

변압기 온도상승시험에 관한 고찰

노창일, 김선구, 정흥수, 김원만, 이동준, 김선호, 김지환
한국전기연구원

The study of the temperature rise test of power transformers

Chang-il Roh, Sun-Koo Kim, Heung-Soo Jung, Won-Man Kim, Dong-Jun Lee, Sun-Ho Kim, Ji-hwan Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 변압기 절연 열화의 주 원인 중 하나인 운전 온도에 대한 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 IEC 60076 및 ANSI C 57.12 중 온도 상승 관한 시험 규격을 고찰하여 각 규격별 변압기의 구분 및 온도 상승 한도의 규격치를 비교 기술 하였고, 모의부하의 인가 방법 중 등가 부하 인가 방법, 오일 온도 및 평균 권선 온도의 측정시험 방법 등에 대하여 논하였다.

1. 서 론

최근의 전력기기는 증가하고 있는 전력사용량을 감당하기 위해 대용량화 되어가고 있으나, 변전소 부지확보의 어려움, 토목공사 비용절감 등의 이유로 외형은 소형화 되어가는 추세이다. 이에 따라 변압기도 용량은 커지고 있으나 크기와 무게는 감소하고 있다. 이로 인하여 변압기 운전시 단위 체적당 발열량은 증가하고 있어, 변압기의 열적 특성을 파악하는 것이 설계에 있어 중요한 부분을 차지한다. 변압기에 사용되는 절연물의 수명은 전기적인 스트레스 및 열적인 스트레스에 크게 의존하며, 열적 스트레스는 사용 중 온도변화에 의한 열응력과 사용시간 및 온도에 의한 열화로 구분할 수 있다. 특히 사용온도가 높아질수록 절연물의 열화는 가속되어 수명은 더욱 짧아지게 된다. 이와 같은 열적 특성의 중요성에 따라 IEC 60076 및 ANSI C 57.12 규격에서는 변압기 개발 시험(Type or Design Test)항목으로 "온도 상승 시험(Temperature rise test)"을 하도록 규정하였다. 이에 본 논문에서는 변압기 온도 상승 한도 및 시험 방법 등에 관해서 IEC 와 ANSI 규격을 비교 고찰하여 보았다.

2. 본 론

2.1 온도 상승 개요

변압기를 운전하게 되면 부하전류의 크기와 관련 없는 무부하 손실과 부하전류에 관계되는 부하손실이 발생하게 된다. 무부하 손실은 철심의 자화 특성과 관련된 히스테리시스손(Hysteresis loss) 및 철심에 전압이 유기되어 발생한 와전류에 의한 와전류손(Eddy current loss)으로 구분할 수 있으며 대부분이 히스테리시스 손 즉 철손이다. 한편 부하손실은 부하전류에 의해 권선에서 발생하는 저항손 즉 동손이 대부분이다. 이러한 손실에 의해 철심 및 권선이 발열하게 되고 절연유 혹은 절연물을 통하여 외부 냉각매질로 방사, 대류 등에 의하여 방열하게 된다. 이때 외부 냉각매질과 변압기 온도와의 차이를 변압기의 온도 상승이라고 하며, 유입변압기의 경우는 절연유 및 권선의 온도 상승 한도를, 건식(Dry type)변압기는 권선의 온도 상승한도를 각 규격에서 제한하고 있기 때문에 이를 고려하여 설계, 제작되어야 한다.

2.2 시험 규격

온도상승 시험에 대해서 유입식 변압기는 IEC 60076-2와 ANSI C 57.12.00 및 C 57.12.90, 건식변압기의 경우는 IEC 60076-11과 ANSI C 57.12.01 및 C 57.12.91 규격을 기준으로 고찰하여 본다.

2.2.1 냉각방식에 따른 구분

변압기는 냉각 방식 즉, 냉각 매체 및 이의 순환 방식의 조합에 따라 구분되며 그 표시를 명판에 기재하여야 한다. 유입식 변압기는 하기와 같은 4문자 코드로 구분한다.

- 첫 번째 문자 : 권선과 접촉하는 내부 냉각 매체
 O : 발화점이 300℃이하인 광유 또는 합성 절연유
 K : 발화점이 300℃보다 낮은 절연유
 L : 발화점이 측정 불가능한 절연유
- 두 번째 문자 : 내부 냉각 매체의 순환 방식
 N : 권선 및 냉각 장비가 자연 대류 순환
 F : 냉각 장비는 강제 순환, 권선은 자연 대류 순환
 D : 냉각 장비에서 권선으로 순환하는 강제 순환

- 세 번째 문자 : 외부 냉각 매체
 A : 공기
 W : 물

- 네 번째 문자 : 외부 냉각 매체의 순환 방식
 N : 자연 대류
 F : 강제 순환

건식변압기는 IEC 및 ANSI 규격에 따라 <표 1>과 같이 구분할 수 있다.

