 이용하는 방법

규격과 표준치를 이용하는 방법은 변압기의 운전기준 및 변압기 제작사의 권고치나 연구기관에 의해 발표된 기준치를 이용하는 방법이다. 현재 전력용 변압기의 예방진단시스템에 사용되는 많은 진단 항목들의 진단기준치는 한전에서 적용하는 주변압기 운영기준을 기준으로 하고 있다.

2.2 통계적인 방법

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

㉠ 정상시와 이상시의 데이터를 모두 알고 있는 경우

그림 1은 정상인 설비에서의 측정치 빈도분포(정상인 설비의 확률밀도계수 $H_0(x)$)와 이상이 발생한 설비에서의 측정치 빈도분포(이상인 설비의 확률밀도계수 $H_1(x)$)를 나타낸 것이다.

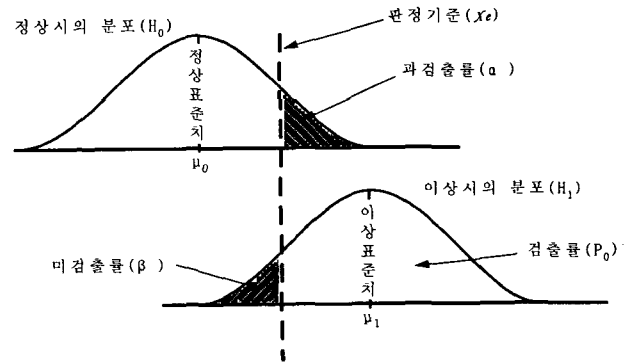


그림 1 진단기준을 결정하는 통계적 방법
Fig. 1 Statistical method for decision of diagnostic criteria

여기서, 총 확률밀도계수는 식 1과 같다.

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

정상인 설비에서의 데이터를 복수회(보통 $n \geq 20$, n : 측정횟수) 측정하면, 그 빈도분포는 그림 1과 같이 정상시의 평균치, 즉 정상설비의 표준치(μ_0)를 중심으로 하는 정규분포 H_0 를 얻을 수 있다. 또한 이상상태에서의 설비에 대하여서도 마찬가지로 이상시의 평균치, 즉 이상설비의 표준치(μ_1)를 중심으로 하는 정규분포 H_1 을 얻을 수 있다.

진단기준치(x_e)를 결정하는 것은 과검출률(α)과 미검출률(β)이 최소가 되도록, 정상분포 H_0 와 이상분포 H_1 의 사이에 그림 1과 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 1에서 진단기준치를 높게 하면, 과검출률은 작아지지만 미검출률은 커지고, 반대로 진단기준치를 낮게 하면, 미검출률은 작아지지만 과검출률은 커진다. 과검출률과 미검출률을 동시에 작게 하는 것은 불가능하므로, 설비의 중요도를 고려하여 적절한 위치에서 진단기준치를 설정할 필요가 있다. 일반적으로 진단기준은 과검출률이 20% 이하, 미검출률이 10% 이하인 경우로 결정한다.

㉡ 정상시의 데이터만으로 진단기준을 정하는 방법

정상시의 데이터와 이상시의 데이터 모두를 알 수 있는 경우에는, 진단기준을 설정하기가 편리하나, 이상시의 데이터를 파악하기 곤란한 경우에는 정상시의 데이터만으로 진단기준을 정하여야 한다.

정상시의 데이터만으로 통계적으로 진단기준을 정할 때, 진단기준은 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 3에서와 같이 평균과 표준편차를 계산한다.

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

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

대부분 정상운전시의 데이터는 평균으로부터 표준편차의 2배인 제2표준편차 이내에 위치하며, 소수의 데이터만이 평균으로부터 제2표준편차를 벗어난다. 즉 설비가 정상인 상태에서 측정된 데이터가 평균으로부터 표준편차의 3배인 제3표준편차 이내에 존재할 확률은 약 99.7%이다. 그 결과 정상과 이상 상태를 판정하는 진단기준치 x_e 는 식 4와 같이 설정할 수 있다.

$$x_e = \mu_0 + 3\sigma_0 \quad (4)$$

즉, 측정된 데이터가 진단기준치 (x_e) 내에 존재한다면, 설비가 정상적으로 동작하고 있다는 것을 의미한다.

