

건식변압기 코일의 열적 수명평가

김민규, 허대행, 김익수, 장진영*, 문병철*, 고재철*
한국전기연구원, (주)효성*

Thermal Lifetime Estimation of Coil Used for Dry-type Transformer

M. K. Kim, D. H. Huh, I. S. Kim, J. Y. Jang*, B. C. Moon*, J. C. Go*
Korea Electrotechnology Research Institute, HYOSUNG*

Abstract - This paper describes a method to estimate the thermal lifetime of coil used in the dry-type molded transformer which is widely used in the domestic distribution system. In order to reduce the testing time, temperature accelerated aging test is planned. Finally, the thermal lifetime estimation method is composed of a temperature aging test and a cyclic test of temperature, humidity and lightning impulse voltage withstand test.

1. 서 론

오늘날 생활수준의 향상 및 정보통신과 컴퓨터 기술의 발달로 전기기기가 첨단화 되어 전력수요가 급격하게 증가하는 추세이며, 변압기 고장으로 인한 사고 발생시 전력공급중단으로 국민경제의 피해는 물론 산업전반에 큰 장애를 초래하며 피해복구에 많은 시간과 비용이 소요되고 있다.

건식몰드 변압기란 코일을 몰드 재료로써 전체를 성형한 고체 절연방식의 변압기이다. 몰드 변압기는 20여년의 사용 실적을 가지고 있으며, 난연성이 우수하며 제품의 크기를 Compact화 할 수 있다는 측면에서 옥내용 변압기로서 그 수요는 증가하고 있는 실정이다. 변압기의 코일을 절연하는 몰드재료는 내열성, 기계적 강도, 내 크랙성 등이 우수한 에폭시 수지가 주로 사용되어 왔다. 그러나, 비스페놀계의 에폭시 수지는 내후성이 뒤떨어지기 때문에, 종래의 몰드 변압기는 옥내용으로 한정되고 있었으나, 현재 몰드 변압기의 뛰어난 특성을 살리기 위한 옥외 적용에의 기술개발이 강하게 요구되고 있는 가운데, 최근에는 내후성이 뛰어난 새로운 에폭시 수지의 개발이 진행되어 왔다.

본 연구에서는 건식몰드변압기 장기신뢰성을 확보할 수 있는 방안으로 코일의 수명을 예측할 수 있는 신뢰성평가를 통해 에폭시절연물의 재료특성 및 건식몰드변압기의 품질을 평가하고 신뢰성을 보증하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 건식변압기 열화

변압기의 경년열화는 사용상태, 설치환경 및 사용 년 수 등에 따라 여러 요인이 복잡하게 영향을 미쳐서 진전해 나가는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 요인을 정리하면, ①전기적요인, ②열적요인, ③환경요인, ④기계적요인, ⑤화학적요인, ⑥기타 등으로 분류된다. 표 1에 건식변압기 코일 및 절연부위의 열화 요인 및 열화형태에 따른 장해현상을 분류하였다.

<표 1> 건식변압기의 열화현상

부분	주열화요인	열화형태	장해현상
권선	과전류	변형	<ul style="list-style-type: none"> 전기적특성 변화 단선 온도상승 고착→운전저지
		권선단락	
도체절연부	열	열분해 파손	<ul style="list-style-type: none"> 박리발생→내부절연파괴→단선 절연저항저하→부분방전→실락
권선절연부	환경	오손, 흡습	
철심절연부	과전압	절연파괴	

건식변압기 권선을 구성하는 주요부분 코일과 에폭시절연부의 주 열화요인은 과전류, 과전압, 환경 및 열로서 열화 메커니즘은 권선의 변형, 오손 및 흡습, 열분해이며 장해현상인 고장모드로서는 단선, 온도상승, 절연부의 박리발생으로 인한 내부 절연파괴가 발생한다.

표 1에서 언급된 고장메커니즘(열화형태) 및 고장모드(장해현상)를 고려한 건식변압기 코일의 수명평가는 코일과 절연부의 열적 열화시험과 환경 시험, 절연시험을 조합한 평가방법을 통해 장기수명을 예측하고 검증하는 방법이 국제규격인 IEEE Std C57.12.60 및 신뢰성평가 기준 RS C 0018에 명시되어 있다.

2.2 수명평가 방법

그림 2의 실물크기 변압기 코일을 시험하고 만드는데 많은 비용이 들기 때문에 그림 3과 같이 절연시스템의 대표모델 시료를 평가에 이용한다. 변압기 절연수명에 대한 열적열화 효과를 정확하게 평가하기 위해서 대표 모델코일은 열화후 코일의 수명을 결정하기 위한 절연시험 즉 냉열 및 습윤시험후 뇌충격전압(1.2×50 μs) 또는 ac 내전압 시험을 모의할 수 있는 구조로 되어야 한다.