<표 1> 건식변압기의 구분

구분	IEC 60076	ANSI C 57.12
Ventilated self-cooled	AN	AA
Ventilated forced-air-cooled	AF	AFA
Ventilated self-cooled/ forced-air-cooled	AN/FA	AA/FA
Nonventilated self-cooled	-	ANV
Sealed self-cooled	-	GA

2.2.2 온도 상승 한도

<표 2>와 같이 IEC 및 ANSI 규격에서는 변압기의 온도 상승 한도를 규정하고 있다.

<표 2> 온도 상승 한도

구분		온도 상승 한도(K)	
		IEC 60076	ANSI C 57.12
유입식 변압기	권선	ON, OF	65
		OD	70
	절연유(O)	60	65
건식 변압기	권선	105℃ 절연	-
		120℃ 절연	-
		130℃ 절연	80
		150℃ 절연	90
		155℃ 절연	-
		180℃ 절연	115
		200℃ 절연	130
220℃ 절연	150		

2.3 시험 방법

2.3.1 온도 측정

<표 3>과 같이 주위 온도, 즉 외부 냉각매질의 온도를 측정한다.

<표 3> 냉각매질 온도 측정

구분	온도범위	측정위치	비고
공냉식	10~40℃	피시폼으로부터 1~2m 위치 피시폼 높이의 1/2 지점	3 point
수냉식	20~30℃	냉각수의 흡입부	

변압기내에서의 온도는 <표 4>와 같이 측정한다. 원칙적으로 평균 오일 온도는 변압기내부의 오일의 평균 온도이어야 하나, 시험평가 상 일반적으로 평균 오일 온도는 상부 및 하부 오일 온도를 평균한 값으로 결정한다. 하지만 하부 오일 온도를 직접 측정 불가능한 경우는 방열기의 상부(혹은 입구) 및 하부(혹은 출구) 표면의 온도의 온도를 측정하여 평균

오일 온도를 하기와 같이 구할 수 있다.

〈표 4〉 변압기 온도 측정

구분	측정위치		비고
유입식	상부오일	상부로부터 약 50mm 지점	
	하부오일	방열기 상부(입구) 및 하부(출구) 외표면	직접측정 불가시
건식	Ventilated type	철심 상부 중앙 및 2차 권심 내부 상부 측	3상의 경우 2차권심 중간상
	Sealed type	외함 상부 중앙 및 측면	

$$T_{AVG} = T_{T.O.} - \frac{(T_{T.R.} - T_{B.R.})}{2}$$

여기서, T_{AVG} : 평균 오일 온도
 $T_{T.O.}$: 상부 오일 온도
 $T_{T.R.}$: 방열기 상부 표면 온도
 $T_{B.R.}$: 방열기 하부 표면 온도

2.3.2. 부하 인가 방법

변압기 온도 상승 시험을 위한 부하 인가 방법은 실 부하법(Actual loading method)와 모의 부하법(Simulated loading method)이 있으며, 모의 부하법에는 반환 부하법>Loading back method)과 등가부하법(Equivalent loading method)가 있다. 실 부하법은 가장 정확한 방법이지만 대용량의 변압기를 시험하기 위해서는 시험 설비의 용량이 커져야 하므로 제작상 어려움이 있다. 모의 부하법 중 반환 부하법은 동일한 용량의 변압기 2대를 병렬로 연결하고 그 중 1대를 시험 하는 방법이다. 2차측에 정격 전압을 인가하여 철손을 인가하고, 1차측에는 정격전류를 공급하여 동손을 인가하는 방법이다. 실 부하의 모의는 반환부하법이 적절하나 1차측의 고전압으로 인한 센서에 유기전압 발생 등 측정상의 어려움이 있으므로, 주로 등가부하법을 이용하여 온도상승 시험을 실시한다.

2.3.2.1. 유입식 변압기

등가부하에 의한 유입식 변압기의 부하인가 방법은 단락법(short-circuited test)라고 할 수 있으며, 2차측을 단락한 다음 사전 개별 측정에 의한 철손과 동손을 합한 총 손실에 해당하는 전류를 1차측에 인가한다. 총 손실의 인가시 정상상태(상부 오일 온도 상승률이 시간당 1K 이하로 떨어진 상태에서 3시간동안 유지 될 때)에서 평균 오일 온도를 결정한다. 권선 저항 측정을 위해 정격전류를 1시간 동안 공급한다.

2.3.2.2. 건식 변압기

등가부하에 의한 건식 변압기의 부하 인가 방법은 단락법과 개방법(open circuit test) 즉, 동손부하와 철손부하를 인가하는 두 가지 방법으로 실시한다. 동손부하는 2차측을 단락하고 고압측에 정격전류만을 정상상태에 도달할 때까지 인가하며, 철손부하는 1차측을 개방하고 2차측에 정격전압을 온도가 정상상태에 도달 할 때까지 인가한다.