2.3 열화경향에 의해 진단기준을 정하는 방법

열화경향관리(trend control)는 변압기 상태의 변화를 정량적으로 측정하여, 측정 데이터의 변동경향과 유형의 관측을 통하여 진단을 행한다. 이것은 기존의 시간기준 보수방식에는 없는 온라인 예방진단의 특징이다.

열화진단 경향관리에서 주의레벨에 도달한 경우에는 보다 정밀하게 진단하고, 보수방법을 결정하는 정밀진단기술(precision diagnosis technique : PDT)이 사용된다. 이러한 열화경향 관리의 종류는 계량치 경향관리와 계수치 경향관리가 있다.

① 계량치 경향관리 : 계량치 경향관리는 일반적으로 압력, 온도 등 연속적으로 발생하는 양의 경향관리를 의미한다. 계량치 경향관리에는 성능 모니터링(performance monitoring)과 2차효과 경향관리가 있다. 성능 모니터링은 설비의 성능을 나타내는 파라미터, 즉 주 효과를 관리하는 것이다. 2차효과 경향관리는 설비의 운전에 동반하여 2차적으로 발생하는 파라미터의 경향관리이다. 이러한 계량치 경향관리에 있어서는 계량치가 정규분포를 따르는 것을 이용하고, 관리한계치의 3σ 를 사용하는 것이 가능하다. 성능 모니터링은 변압기의 성능을 직접 그래프로 나타내어, 결함과 설비열화의 관계를 파악하는데 아주 유효하다.

② 계수치 경향관리 : 계수치 경향관리는 이벤트 모니터링(event monitoring)이라고도 한다. 일반적으로 특정한 기간의 고장 횟수를 그래프로 나타내고, 전체 변압기의 관리상황을 파악하는데 사용하지만, 단일 변압기의 관리에도 사용 가능하다.

열화 경향을 이용하여 변압기의 진단기준치를 설정하는 경우, 열화 경향을 보여주는 열화경향 관리도에서 측정치가 주의레벨 이내에 있는 경우에도, 특별한 경향이 없는가를 항상 주의할 기울이어야 한다.

변압기가 정상인 상태에 있어도 측정치는 표준 레벨 \bar{x} 의 상하에 random형으로 분포하는 경우가 있다. 이러한 경우, 이론적으로는 통계적인 수법으로 데이터의 불규칙성을 검증할 필요가 있다.

그림 2는 측정치가 일정한 경향을 나타내는 대표적인 경향관리도의 예이다.

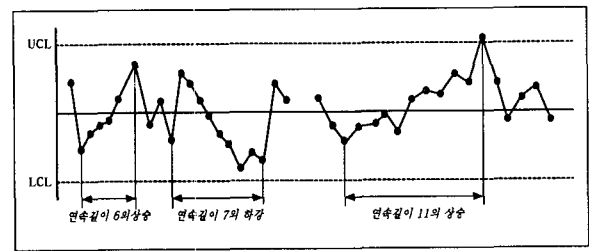


그림 2 경향관리도
Fig. 2 Graph of trend control

2.4 사람의 경험이나 감각에 기초하는 방법

사람의 손 감각은 진동과 온도 등의 진단기준 설정에 아주 유용하다. 정량성이 없는 결점이 있지만, 별도의 계측기가 필요 없는 장점이 있다. 다른 방법에 의해 구체적인 이상원인 및 조치사항 등을 파악하지 못하는 경우, 전문가에게 문의하는 경우가 대표적인 사례이다.

3. 예방진단시스템의 항목별 진단기준치 설정

3.1 온라인 유증가스 진단기준치

3.1.1 진단기준치 설정

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

표 1은 유증가스 센서 제작사에 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 이용하였다.

따라서 요주의 및 이상 레벨은 초기치가 70ppm이하인 경우와 71~400ppm인 경우, 그리고 400ppm을 초과하는 경우 등 3

단계로 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.