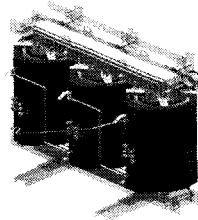
시험절차는 초기신뢰시험을 통과한 시험 샘플에 대하여 시험주기를 반복하는 것이다. 각 시험주기는 다음과 같이 구성되며 순차적으로 실시한다.

- 가) 온도 가속열화시험
표 2에 나타난 열화온도에 맞추어 고온의 열화시험용 챔버에서 각 온도별 1주기당 시험시간동안 열화를 시킨다.
- 나) 냉열충격시험
열화후 실온으로 냉각후 온도조절 항온챔버에서 -30℃로 저온 냉각 후 실온으로 안정화시킨후 습윤시험을 실시한다.
- 다) 습윤상태의 조성
습윤시험은 25℃ ~ 40℃온도에서 상대습도 90%이상의 조건에서 48시간 이상 유지한다.
- 라) 습윤상태에서 절연시험
습윤시험 후 2시간에 뇌충격전압 또는 ac 전압으로 코일의 층간 및 턴간에 대한 내전압시험을 실시한다.

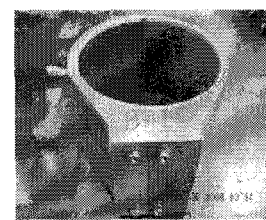
건식몰드 변압기에 대한 수명예측을 위한 가속시험은 모델시료 36개를 사용한다. 모델시료 12개씩 3개 그룹으로 나누어 변압기 최고 허용온도보다 높은 3 수준 (또는 그 이상)의 온도에서 가속열화시험을 실시한다. 시험온도와 한 주기 평가시간은 표 2에 나타난 바와 같으며, 재료 특성 등을 고려하여 변경될 수 있다.

<표 2> 가속열화온도와 시험시간

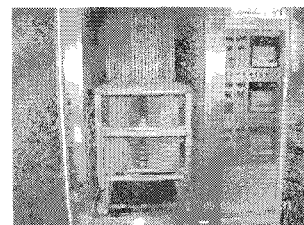
1 주기 시험시간 (h)	건식변압기 운전중 최고 허용온도 (℃)					
	105℃ 절연물	120℃ 절연물	130℃ 절연물	155℃ 절연물	180℃ 절연물	250℃ 절연물
300	135	150	165	200	220	275
100	150	170	180	220	240	300
35	165	185	200	240	270	325



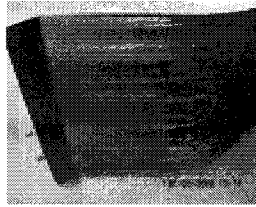
<그림 2> 실규모 건식변압기



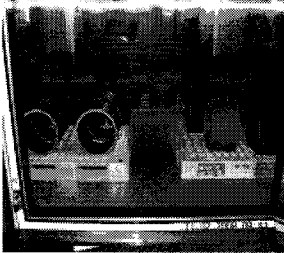
<그림 3> 모델 코일



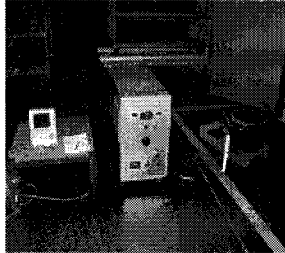
<그림 4> 고온 가속열화시험



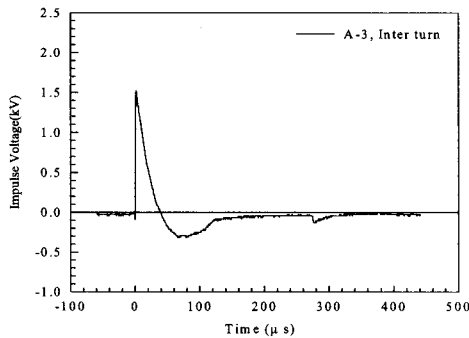
〈그림 5〉 고온가속열화후 표면 크랙



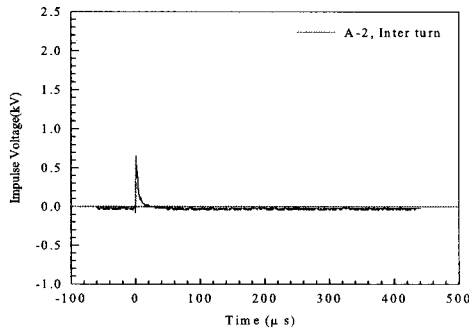
〈그림 6〉 냉열습윤시험



〈그림 7〉 뇌충격내전압시험



〈그림 8〉 냉열 습윤시험후 뇌충격내전압시험에서 건전한 코일



〈그림 9〉 냉열 습윤시험후 뇌충격내전압시험에서 이상발생 코일

2.3 신뢰성데이터 분석

열적 스트레스를 이용한 온도 가속수명시험법을 적용하는 경우에는 널리 알려진 아레니우스 모형을 이용하게 된다. 아레니우스 식은 온도함수로 표현되는 화학반응의 속도론에서 유도되어 절연물의 수명과 온도 사이의 관계를 근사적으로 다음과 같이 표현한다.

