

네온변압기의 신뢰도 모형과 분석 (Reliability Modeling and Analysis on the Luminous-Tube Transformers)

박태근, 정희석, 김정수, 김진선, 김도형, 이영주

(TaeKeun Park, HeeSuk Jeong, JeongSu Kim, JinSheon Kim, DoHyung Kim, YoungJoo Lee)

한국조명기술연구소, 121-883 서울시 마포구 합정동 355-24

abstract

네온변압기는 전기 제품의 일종이며, 사용 시간의 경과와 더불어 환경 조건 등 여러 가지 요인으로 서서히 그 성능이 열화하고 마침내 수명에 이르는 성질을 가지고 있다. 최근에는 에너지 절약용, 자원 절약용 등 환경 보호 입장에서 고효율화가 도모되고 있고, 내구성 증가, 소음 저감, 환경에의 적합 등 여러 가지 요구가 높아지고 있으나 확립된 수명 평가 이론은 정립되고 있지 않은 실정이다. 따라서 여기에서는 변압기의 수명 등을 평가할 수 있는 가속시험 방법에 대해서 논하기로 한다.

1. 서론

최근 옥외용 네온변압기(이하 변압기)는 에너지 절약용, 자원 절약용 등 환경 보호의 입장에서 고효율화가 도모되고 있고, 내구성 증가, 소음 저감, 환경에의 적합 등 여러 가지의 요구가 높아지고 있다. 또한 주로 철심 재료로 구성되어 있는 변압기는 네온관과 같은 회로에 사용하는 자기 누설 변압기이다. 최근 변압기의 시장에서 대부분을 차지하고 있는 자기식 변압기는 이미 네온사인 등과 같은 도입기부터 오랫동안 사용해 온 전통적인 제품이다.

자기식이기 때문에 크고 무겁다는 단점에도 불구하고 옥외용으로서 내구성이 뛰어나 그동안 변압기 수요자에게 큰 인기를 누리고 있다. 변압기의 구조는 그림 1과 같이 철심 코어에 어느 한쪽이 자기적 (Electro-magnetic)으로 끊어진 상태의 누설 자속형 철심 (Leakage Inductance Core)이라는 특수한 코어로 되어 있다.

이것은 변압기의 2차측 (고압 출력측)에 부하(네온관)를 연결하여 사용할 때 과대 전류가 흐르게 되므로 이를 억제하기 위한 것이다(이 끊어진 부분 (Gap)이 너무 가까우면 정격 전류가 증가하고, 너무 멀면 1차 측 무효전류가 증가한다). 이 코어에 1차 측 (220 V 입력 측)에는 약 550회의 권선을 감고, 2차 측 (고압 출력 측)에는 0.08 mm의 아주 가느다란 에나멜선을 40 000회 정도 감아 놓았으므로 1차 측에 AC 220 V를 인가하게 되면 2차 측에는 약 15 000 V의 고압이 발생하게 되어 이 전압으로 네온관을 사용하게 된다.

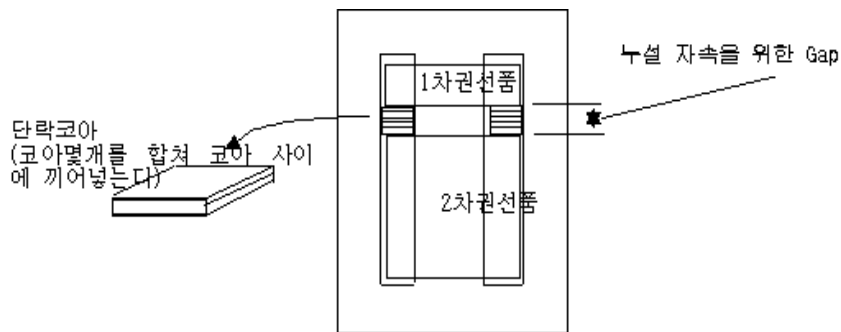


그림 1 변압기의 구조

표 1 변압기의 일반 성능 특성

항목		기종	15 kV	12 kV	9 kV	6 kV
정격주파수 (Hz)			60	60	60	60
2차단락시	정격 1차 전류 (A)		0.85	0.65	0.45	0.30
	정격 2차 전류 (mA)		20	20	20	20
	정격 입력 용량 (VA)		170	130	90	60
부하시	정격 입력 용량 (VA)		160	125	90	60
	역률 (%)		90	90	90	90
중량 (kg)			8.8	8.3	7.9	3.8