표 1에서 요주의는 변압기 내부에 이상의 징후가 나타나고 있다고 판정할 수 있는 레벨이다. 따라서 긴밀한 주의를 갖고 다른 진단 항목들을 분석해야 한다. 그리고 이상은 요주의 레벨이 진전하여 변압기 내부에 이상이 발생하고 있다고 명확히 판정할 수 있는 레벨이다. 이때는 즉각적인 초기 조치와 함께 다른 진단 항목의 결과를 종합하여 진단 알고리즘을 통한 판정이 요구되는 상태이다.

표 1 유증가스 센서의 진단기준치
Table 1 Diagnostic criteria of gas in oil sensor

단위 : ppm

경보 종류	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

또한, 예방진단 알고리즘에서는 온라인 감시의 가장 큰 장점인 데이터 증가경향에 의한 진단이 가능하므로, 표 1과 같은 절대치에 의한 진단기준치뿐만 아니라, 표 2와 같이 가스의 급격한 증가량에 의한 경향 분석을 이용한 진단기준치를 동시에 적용하였다.

표 2 유증가스 증가량에 의한 진단기준치
Table 2 Diagnostic criteria depending on gas in oil increment

단위 : ppm

경보종류	진단기준치 ($x_e = \mu_0 + 3\sigma_0$)	비 고
정 상	일평균값 \leq 진단기준치	정 상
요주의	일평균값 $>$ 진단기준치	주의
이 상	일평균값 $>$ 진단기준치 ($x_e = \mu_0 + 9\sigma_0$)	즉각조치

유증 가스 증가량에 의한 진단기준치의 설정은 통계적으로 진단기준을 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 진단 기준치 설정 방법을 적용하여, 진단기준치 (x_e)는 식 4와 같이

$x_e = \mu_0 + 3\sigma_0$ 로 설정하였고, 이 범위를 벗어나는 데이터는 정상상태에서 벗어나 내부에 이상이 발생하고 있다는 징후이므로, 요주의 경보를 발생시키고, $x_e = \mu_0 + 9\sigma_0$ 이상일 때는 이상경보를 발생시켜 즉각적인 조치를 취하고, 다른 진단 항목을 점검하여 그 상관관계를 분석하도록 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 수 있다.

3.1.2 진단기준치에 의한 이상진단 사례

운전 중인 변압기에 설치된 온라인 유증가스 센서를 이용하여 제시한 진단기준치에 의해 변압기의 사고를 예방한 사례를 분석하였다. 표 3은 유증가스 센서를 설치한 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 약 2주 동안의 최대치는 43ppm이기 때문에, 표 1에서 초기치가 70ppm이하인 경우의 진단기준 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.

표 3 이상변압기의 가스 분석 데이터

Table 3 Data of gas analysis in an abnormal

transformer 단위 : ppm

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

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

또한 증가 경향에 의한 진단기준치를 적용하면, 진단기준치를 구하기 위하여 최근 약 2주일 동안의 평균치와 표준편차를 식 2와 식 3을 이용하여 계산하였다. 따라서 평균치는 33ppm, 표준편차는 4.8이 된다. 그 결과 증가 경향에 의한 진단기준치는 식 4에 의해 $33 + (3 \times 4.8) = 47$ ppm이 되고, 13일째 측정된 일 평균값 140ppm은 진단기준치를 초과하여 이상 경보를 발생하는 판정이 된다.

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

협실에서 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.

수소 가스의 갑작스런 증가는 변압기 내부 부분방전에 의한 국부적인 높은 온도 때문에 발생하는 이상으로 분석된다. 이러한 분석 결과에 따라, 변압기를 임시 휴전하고 내부를 정밀 점검하였으며, 소내 전원을 공급하는 3차 부싱측에서 접촉 불량으로 부분적으로 아크가 발생된 것으로 추정되었다. 따라서 변압기 내부의 이상 부위를 보수한 후, 절연유를 여과하여 변압기를 재가압하였으며, 재가압 후 온라인 유증가스 센서에 의한 측정 데이터는 정상적으로 안정되게 나타났다. 또한, 재가압 후 절연유를 채워하여 정밀 분석한 다종류 유증 가스분석 결과도 표 4에서처럼 정상적으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 온라인 유증가스 센서의 진단기준치는 변압기 내부에 이상이 발생한 초기에 유증가스의 변화를 감지하기에 충분히 적합한 것을 확인하였고, 현장 적용에 있어서의 신뢰성도 확보할 수 있었다.