2.3.3. 권선 온도 상승 측정

변압기 권선의 저항은 빠른 시간 내에 측정하여 전원 차단시의 권선의 저항을 추정하는 방법으로 채택하고 있으며, 직류 전원을 사용하여 저항이 안정된 후 5~6point를 측정하여 외삽법에 의하여 추정한다. 권선의 온도는 저항법에 의하여 산출한다.

2.3.3.1. 유입식 변압기

단락법에 의한 부하 인가 후 정상상태에서 평균 오일 온도 및 평균 오일 온도 상승 값을 구한 다음, 정격전압 인가 후 권선의 저항을 측정하여 외삽법에 의해 차단시의 권선 저항을 추정하고 하기의 식과 같은 저항법에 따라 변압기의 평균 권선온도를 결정한다.

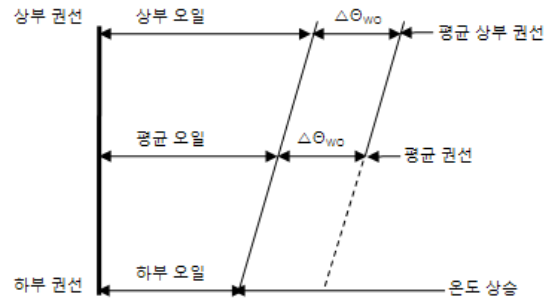
$$\text{평균 권선 온도 } t_2 = \frac{R_2}{R_1} \times (k + t_1) - k$$

여기서, t_1 : 시험시작 전 권선의 온도(주위온도)
 R_1 : 최초 t_1 에서의 측정된 권선의 저항
 R_2 : 온도상승 시험 후 추정된 권선의 저항
 k : 상수(동 : 235, 알루미늄 : 225)

변압기 권선 온도 상승 값은 <그림 1>과 같은 온도 분포 모델을 이용하여 하기의 식과 같이 정리 할 수 있다.

$$\text{권선온도 상승 값} = \Delta \Theta_{WO} + \text{평균 오일 온도 상승}$$

여기서, $\Delta \Theta_{WO}$ = 평균 권선 온도 - 평균 오일 온도



〈그림 1〉 온도 분포 모델

2.3.3.2. 건식 변압기

부하 인가 후 권선 저항의 측정, 차단시의 권선저항 추정 방법 및 각 부하시 평균 권선온도의 결정 방법은 유입식 변압기와 동일하며, 각 동손부하와 철손부하에 대한 평균 권선온도를 구한 후 하기의 식으로 총 권선온도 상승 값을 구한다.

$$\text{총 권선 온도 상승 값 } T_t = T_c \left[\left(1 + \frac{T_e}{T_c} \right)^{1.25} \right]^{0.8}$$

여기서, T_c : 동손부하시 평균 권선 온도
 T_e : 철손부하시 평균 권선 온도

2.3.4. 온도 보정

부하인가시 규정된 전류와 인가된 전류의 차이가 있는 경우 다음의 식으로 측정 및 계산 온도를 보정하여야 한다.

$$T_c = T_o \left(\frac{\text{Rated current}}{\text{Tested current}} \right)^{2m}$$

여기서, T_c : 보정된 온도
 T_o : 측정된 온도
 m : ON, OF 의 경우 0.8, OD 의 경우 1.0

3. 결 론

변압기의 수명은 절연물의 열화에 의해 결정된다. 따라서 IEC, 및 ANSI 등의 규격에서는 온도 상승한도를 규정하고 있으며, 설계 제작시 절연유 및 권선의 온도 상승 한도를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 IEC60076 및 ANSI C 57.12 규격의 시험방법에 대하여 고찰하여 보았다. 온도 상승 시험을 위한 부하 인가 방법 중 등가 부하법을 이용한 유입식 변압기의 온도 상승 측정 방법과 건식 변압기의 온도 상승 측정 방법에 대하여 기술하였다. 등가 부하법에서 부하 차단시의 권선저항의 추정은 IEC 60076-2 Annex C에 따른 외삽법을 사용하며, 평균 권선 온도는 저항법에 의하여 결정한다. 규정전류와 시험 전류가 차이가 있는 경우는 보정식에 의해 온도 보정을 실시하여 최종 상승 온도를 구하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 60076-2, "Power Transformers Part 2: Temperature rise", Ed.2-1993-04
- [2] IEC 60076-11, "Power Transformers Part 11: Dry-type Transformers", Ed.1-2004-05
- [3] IEEE Std C57.12.00 "IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", 2006
- [4] IEEE Std C57.12.90 "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", 2006
- [5] IEEE Std C57.12.01 "IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those with Solid-Cast and/or Resin Encapsulated Windings", 2005
- [6] IEEE Std C57.12.91 "IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers", 2001