즉, 네온관을 점등하기 위해서는 높은 전압이 필요하다. 일단 점등이 되면 네온관의 내부 저항이 급격히 낮아지므로 많은 전류가 흐르게 되고 이 때문에 2차 측 전압도 낮아져 6 000 V가 된다. 이 전류 억제 기능을 가지게 하기 위하여 변압기의 코어가 누설 자속형으로 되어 있다.

권선의 표류 손실은 누설 자속이 쇄교(鎖交)하는 도체폭의 2승에 비례하기 때문에 표류 손실의 저감에는 도체 폭을 세분화하여 도체의 수를 증가시키면 된다. 그러나 도체를 세분화하면 권선의 강성(剛性)이 저하하고, 단락 시에 전자 기계력에 대해 강도상의 문제가 발생하기도 한다. 이에 대응하기 위해 최근에는 도체 간을 접촉하고 강성의 향상을 꾀한 접착 전선을 채용한 경향이 뚜렷해지고 있다.

변압기의 일반적인 성능 특성은 표 1과 같다. 네온변압기는 출력 전압이 입력 전압보다 훨씬 높은 고압 변압기이다. 네온관의 점등에 필요한 전압은 네온관 양쪽 끝의 전극 간 거리에 비례하여 네온관 길이가 길면 길수록 더 높은 전압을 필요로 한다.

$$E_v = (L_m \times 1\,500) + 500 \quad (1)$$

여기에서 E_v : 점등 전압, L_m : 네온관의 길이이며, 또 한편 점등 전압 E_v 를 알고 여기에 맞는 최대 네온관의 길이를 구하려면

$$L_m = \frac{E_v - 500}{1\,500} \quad (2)$$

이다.

일반적으로 사용하고 있는 변압기는 출력 전압이 15 000 V이므로 이 전압으로 점등할 수 있는 네온관의 최대 길이는 약 9.6 m가 되어 이 길이까지의 네온관을 점등시킬 수 있다. 15 000 V, 12 000 V, 9 000 V, 6 000 V가 있다. 따라서 네온관의 직경에 따라 점등 길이는 달라지므로 표 2를 참조하여 시공한다.

네온관은 그 기법과 원리가 다양해지고 있지만 아직도 가장 널리 사용하는 것은 고압 전기를 이용한 전통식 일반 네온이다.

표 2 변압기 1대당 최대 점등 길이

관의 종류	관의 굵기 (mm)	네온관의 길이 (m)			
		15 kV	12 kV	9 kV	6 kV
네온 가스 봉입관	φ14	10.5	8.5	6.0	3.5
	φ12	8.0	6.5	4.5	2.5
	φ9	6.0	4.5	3.5	2.0
아르곤 가스·수은 봉입관	φ14	13.0	11.0	8.0	5.0
	φ12	10.0	8.0	6.0	4.0
	φ9	8.0	6.5	4.5	3.0

주 : 네온관 1대의 길이를 1.5 m로하고 봉입 가스압은 네온가스의 경우 10 mm(수은), 아르곤가스의 경우 6 mm 정도의 경우이다.

