

건식변압기 수명예측에 관한 연구

김민규, 이정기, 정주영, 김익수
한국전기연구원

A Study on the lifetime Expectation of Dry type Transformer

Min-Kyu Kim, Jeong-Gi Lee, Ju-Young Jeong and Ik-Soo Kim
KERI

Abstract - This paper describes a method of lifetime expectation for the dry-type molded transformer which is widely used in the domestic distribution system. And the result of the temperature accelerated aging test for the winding insulation and the analyzed report on the reliability are included in this study.

하면, ①전기적요인, ②열적요인, ③환경요인, ④기계적요인, ⑤화학적요인, ⑥기타 등으로 분류된다. 그림 1에 변압기의 열화특성 및 요인을 나타내고, 표 2에 건식변압기의 열화현상을 나타낸다.

1. 서 론

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, 피스페놀계의 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.

표 1에서 년도별 생산대수의 증가에서 볼 수 있듯이, 현대 사회의 대도시에서 환경적인 측면 및 사고 시 화재 및 폭발의 위험성에서 벗어나고자 몰드변압기를 요구함에 따라 그 수요가 최근 들어 더욱 증가하고 있음을 알 수 있다.

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

표 1. 제작년도별 국내 몰드변압기 생산 현황

분포수	제작년도											
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02
변압기 대수(대)	600	680	700	750	1,220	3,256	3,494	2,421	3,341	4,494	6,439	5,613
분포율(%)	2	2	2	2	4	10	11	7	10	14	19	17

2. 본 론

2.1 경년열화

변압기의 경년열화는 사용상태, 설치환경 및 사용 년수 등에 따라 여러 요인이 복잡하게 영향을 미쳐서 진전해 나가는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 요인을 정리

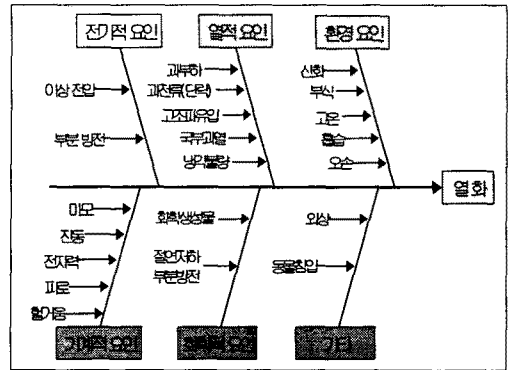


그림 1. 변압기의 열화특성 및 요인

표 2. 건식변압기의 열화현상

부분	주열화요인	열화형태	장해현상
취부기초부 (고무재료)	열	열분해	• 탄성저하→파손
	기계적응력	파손	
철심 및 체결부	진동	체결부 헐거움	• 철심의 이상진동 • 자기회로 단락 •バリ발생→내부절연파괴
	환경	부식	
	열	분해	
권선	과전류	변형	• 전기적특성 변화 • 단선
		권선단락 단선	
냉각 장치	필터	환경	• 온도상승 • 고착→운전정지
	팬	운전시간	
도체절연부 권선절연부 철심절연부	열	열분해 파손	•バリ발생→내부절연파괴→단선 • 절연저항저하→부분방전→섬락
	환경	오손, 흡습	
	과전압	절연파괴	

열화는 주로 열적, 기계적 요인에 기인한 절연물의 물성 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 건식변압기는 유입기기와 같이 절연유층의 일정한 환경 하에 있지 않고 설치장소의 분위기에 좌우되는 것이 많고, 절연표면이 직접 외기에 접해있어서 대기중의 수분이나 진에 등이 기기의 절연 냉각 성능의 유지에 크게 영향을 준다. 이와 같은 건식몰드변압기의 열화는 환경적 요인에 기인하는 절연물의 물성변화에 의한 것으로 볼 수 있다.

2.2 수명예측 방법.

건식물드 변압기에 대한 수명예측을 위한 가속시험은 실규모 변압기 2대, 모델시료 36개를 사용한다. 모델시료 12개씩 3개 그룹으로 나누어 변압기 최고 허용온도보다 높은 3 수준 (또는 그 이상)의 온도에서 그림 2와 같은 고온의 하온챔버를 이용하여 열화시험을 실시한다. 시험온도와 한 주기 평가시간은 표 3에 나타난 바와 같으며, 재료 특성 등을 고려하여 변경될 수 있다. 부분방전 시험과 단락 시험을 위해 적어도 2대의 실규모 변압기 시료를 제일 낮은 온도 수준에서 열화시험을 실시한다.

