

건식변압기 온도분포 특성 분석

선종호, 허종철, 강동식, 김광호
한국전기연구원

Characteristics of temperature distribution for dry transformer

J. H. Sun, J. C. Heo D. S. Kang, K. H. Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 건식변압기는 난연성 변압기로서 옥내나 선박과 같은 화재의 위험성이 있는 곳에 주로 사용된다. 본 연구에서는 삼상 건식변압기의 온도분포특성을 설명하였다. 부하율에 따라 온도분포특성시험을 실시하였으며, 온도센서와 열화상카메라를 이용하여 변압기의 온도를 측정하였다. 분석결과 온도는 두 권선이 인접한 곳에서 가장 크게 나타났다.

러므로 건식변압기도 열적인 등급에 따라 규정온도이하에서 사용되어야 하며 다음 표는 온도 등급에 따른 규정온도를 보여주고 있다. 이 표에서 처럼 H중 절연의 경우 사용온도는 180℃이하이고 상승온도는 120℃ 이하임을 알 수 있다.

표 1 절연종별 온도 상승한도

구분	B종	F종	H종	비고
권선온도상승(℃)	75	95	120	JEC204기준
허용최고온도(℃)	130	155	180	

1. 서 론

건식변압기의 열화는 권선의 절연에서 일어나며 권선 절연특성에 크게 좌우된다. 건식변압기 권선의 절연시스템은 내부의 도체와 이를 둘러싸는 고체절연체 및 에폭시 수지의 절연체에 의해 이루어지고 있다. 일반적으로 이러한 건식변압기의 권선은 사용 중에 상시 운전시의 전압과 뇌 전압, 침입 서지 등 전기적 스트레스를 받는다. 또한 절연시스템은 일반적으로 전기 절연뿐만 아니라, 기계적 구조물로서의 기능도 포함하고 있는 것으로 기계적 지지에 의한 응력 단락시의 전자력 및 온도변화에 의한 열응력 등의 기계적 스트레스를 받는다. 이상과 같이 건식변압기에는 운전 중에 전압, 열, 기계력 및 환경의 4종류의 열화요인(열화스트레스)이 가해진다.

이와 같이 건식변압기의 열화원인은 다양하게 존재하지만 특히 절연에 사용되는 절연물은 열적인 스트레스에 민감하여 사용온도 이하에서 운전되어야 한다. 건식변압기는 사용되기 전 열적인 특성에 대하여 충분한 성능검증시험을 거친 후 사용된다. 그러나 이러한 시험은 권선의 평균적인 권선온도를 측정하고 있기 때문에 변압기 내에서 실제 가장 높은 온도를 알 수는 없다. 또한 일반적으로 건식변압기는 불연성을 목적으로 옥내나 선박 내부에서 주로 사용되고 있기 때문에 주위온도가 높은 온도에서 사용될 수 있다. 그러므로 건식변압기의 온도분포를 분석하여 온도상승정도를 분석하는 연구는 건식변압기의 열열화 방지나 고장을 예방하기 위하여 매우 중요하다.

본 연구에서는 실제 사용중인 건식변압기의 두가지 부하율에 대하여 온도상승시험을 실시하여 온도분포 특성을 조사 분석하였다. 온도는 열전대센서와 열화상카메라로서 측정되었으며, 두 온도를 비교하여 최고 온도지점과 상승할 수 있는 최고 온도를 계산하였다.

2. 본 론

2.1 절연물의 온도등급 분류 및 온도관련 용어의 정의

전력기기의 절연에 사용되는 절연물은 열적인 스트레스에 민감하여 사용온도 이하에서 운전되어야 한다. 그

또한 변압기 온도시험에서 자주 사용되는 각종 온도정보량의 정의를 다음과 같이 지도하였다.