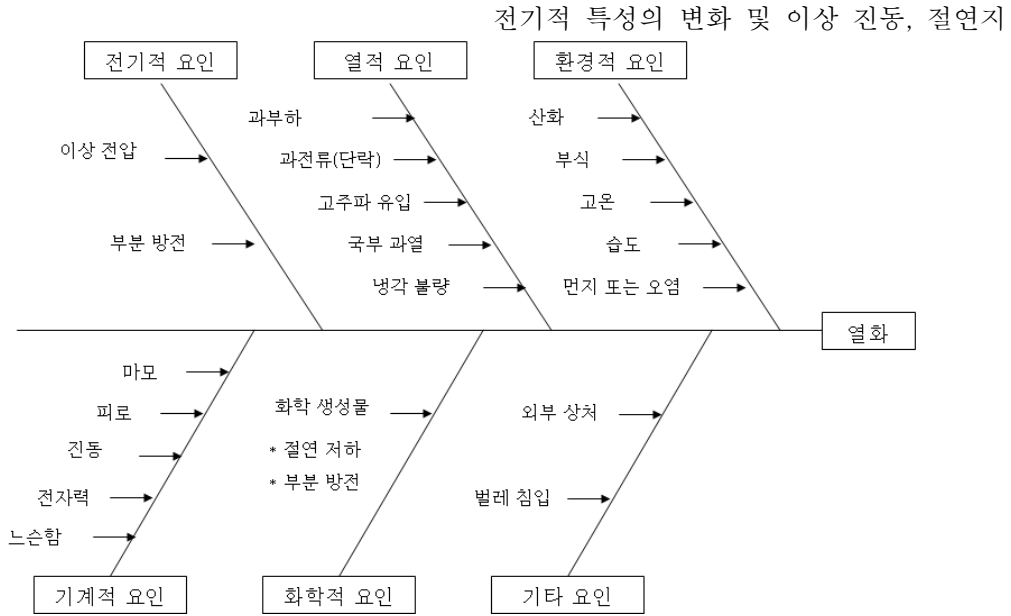


그림 2 변압기의 열화 특성요인도

네온관은 일반적으로 지름 14 mm 제품을 가장 널리 사용하고 사인의 바탕, 문자 테두리에

설치하는 것이 대부분이다. 일반 네온의 가장 큰 특징은 약 15 000 V 고압 전기를 사용한다는 점이다. 일반 전압이 220 V이기 때문에 고압으로 높이기 위한 장치로 변압기를 설치하는데, 주로 자기식 제품을 사용하고 근래 들어 전자식 제품 사용도 늘고 있다. 일반적으로 15 000 V 변압기 1대가 정할 수 있는 최대 네온관 길이는 약 9 m로 알려져 있는데, 이는 네온관 형태와 디자인에 따라 달라질 수 있기 때문에 절대적인 것은 아니다.

일반 네온의 또 다른 특징은 점멸기를 장착해 변압기 입력 전기를 자동으로 제어한다는 점이다.

미리 구성한 점멸기 프로그램 회로에 따라 변압기에 전기 공급을 제어함으로써 네온관이 점멸한다. 네온사인 1개는 네온관 수십 개, 많게는 수만 개로 이뤄지기 때문에 점멸기 회로에 따라 무궁무진한 효과를 연출할 수 있다. 물론 채널문자 광원이나, 실내 디스플레이, 간판 테두리 장식등에 네온관을 사용할 때는 점멸하지 않을 때도 있다. 장시간에 걸친 운전, 주위 환경에 의해 변압기가 이들의 스트레스를 계속 받음으로서 절연물의 열화가 진행되고, 부분 방전의 발생, 권선의 과열과 변형, 철심의 국부 과열,

의 파손 등 여러 가지 장애 현상을 일으키고, 이상 전압 또는 기계적 이상 스트레스를 받은 경우 파괴하게 된다.

또한 변압기는 사용 시에 낙뢰 서지, 과부하, 과전압, 부하 측의 사고나 고온 다습한 장소에서의 사용 등으로 서서히 열화가 진행된다. 변압기의 주된 열화 원인은 열적, 기계적, 전기, 기타 등 다양하며 그 주된 요인은 다음의 표 3과 같으며, 단독 또는 복합적으로 절연물에 작용하고 절연 열화를 진행시킨다. 그림 2는 변압기의 열화 특성 및 요인도이다.