표 4 이상변압기의 다종류 유증가스 분석결과

Table 4 Result of multiple gas in oil analysis

단위 : ppm

회수	일 시	발생 가스 량							비고
		H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	CO	TCG	
1	'02. 01	0	0	0	0	0	0	0	정상
2	'02. 05.	0	0	0	0	0	20	20	정상
3	"04. 02. 경보발생후	1,302 (이상)	0	0	0	2	44	1,348	이상
4	'04. 02. 내부보수후	0	0	0	0	0	4	4	정상
기준치	요주의	400	20	300	250	250	350	1000	345kV
	이상	800	60	750	750	750	600	2500	기준

3.2 냉각 팬 및 펌프 진단기준치

변압기의 냉각 시스템은 단계별 냉각방식에 의해 정해진 냉각용량에 따라 냉각 팬의 수량, 냉각 펌프의 용량 등이 정해진다. 따라서 냉각 팬과 냉각 펌프의 이상 유무 진단은 냉각 팬과 냉각 펌프 전동기의 동작 전류로 판단할 수 있다.

냉각 팬과 냉각 펌프 전동기 동작전류의 진단기준치는 전동기의 정격전류를 기준으로 사용하였다. 본 연구에서는 온라인으로 측정되는 값이 정격전류 내에 존재하면 정상적으로 동작하고 있는 것으로 판단하고, 측정된 전류 값이 범위를 벗어나면, 표 5와 같이 동작전류의 크기에 따라, 과부하 및 단선 등의

이상 여부를 판단할 수 있도록 하였다.

표 5 냉각 팬 및 펌프의 진단기준치

Table 5 Diagnostic criteria of cooling fan and pump

감시항목	진 단 기 준 치 (정격전류=A)	
	상 태	조 치 사 항
냉각 팬, 냉각 펌프 동작전류	전동기 전류 = A	정 상
	전동기 전류 > A	전동기 이상, 과부하
	전동기 전류 < A	저전압 확인
	전동기 전류 = 0	전원 off 및 단선확인

냉각 팬과 냉각 펌프 전동기의 정상적인 동작전류를 취득하기 위해서는, 냉각 팬과 냉각 펌프의 기동시에 발생하는 기동전류를 고려하여, 과도 상태가 지난 후에 측정된 데이터를 이용하여야 한다. 따라서 전동기의 정상적인 동작전류 측정을 위한 시간 지연(time delay)이 필요하며, 이를 위하여 6개의 전력용 변압기에서 정상적으로 동작하는 동일한 규격의 냉각 팬에 대하여, 각각 4회씩 총 24개의 동작전류 데이터를 측정하였다. 동작전류가 과도 상태를 지나 안정되기까지 걸리는 시간 지연의 평균값은 1.14초였고, 최고치는 1.26초였다. 따라서 동작전류가 충분히 안정되는 시간 지연을 주고 정상적인 전류를 측정하기 위하여 2초의 시간 지연을 설정하고 데이터를 측정하도록 하였다.