2.1.1 평균 권선온도의 결정

평균 권선 온도는 실제 운전 중에는 측정될 수 없지만 도체의 재질이 동(copper)일 경우에 식(1)과 같이 정의되고 있다.

$$Q_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + Q_1) - 235 \text{ -----(1)}$$

Q_2 : 평균 권선온도

R_2 : 정격 부하에서의 권선저항

Q_1 : 주위온도

R_1 : 주위온도에서의 권선저항

2.1.2 권선의 최고점(Hot Test Spot)온도

가장 온도가 높은 권선층(layer)를 권선의 최고점이라 부르고 그 온도는 권선 최상부의 평균온도보다 높은 것으로 알려져 있다. 권선의 최고점 온도는 권선의 평균온도와 마찬가지로 운전중에 직접 측정할 수 없기 때문에 실제의 전력용 변압기에서는 부하전류에 비례하여 가열되는 가열저항이 들어있는 권선 온도계를 절연유의 상부에 설치하여 권선의 최고점 온도를 간접적으로 측정하고 있으나 최고점 온도는 변압기의 구조에 따라 차이를 보이기 때문에 이러한 권선 온도계에 의한 최고점 온도 측정은 정확한 값으로는 볼 수 없다.

2.2 건식변압기의 열화

건식변압기의 열화는 권선의 절연에서 일어나며 권선 절연특성에 크게 좌우된다. 건식변압기 권선의 절연시스템은 내부의 도체와 이를 둘러싸는 고체절연체 및 에폭시 수지의 절연체에 의해 이루어지고 있다. 일반적으로 이러한 건식변압기의 권선은 사용 중에 상시 운전시의 전압과 뇌 전압, 침입 서지 등 전기적 스트레스를 받는다. 또한 절연시스템은 일반적으로 전기 절연뿐만 아니라, 기계적 구조물로서의 기능도 포함하고 있는 것으로 기계적 지지에 의한 응력 단락시의 전자력 및 온도변화

에 의한 열응력 등의 기계적 스트레스를 받는다. 또한 절연시스템은 기기의 종류 등에 의해서 그 상황이 다르지만 습기와 오염 혹은 약품, 특수 분위기 등의 여러 절연열화 요인이 된다. 이상과 같이 건식변압기에는 운전중에 전압, 열, 기계력 및 환경의 4종류의 열화요인(열화스트레스)이 가해진다. 다음 표는 건식 변압기의 파괴모드와 열화관계를 나타낸 것이다.

표 2 건식변압기의 파괴모드와 열화스트레스 관계

열화 요인 \ 파괴 모드	권선의 트래킹 열화	권선의 부분방전 열화	단자부 코래열화	권선부의 관통절연 파괴	권선 및 지지재 표의 섬락 파괴	금구의 전식, 부식열화
온도						
습도						
오존						
진동						
전기적 스트레스						
기계적 스트레스						
열적 스트레스						

○:영향 큼 ◐:영향 비교적 큼 ◑:영향 작음

표 2에서 알 수 있듯이 열화원인중 굵은 필체로 표시한 온도와 열적스트레스는 대부분의 파괴모드에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 그러므로 건식변압기에서 온도는 수명에 가장 많은 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

2.3 온도상승실험

2.3.1 변압기 온도상승시험

변압기의 온도는 주로 부하전류에 의하여 권선에서 발생하는 동손(무하손)과 여자전류에 의하여 철심에서 발생하는 철손(무부하손)에 의하여 상승한다. 이와 같은 변압기의 온도특성시험은 실부하법(actual loading method)과 모의 부하법(simulated method)이 있으며, 모의 부하법에는 단락법(short circuit method)과 반환부하법(loading back method)이 있다. 실부하법은 어떤 방법보다 정확한 값을 얻을 수 있으나, 시험설비의 용량이 커지기 때문에 제작상 경제적인 어려움이 있다. 모의 부하법중 단락법은 2차측(저압측)을 단락시키고 1차측(고압측)에 보조변압기를 통하여 전류를 조정하면서 동손을 공급하는 방식으로서 철손이 발생하지 않는 단점이 있으나, 권선에 정격전압이 인가되지 않으므로 비교적 안정되고 쉽게 온도를 측정할 수 있다. 반환부하법은 용량이 같은 2대의 시료변압기 1, 2차측을 병렬로 하여 2차측에 정격전압을 인가하여 철손을 공급하고 1차측은 보조변압기로서 전류를 공급하여 동손을 발생시키는 방법이다. 실 부하 모의는 반환부하법이 적합하나, 고압측 온도측정점의 전위가 높아 센서 부착에 전압유도와 절연문제가 발생한다. 그러므로 온도의 정확한 모의는 반환부하법이 적합하나 본 연구에서는 시료변압기가 1대 밖에 없으므로 다음 그림과 같은 단락법을 이용하여 온도상승시험을 하도록 하였다. 온도상승에 사용된 부하율은 100%와 130%로 하였다.