$$k = D \exp(-E/RT)$$

여기서, k 는 반응속도, E 는 반응의 활성화 에너지(고장메커니즘에 따라 다름. 단위는 eV(electron volt)), R 은 Boltzmann 기체상수(= $8.617 \times 10^{-5} eV/K$), T 는 Kelvin 절대온도(= 섭씨온도(°C) + 273.16), D 는 빈도 요소(제품의 특성이나 시험조건에 따른 특성치)로 절연물의 화학적 열화를 일으키는 분자 반응의 충돌수에 의존한다. 따라서 절연물의 메디안 수명은 화학반응 속도에 반비례하는 것으로 가정할 수 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\ln(L) = constant + ((E/RT)/2.303)$$

이러한 아레니우스 식은 다음과 같은 기하학적인 형태로 표현될 수 있다.

$$M(X) = A + BX$$

여기서, $M(X)$ 는 $\ln(L)$ = 평균로그 수명, $X = 1/T$ 이다.

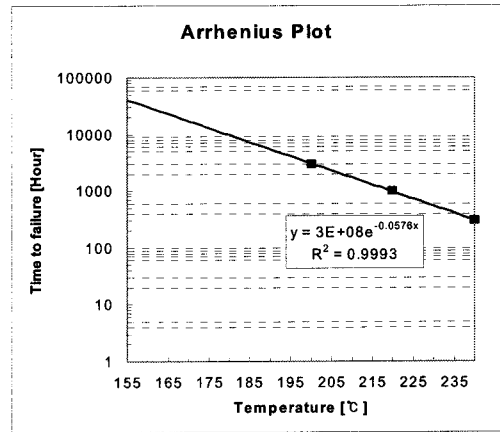
3가지 가속된 온도 스트레스 수준에서 시험을 실시하는 경우, 일반적으로 일정수의 시료가 고장이 발생할 때까지 시험을 실시하여 정수중단 자료를 얻든지 또는 일정시간까지 시험을 실시하여 고장이 발생하지 않으면 규정된 기준에서 제시된 보증 수명을 만족하는 것으로 판정하는 정시중단 시험을 실시하는 방법이 있다. 그러나 신뢰성평가기준에서는 시료가 고장날

때까지 시험을 실시하여 획득한 수명자료를 아레니우스 그래프를 이용하여 운전조건에서의 최대허용온도에서의 평균수명을 보증하는 방법을 따르고 있다.

고온 가속열화시험을 36개의 시료가 모두 고장날 때까지 실시한 후 얻어진 각 온도에서의 고장시간을 평균해서 다음과 같은 결과가 도출될 때 아레니우스 plot을 이용하여 절연물의 최고허용온도에서의 수명을 외삽법으로 추정할 수 있다. 일반적으로 아레니우스 plot을 이용한 방법은 그래프로 도식화하여 평균적인 수명, 즉 MTTF를 구하는데 용이하며, 보다 높은 정확한 신뢰도 검정을 위해서는 신뢰성분석 프로그램을 이용한 완전고장자료의 가속시험에서의 모수추정법을 이용하여 신뢰수준 90% 또는 95%에서 B_{10} 수명 등 percentile of lifetime을 추정할 수 있다.

〈표 3〉 고장자료 일례

시험온도[°C]	고장까지 평균시간[h]
200	3,000
220	1,000
240	300



〈그림 10〉 아레니우스 plot을 이용한 최고허용온도에서의 수명 예측

3. 결 론

본 논문에서는 건식변압기 코일의 열적 수명을 평가하는 방안에 대해서 서술하였다. 일반적으로 절연물의 열적평가방법에서 3수준 이상의 시험온도를 선정하는 것이 국제규격에서 명시한 조건으로서 각 온도에서 동일한 시료 수를 할당해서 시험을 실시하게 되어 있으나, 가속의 유효성이 인정되고 있다는 전제가 필요하다. 고온에서의 고장모드가 저온에서의 고장모드와 전혀 다르게 나타나는 경우에는 고온에서 얻어진 데이터의 유의성이 의심을 받을 수 있으므로 시험온도의 선정 및 시험시간의 변경이나 시험온도간 차이를 연구자가 시험계획 단계에서 유념할 필요가 있다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 지식경제부 기술표준원, "건식변압기 신뢰성평가기준 RS C 0018".
- [2] IEEE Std C57.12.60, "IEEE guide for test procedures for thermal evaluation of insulation systems for solid-cast and resin-encapsulated power and distribution transformers", 1998.
- [3] Linden W. Poerce, "Thermal consideration in specifying dry-type transformers", IEEE Trans. Industry Appl., Vol. 30, No. 4, pp1090, 1994.