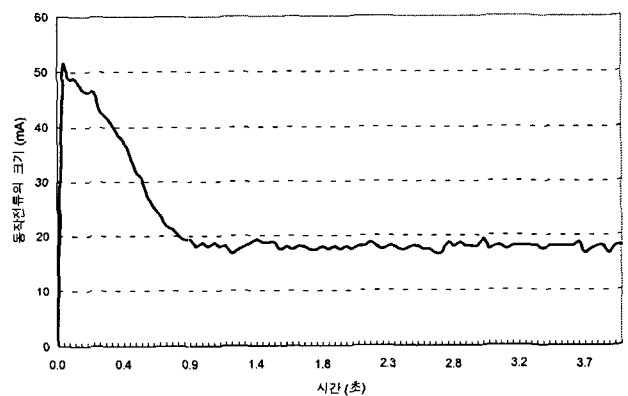


그림 3 냉각 팬의 기동전류

Fig. 3 Starting current of cooling fan

그림 3은 냉각 팬이 기동할 때 측정된 팬 동작전류에 대한 대표적인 그래프이다. 그림 3에서처럼 팬이 기동할 때는 정상전류의 2배 이상 크기의 기동전류가 측정되었고, 적어도 2초의 시간 지연을 거친 후에 정상적인 동작전류가 나타난다. 따라서 만약 시간 지연을 고려하지 않는다면, 이러한 기동전류가 측정되어 이상 경보를 발생시킬 것이다. 그러므로 냉각 팬과 냉각 펌프의 동작전류에 관한 진단의 경우, 2초의 시간 지연 후 측정해야만 전동기의 기동으로 인해 발생하는 과도 전류는 무시되고, 정상전류를 측정할 수 있다.

3.3 부하전류 진단기준치

부하전류는 배전반 내의 감시제어시스템으로부터 데이터를 입력받는다. 부하전류의 진단기준치는 변압기 제작사의 권고치를 기준을 참고하여 주변압기 운영기준에 따라 설정하였다. 100% 부하시의 전류치를 기준으로 과부하 전의 연속부하, 과부하 시간, 그리고 외기온도 등을 고려하여, 표 6과 같이 변압기 과부하 내량을 적용하였다. 표 6에서처럼 과부하전 부하가 90%이고, 외기온도가 20℃인 경우, 과부하량이 125%이면 1시간 동안 과부하운전이 가능하며, 과부하량이 115%이면 2시간 동안 과부하 운전이 가능하다.

표 6 변압기의 과부하 내량

Table 6 Overload limits of the power transformer

경보종류	과부하 시간	과부하 전의 연속부하 (정격용량에 대한 %)					
		70% 이하			90% 이하		
		외기온도(℃)			외기온도(℃)		
		10 이하	11~20	21~30	10 이하	11~20	21~30
요주의	2시간	125%	120%	110%	125%	115%	105%
이상	1시간	140%	130%	120%	135%	125%	110%

3.4 외기온도 진단기준치

한전기준에는 변압기를 비롯한 변전기기의 외기온도 및 표 고에 따른 운전 허용한계가 정해져 있다. 이 기준에 따라 외기온도는 1년 동안의 최고온도가 40℃ 이상이거나, 연간 최저온도가 -25℃ 이하일 때 경보가 발생되도록 설정하였다. 또한, 하루 평균온도가 30℃ 이상일 때 이상 기온으로 판정하도록 진단기준치를 설정하였다.

3.5 절연유 온도 및 권선온도 진단기준치

절연유 온도와 권선온도의 진단기준치를 설정하기 위하여 세 가지 기준을 적용하였다. 첫째로 제작사에서 제시한 절대기준치, 둘째는 절연유 온도와 권선온도의 상승온도를 이용한 진단기준치, 그리고 마지막으로 부하율에 따른 권선최고점의 온도를 계산하여 절연유와 권선온도의 상태를 종합적으로 진단하도록 처리하였다.

현재 국내에서 사용 중인 전력용 변압기의 절연유 온도 및 권선온도의 경보 레벨은 한전의 “변전소 운전 및 순시점검 기준”에 의해 표 7과 같이 절연유 및 권선온도의 절대 기준치와 비교하고 있다. 그러나 변압기의 특성은 각각의 제작사별로 약간의 차이가 있으므로 표 7과 같이 요주의 및 이상 등의 경보에 대한 각각의 진단기준치는 제작사의 권고치를 따르고 있다.

또한, 절연유 온도 및 권선온도의 진단기준치를 설정할 때, 표 7에서 제시된 절대치에 의한 값뿐만 아니라, 절연유 온도와 권선온도의 상승온도도 이용하였다. 상승온도는 변압기의 구

조, 크기, 부하량, 변압기의 운전조건 등에 영향을 받는다.