표 3. 온도와 시험시간

1 주기당 시험시간 (hrs)	건식변압기 운전중 최고 허용온도 또는 등가온도(°C)					
105	120	130	155	180	250	
300	135	152	165	200	220	275
100	150	167	180	218	240	300
35	165	185	200	240	270	325

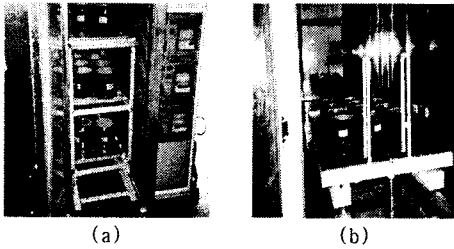


그림 2. 모델시료 온도가속열화(a) 및 냉열습윤시험(b)

열적 스트레스를 이용한 온도 가속수명시험법을 적용하는 경우에는 널리 알려진 아레니우스 모델을 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(고장 메커니즘에 따라 다름. 단위는 eV(electron volt)), R 은 Boltzmann 기체상수($=8.617 \times 10^{-5} eV/^{\circ}K$), T 는 Kelvin 절대온도(=섭씨온도($^{\circ}C$) + 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, $X = 1/T$, A 는 상수로 절연물의 모집단, 시료, 시험방법, 고장모드의 특성을 표현, B 는 $E/(2.303R)$ 이다. 이로부터 가속계수 A_f 는 다음과 같다.

$$A_f = \frac{L \text{ at } T_1}{L \text{ at } T_2} = \frac{A \cdot \exp(\frac{B}{T_1})}{B \cdot \exp(\frac{B}{T_2})} = \exp(B(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}))$$

흔히 수명 L 값으로 MTTF(Mean Time To Failure), T_{50} 등이 사용된다.

3가지 가속된 온도 스트레스 수준에서 시험을 실시하는 경우, 일반적으로 일정수의 시료가 고장이 발생할 때까지 시험을 실시하여 정수중단 자료를 얻든지 또는 일정시간 까지 시험을 실시하여 고장이 발생하지 않으면 규정된 기준에서 제시된 보증 수명을 만족하는 것으로 판정하는 정수중단 시험을 실시하는 방법이 있다. 그러나 신뢰성평가 기준에서는 시료가 고장날 때까지 시험을 실시하여 획득한 수명자료를 아레니우스 그래프를 이용하여 운전조건에서의 최대허용온도에서의 평균수명을 보증하는 방법을 따르고 있다.

2.3 수명예측 결과

현재까지의 시험에서 획득한 수명자료를 정리한 결과를 표 4에 나타낸다. 아레니우스 가속수명 모델을 이용하여 최우추정법으로 수명자료를 각각의 수명분포에 대해서 해석을 하였다.

표 4. 가속열화시험에서 획득한 수명자료

온도(°C)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
시험시간 (h)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
온도(°C)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
시험시간 (h)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
온도(°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
시험시간 (h)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

+ ; 고장발생 없음

2.3.1 대수정규분포 가정

고체 절연물에 대한 온도가속시험을 실시하여 절연물의 수명을 예측하는 방법에서는 절연물의 수명을 대수정규분포 또는 와이블 분포로 주로 가정하여 신뢰성해석을 실시하고 있다. 표 5에 대수정규분포를 가정했을 때 해석 결과를 나타내었다.

표 5. 대수정규분포를 가정한 Percentile

Percent	Temp.(°C)	Percentile (hrs)
10	130	50539
10	165	1800
10	180	504.7
10	200	105
50	130	50539
50	165	1800
50	180	504.7
50	200	105

표 5에서 보는 바와 같이 고장이 전혀 일어나지 않는 경우에 95 % 단측 신뢰구간의 하한값(90 % 양측 신뢰구간의 하한값과 거의 동일함)을 정확하게 예측하는 것은 곤란하다. 따라서 평균수명, 즉 50 % 백분위수(percentile of

50 %)와 10%가 고장이 일어나는 시간을 가리키는 B_{10} 수명이 동일한 결과를 가져왔다. 그러나 무고장 시험 데이터만을 가지고 예측한 전식물드변압기의 평균수명은 130 ℃ 절연물의 최고허용온도를 기준으로 할 때 50,539시간으로 나타났다.