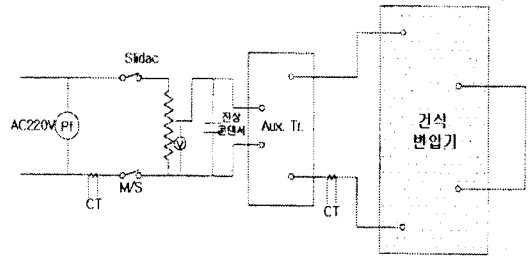


그림 1 단란시험회로

2.3.2 온도측정센서의 설치

사용된 온도센서는 직경이 약 1mm, 길이 4m 정도로서 권선에 바로 취부할 경우 취부가 어려울 뿐 만 아니라 제작시 취부점에서 이탈될 우려가 있고, 또한 도체에 직접 접촉되면 큰 전압이 유기되어 온도측정설비에 전기적 절연상의 문제점을 일으킬 우려가 있으므로 그림 3.13과 같이 열 전도성이 양호하고 절연 특성이 좋은 두께 50 μ m인 KEPTON 절연필름 위에 올려 놓고 EPOXY 수지로서 몰드하여 사용하였다.

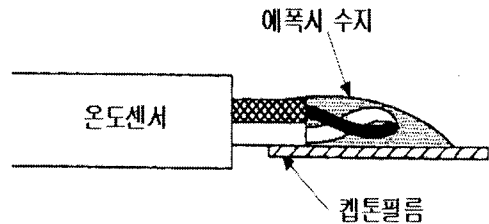


그림 2 온도센서제작방법

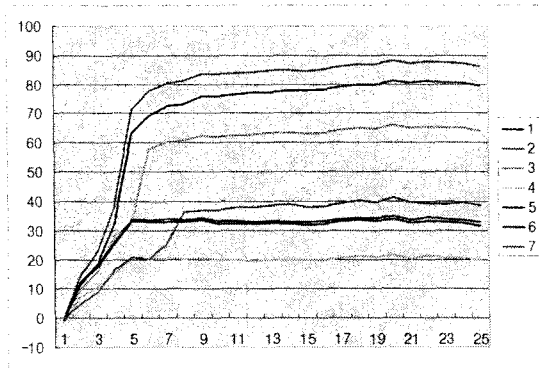
권선의 정확한 온도를 측정하기 위해서는 권선과 온도센서가 직접 접촉되어야 하지만 이미 제작된 건식변압기에 온도센서를 설치해야 하기 때문에 직접 접촉시킬 수는 없었다. 따라서 온도센서의 측정점과 권선이 가능한 밀착되기 위하여 마찰 때문에 냉각통로로 잘 들어가지 않을 때까지 나무젓가락을 겹쳐서 냉각통로로 밀어 넣었다. 온도 측정 점 위치는 아래와 같다.

온도 측정 점 위치 :

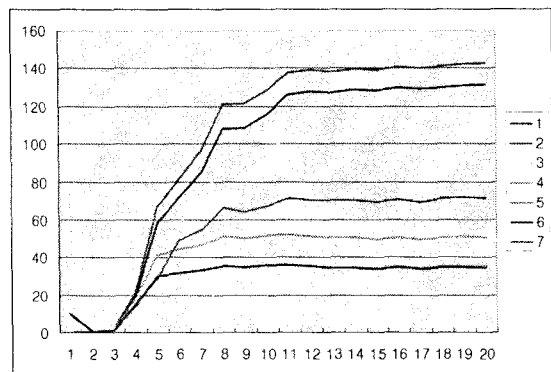
- S상 고압권선 덕트내 상부 3개소(권선 최상단에서 10cm 아래쪽)
- S상 고압권선 덕트내 하부 3개소(권선 최하단에서 10cm 위쪽)
- S상 권선 중간지점 표면
- 기중
- 총 8개소