표 7 절연유 온도 및 권선온도 진단기준치

Table 7 Diagnostic criteria of oil and winding temperature 단위 : ℃

경보종류		절연유 온도 기준치	권선온도 기준치
요주의	A사	85	95
	B사	95	110
이상	A사	95	110
	B사	105	120

현재 전력용 변압기에서 온도상승 허용한도는 주위 온도가 40℃를 초과하지 않고, 1차 정격전압의 ±7% 탭에서 1차, 2차 및 3차권선이 동시에 연속 정격출력을 낼 때, 평균 온도상승 허용한도는 절연유 온도가 55℃, 권선온도가 65℃가 적용되고 있다. 따라서 절연유 온도 진단기준치에서는 절연유 온도에서 외기온도를 뺀 절연유의 상승온도를 계산하고, 온도상승 허용한도인 55℃를 기준치로 설정하였다. 또한 권선온도 진단기준치에서는 권선 상승온도를 계산하고, 권선 상승온도 허용한도인 65℃를 기준치로 설정하였다.

마지막으로 변압기 개발시험 결과에 따른 정격부하에서 권선 최고점 평균온도를 계산하고, 식 5와 같이 부하율에 따른 권선 최고점 온도를 계산하여 98℃는 요주의, 120℃의 초과는 이상으로 진단한다.

부하율에 따른 권선 최고점 온도

$$= \text{절연유온도} + (\text{권선최고점 평균온도} - \text{절연유온도}) \times \text{정격부하} \times 1.3 \times \text{부하율} \quad (5)$$

3.6 부하시 탭 절환장치 진단기준치

부하시 탭 절환장치의 진단기준치는 기본적으로 한전의 기준과 탭 절환장치 제작사에서 권고한 기준치를 따르고 있다. 한전에서는 부하시 탭 절환장치 제작사에서 제시한 진단장치를 사용하고 있으므로, 부하시 탭 절환장치 진단장치에서의 데이터를 수신하여 접점마모량, 토크, 과부하, 탭 동작횟수 및 각종 이벤트를 관리한다.

표 8 부하시 탭 절환장치의 진단항목 및 진단기준치

Table 8 Diagnostic criteria and items of OLTC

감시항목	진단기준치
접점마모량	마모량 > 마모량 제한치 ⇒ 접점교체신호
토크	토크 > 토크 제한치 ⇒ 경보
온도	온도 > 온도상한값 또는 온도 < 온도하한값 ⇒ 경보
탭 동작횟수	27,000회 ⇒ 부하시 탭 절환장치 절환스위치 점검 40,000회 ⇒ 부하시 탭 절환장치 내부 절연유 교체 100,000회 ⇒ 부하시 탭 절환장치 점검

점점마모량의 경우 제한치를 넘어설 경우 점접을 교체하는 경보를 발생하도록 처리하였다. 또한 토크 감시의 경우 토크 제한치를 기준으로 요주의 경보를 발생하도록 설정하였다. 그리고 온도를 통하여 과부하를 감시하도록 하였으며, 탭 동작 횟수에 따라 부하시 탭 절환장치의 절연유 및 점접 조치를 취하는 경보를 발생하도록 처리하였다. 표 8은 전력용 변압기의 부하시 탭 절환장치의 감시항목 및 진단기준치이다.

3.7 활성정유장치 압력 진단기준치

활선정유장치 필터의 압력은 한전의 주변압기 운영기준을 적용하여 활선정유장치 내부 온도가 25℃ 이상일 때, 오일필터 압력계의 지시치가 3.5bar(kg/cm²)를 초과하면 경보를 발생하도록 진단기준치를 설정하였다. 또한, 부하시 탭 절환장치가 30,000회 동작한 후, 또는 3년 동안 운전된 후, 그리고 부하시 탭 절환장치의 진단 결과가 이상 경보 발생시에는 활선여과기를 분해 점검하여, 수분이 30ppm 이상이고 절연내압이 40kV/2.5mm 이하시에는 오일 필터를 교체하도록 하였으며, 누유여부 확인, 압력계 정상 동작여부 등을 측정하도록 하였다.