표 3 절연 열화의 요인

열화 요인	추정 요인
열적	과부하 및 과전압에 의한 온도 상승, 주위 온도의 변화
기계적	열 충격, 단락 기계력, 열 사이클, 진동
전계	부분 방전, 개폐 서지, 과전압
기타	습기, 먼지, 고조파

표 5 권선의 절연 종류와 허용 온도 (JIS)

절연 종류	절연물의 허용 최고 온도(°C)	변압기의 허용 최고 온도 (°C)
A종	105	100
E종	120	115
B종	130	120
F종	155	140
H종	180	160

*주위온도 40 °C (표준 환경)의 경우

최종 주위 온도 (°C), R_1 : 온도 t_1 (°C)에

표 4 네온관의 이상 현상과 네온변압기와의 관계

이상 현상	변압기와의 관계
네온관의 흔들림 현상(떨림 현상)	<ul style="list-style-type: none"> - 과부하로 인한 변압기의 용량 부족 - 입력 전압 저하 - 고압부 절연 파괴로 인한 저전압 - 네온관의 파손 - 기후의 영향(수은가스의 응집) - 출력전류 미달 - 출력전압 미달 - 네온관이 가스압 상태
네온관 파괴 시 변압기와의 관계	<ul style="list-style-type: none"> - 소음 발생 - 변압기의 수명 단축 - 고온 발열로 인한 절연 파괴

서의 저항 (Ω), R_2 : 온도 t_2 (°C)에서의

네온관의 이상 현상과 변압기 사이에서 발생할 수 있는 관계는 표 4와 같다.

2. 시험 방법

변압기의 온도 상승의 측정에는 수은 또는 알코올 온도계를 이용한 온도계법이 간단하고 일반적인 방법이나 권선의 온도 상승은 내부에서 외부로의 온도 차이가 있기 때문에 외측의 온도 측정에는 권선 온도의 올바른 값이 얻기 힘들다. 따라서 권선의 저항 온도계수를 이용한 저항법에 의해 평균 온도를 측정하는 방법이 필요하다.

저항법 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (3)$$

여기에서 t_1 : 최초 주위 온도 (°C), t_2 :

저항 (Ω)이다.

식 (3)으로부터 t_2 를 구하면

$$t_2 = \frac{R_2}{R_1}(234.5 + t_1) - 234.5 \quad (4)$$

온도 상승분 θ 는 식 (4)으로부터

$$\theta = t_2 - t_1 \pm \Delta t \quad (5)$$

여기에서 Δt = 최초 주위 온도와 온도 상승 후의 주위 온도의 변화(°C)를 말하고, 주위온도가 상승했을 때는 -, 하강했을 때는 +이다.

한편, 식 (3), (5)를 이용하여 계산에 편리한 식으로 변형하면, 저항법에 의한 간편한 온도 계산식은 다음과 같다.

$$\theta = \left[\frac{R_2}{R_1} - 1 \right] (234.5 + t_1) \pm \Delta t \quad (6)$$

변압기는 주위 온도의 증가에 따라 권선 온도의 상승과 더불어 저항값이 상승하고 결국 동작불능 상태에 이르게 된다. 온도 상승 한도와 절연물의 허용 최고 온도는 다음 표 5와 같다.

정상적인 온도보다 10 °C를 증가시켜서 가속수명시험을 하면 수명은 반으로 감소된다 (그림 3).

정상 온도에서의 수명을 θ_n , 가속수명시험 온도에서의 수명을 θ_a , 정상온도로부터의 10 °C 단위의 온도차의 수를 α 라고 하면 가속수명 θ_a 는 식 (5)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_a = \frac{\theta_n}{2^\alpha} \quad (7)$$

식 (7)을 10 °C 법칙이라 한다.

그리고 가속계수 Acc는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Acc = \frac{\theta_n}{\theta_a} \quad (8)$$

또한, 절연물의 허용 최고 온도 하에서 1일 10 H 사용 시 권선의 온도 상승 및 연속 사용 시 권선의 온도 상승과 변압기의 수명 특성은 각각 표 6, 표 7과 같다 (JIS C 8105-1(2000)).