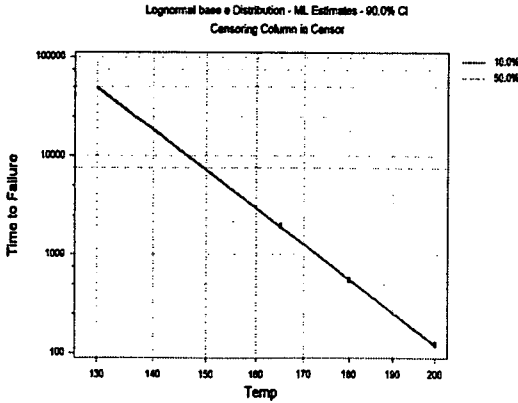


그림 3. 대수정규분포를 가정한 수명자료 해석

2.3.2 와이블 분포 가정

수명예측의 정확성을 높이기 위하여 대수정규분포가 아닌 일반적으로 절연물에 대한 신뢰성분석에서 많이 이용하는 와이블 분포를 가정하여 표 4의 수명자료를 활용하여 아래니우스 가속모델을 적용한 경우의 해석 결과를 표 6에 나타낸다.

표 6. 와이블 분포를 가정한 Percentile

Percent	Temp.($^{\circ}$ C)	Percentile(hrs)
10	130	49026
50	130	49821
90	130	50334

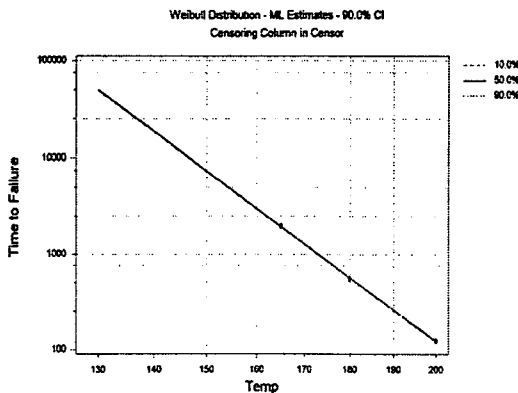


그림 4. 와이블 분포를 가정한 수명자료 해석

2.3.3 부하경감 운전 가정

일반적으로 실제통에서 운전되는 기기의 부하를 항상 100 %로 유지하면서 장기운전을 하는 경우는 없다. 따라서 실제 계통에서는 안전 및 예비율을 고려해서 운전을 하고 되므로, 일반적으로는 부하를 경감해서 운전을 하게 된다.

이러한 방법은 기기의 신뢰성확보 차원에서라도 기기 설계시 고려되는 요소가 된다. 절연물의 허용최고온도를 부하 100 %인 경우로 볼 때 실제 계통운전에서의 부하경감은 설치 및 운전조건에 따라 차이가 있어 일률적으로 정하기는 어렵지만, 부하 80 % 정도에서 운전된다고 볼 때 130 ℃ 절연물의 경우 약 80 ℃ 정도의 온도로 운전된다고 볼 수 있으며, 90 %정도에서는 105 ℃ 정도의 온도로 운전된다고 볼 수 있다. 이러한 조건에서 장기운전이 될 때 기대되는 예상수명을 대수정규분포, 와이블분포 및 지수분포를 가정하여 분석하였다. 이 경우에는 예측결과의 정확성을 높이기 위해 최악의 경우를 가정하여 다음 주기에서 모든 시료가 고장이 일어나는 조건으로 각각의 수명분포에서 해석한 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7. 부하경감 운전에 따른 Percentile의 변화

수명분포	운전온도 ($^{\circ}$ C)	10 % percentile (hrs)	95 % 단측신뢰구간 하한 (hrs)
대수정규	105	715784	699451
	110	406705	398107
	115	234477	229903
와이블	105	720465	710507
	110	409253	403947
	115	235884	233019
지수	80	720465	134003
	85	409253	81904
	90	235884	458923

3. 결 론

모델 시료 36개, 실규모변압기 2대를 제작하여 수명을 도출하기위한 온도 가속열화시험을 실시하고 신뢰성해석 프로그램을 활용한 통계적인 해석방법으로 수명예측을 실시한 결과 및 예측방법에 대해 살펴보았다. 현재까지의 수명자료가 완전자료가 아닌 관계로 정확한 수명의 예측은 불가하지만, 해석 프로그램으로 분석한 결과 실제 현장에서의 운전조건을 가정할 때 절연물에 대한 열적, 전기적 내구성의 장시간특성은 상당히 우수하며 충분한 설계수명이 유지될 수 있다고 생각되며, 향후 수명예측 결과를 검정하기 위한 지속적인 시험을 고려중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부 기술표준원, "전식변압기 RS C 0018", 신뢰성 평가기준, 2001
- [2] W. Nelson, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", Journal of Quality, Vol. 17, No. 3, pp140-146, 1985
- [3] 서순근, "MINITAB 신뢰성분석", (주) 이레테크, pp 219, 2002