4. 결 론

변압기 유지보수 기술의 변화에 따라 향후 예방진단시스템이 확대적용될 예정이다. 그러나 변압기 예방진단시스템이 도입되는 초기단계임에 따라 측정 데이터의 분석을 통한 진단기준치가 확립되지 않은 상태이다. 따라서 예방진단시스템에 축적된 데이터의 분석과 국내 변압기 운영기준 및 운전환경을 반영한 합리적인 진단기준치 설정 및 알고리즘이 개발되어야 한다. 본 논문에서는 국내실정에 적합한 진단기준치를 설정하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 온라인 유증가스 분석을 위한 진단기준치는 정상, 요주의 및 이상 등의 3단계로 분류하였다.
- (2) 냉각 팬과 냉각 펌프의 이상 유무 진단은 냉각 팬과 냉각 펌프 전동기의 동작 전류로 판단할 수 있으며, 냉각 팬과 냉각 펌프 전동기의 동작전류의 진단기준치는 전동기의 정격전류를 기준으로 사용하였다.
- (3) 부하전류의 진단기준치는 주변압기 운영기준에 따라 100% 부하시의 전류치를 기준으로 과부하 전의 연속부하, 과부하 시간, 그리고 외기온도 등을 고려하여 적용하였다.
- (4) 외기온도는 이러한 외기온도 허용한계를 기준으로, 1년 동안의 최고온도와 연간 최저온도에 따라 경보가 발생하도록 진단기준치를 설정하였다.
- (5) 절연유 온도와 권선온도의 진단기준치를 설정하기 위하여 세 가지 기준을 적용하였다. 첫째로 제작사에서 제시한 절대기준치, 둘째는 절연유 온도와 권선온도의 상승온

도를 이용한 진단기준치, 그리고 마지막으로 부하율에 따른 권선최고점의 온도를 계산하여 절연유와 권선온도의 상태를 종합적으로 진단하도록 처리하였다.

- (6) 부하시 탭 절환장치의 진단기준치는 부하시 탭 절환장치 제작사에서 권고한 기준치를 사용하였다.

참 고 문 헌

- [1] Y.Fujimoto, et. al., "Operation of an On-Line Substation Diagnosis System", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, pp.1628~1635, 1988
- [2] T.Kawada, T.Yamagiwa and F.Endo, "Predictive Maintenance Systems for Substations", Hitachi Review, Vol.40, No.2, pp.135~144, 1991
- [3] J.S. Pearson, B.F. Hampton and A.G. Sellars, "A continuous UHF monitor for gas-insulated substations," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.26, No.3, pp.469~478, 1991
- [4] 권동진 외, "초음파 신호 수의 이동평균에 의한 전력용 변압기의 예방진단," 대한전기학회 논문지, Vol.45, No.3, pp.432~437, 1996
- [5] 권동진, "온라인 변압기 부분방전 측정기법 적용," 대한전기학회 논문지, Vol.50C, No.8, pp.394~400, 2001
- [6] 권 동진 외, "765kV 변전기기 예방진단시스템 개발", 한전전력연구원 최종보고서, pp.1~128, 2001.

저 자 소 개



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 전력계통연구소 선임연구원

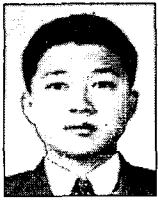
Tel : 042-865-5862, Fax : 042-865-5844
E-mail : djkwon@kepri.re.kr



구 교 선(陳 相 範)

1974년 9월 27일생. 2001년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전전력연구원 전력계통연구소 연구원

Tel : 042-865-5888, Fax : 042-865-5844
E-mail : kskoo@kepri.re.kr



곽주식(郭周植)

1972년 1월 10일생. 1994년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한전전력연구원 전력계통연구소 선임연구원

Tel : 042-865-5868, Fax : 042-865-5844

E-mail : jskwak@kepri.re.kr



우정욱(禹貞旭)

1968년 9월 19일생. 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~한전전력연구원 전력계통연구소 선임연구원

Tel : 042-865-5864, Fax : 042-865-5884

E-mail : jwwoo@kepri.re.kr



강연욱(姜鍊旭)

1966년 10월 5일생. 1988년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1990년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년~현재 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

Tel : 042-865-5863, Fax : 042-865-5884

E-mail : ywkang@kepri.re.kr