2.4 실험결과

부하율 100%와 130%에서 온도측정결과와 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있듯이 가장 높은 측정점은 고압권선 가운데 층의 상부 위치인 것으로 나타났으며 100%부하에서 최대 102 $^{\circ}$ C인 것으로 나타났으며, 실제 변압기의 사용은 밀폐된 공간에서 사용하기 때문에 규정온도 이하에서 사용될 수 있도록 주위 온도의 고려가 필요하다. 130%의 부하율에서는 최대 160 $^{\circ}$ C까지 온도가 상승했으므로 H중 절연물의 경우 거의 여유가 없는 것으로 나타났다.



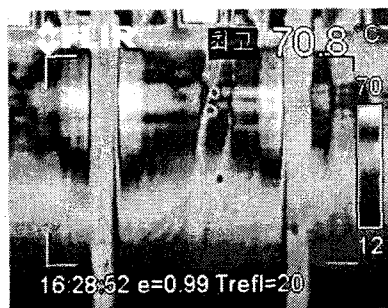
(a)100%



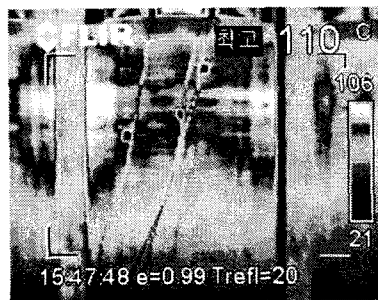
(b)130%

그림 3 부하인가시간대 온도상승특성

온도센서에 의한 온도측정과 병행하여 열화상카메라를 이용하여 변압기 표면의 온도분포를 측정하였다. 그림 8은 각 부하율에서 온도가 포화되었을 때 측정된 표면온도분포이다. 그림에서 흰색으로 나타나있는 부분이 온도가 가장 높은 부분으로서 가운데 상의 경우 두상이 겹치는 상부층의 온도가 약 70℃정도로 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 권선표면의 온도센서로(7번) 측정된 것보다 약 16℃정도 높은 것으로 나타났다. 그러므로 변압기에서 온도가 가장 높은 부분을 상이 겹치는 부분의 고압 권선 가운데층이라고 할 때 이 부분의 온도는 100%온도분포시험에서 측정된 상부 가운데층 온도(2번)보다 16℃ 높다고 했을 때 약 118℃ 정도가 된다. 그러므로 100% 부하율에서 건식변압기는 H중 규정한계온도 이하에서 사용된다고 할 수 있지만 주위온도가 30℃일 경우 140℃까지 온도가 상승할 수 있다. 이러한 상인접부분에서의 표면 온도와 그 외의 표면온도와의 차는 부하율이 증가할수록 커지는 것으로 나타났으며, 부하율이 130%에서는 사용한계온도 이상까지 상승할 수 있다.



(a)100% 부하



(b)130% 부하

그림 4 열화상 측정결과

3. 결 론

실제 사용중인 건식변압기에 대하여 단락법에 의한 온도상승 시험을 실시하였으며 그 때 온도센서와 열화상 카메라로서 측정된 온도분포분포를 분석하였다. 분석결과 두 상이 겹치는 부분의 상부에서 가장 온도가 높은 것으로 나타났다. 부하율에 따른 온도특성시험에서 온도 측정지만 고려할 때 100%부하율에서는 변압기의 열적응을 만족시키는 것으로 나타났지만 본 연구시험은 철손을 고려하지 않았으며, 온도측정정도 권선과 직접 접촉하지 않았고 또한 육내의 사용환경에 따른 온도특성을 고려하지 않았기 때문에 정확한 온도분포 특성을 고찰하기 위해서는 이러한 점을 고려하여 온도분포시험이 실시되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pierce, L.W., "Thermal considerations in specifying dry type transformers", Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 30, Issue 4, July-Aug. 1994 Page(s):1090-1098
- [2] IEEE standard test code for dry-type distribution and power transformers IEEE Std C57.12.91 2001 9 March 2001
- [3] IEC 261-2, "Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials", 1990-06