표 6 정격 전압에서 1일 10시간 사용 시 권선의 온도 상승과 안정기의 수명

권선의 온도 상승 (°C)	0	10	20	30
년	5	2.5	1.3	0.7

표 7 정격 전압에서 연속사용 시 권선의 온도 상승과 안정기의 수명

권선의 온도 상승 (°C)	0	10	20	30
년	1.9	1.0	0.5	0.3

이 법칙을 이용하면 만약 절연물의 허용 최고 온도가 130 °C에서 변압기의 연속 사용 시의 수명이 $\theta_n=6\,900$ 시간이면 가속수명 시험 온도가 160 °C일 때의 수명은 다음과

같다.

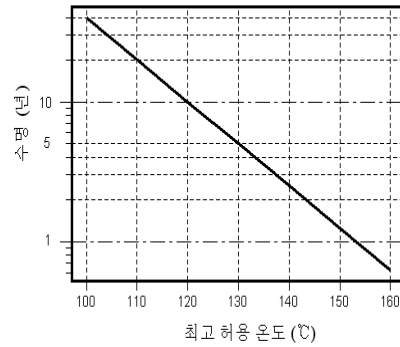


그림 3 권선 온도와 변압기의 수명

[근거자료 : 일본 이와사키(岩崎) 전기주식회사[7]]

$\alpha=3$ 이므로 식 (8)에서 θ_a 는 다음과 같다.

$$\theta_a = \frac{6\,900}{2^3} = 863$$

가속계수 Acc는

$$Acc = \frac{6\,900}{863} = 8$$

이다.

신뢰성 스트레스 수명 하에서의 무고장 합격 기준을 만족하는 시험시간의 계산은 다음과 같다.

$$T^* \geq \left(\frac{1.830 \times (6\,900)^{1.1}}{2 \times 10 \times \ln\left(\frac{1}{1-0.1}\right)} \right)^{\frac{1}{1.1}} \quad (9)$$

$$\approx 6\,100$$

여기에서 $\beta=1.1$, $x=0.1$, $t^*=6.9 \times 10^3$, $n=10$, $c=0$, $\alpha=60\%$, χ^2 분포에서 $\chi^2(2c+2, \alpha)=1.830$ 이다. 즉, 가속 스트레스 하에서의 시험시간 $T^*=6\,100$ (H)이다.

예를 들어 절연물의 허용 최고 온도가 130 °C인 권선을 160 °C로 상승시켰을 때의 신뢰성 수명 시험 시간은 $6\,100/8=763$ (H)이다.

변압기 10대를 정격 최고 작동 온도에서 각각 표 8의 신뢰성 수명 시험일까지 시험한 후, 10대 모두 고장이 발생하지 않고 성능 시험의 평가 기준을 만족하면, 신뢰수준 60%에서 10시간 사용 조건하에서 5년 (B_{10} 수명)을 보증한다.

3. 결말

네온변압기는 전기 제품의 일종이며, 사용시간의 경과와 더불어 환경 조건 등 여러 가지 요인으로 서서히 그 성능이 열화하고 마침내 수명에 이르는 성질을 가지고 있다. 최근에는 에너지 절약용, 자원 절약용 등 환경 보호 입장에서 고효율화가 도모되고 있고, 내구성 증가, 소음 저감, 환경에의 적합 등 여러 가지 요구가 높아지고 있으나 확립된 수명 평가 이론은 정립되고 있지 않는 실정이다. 따라서 여기에서는 변압기의 수명 등을 평가할 수 있는 방법을 제고하고 있다.

참고문헌

- [1] 한양대학교 신뢰성분석 연구센터, “고장분석 전문기술 교육 - 수동부품의 고장분석,” 신뢰성 분석 연구센터 (2004).
- [2] 신승훈, “와이블 차트와 가속시험”, 과학기술 (2003)
- [3] 박경수, “신뢰성 개론”, 영지문화사 (1998)
- [4] 澤田 清, 三 道 弘 明, “ソフトウェアの信頼性 實證試験方式”, 日本オペレーションズ・リサーチ, Vol. 44 No 8, pp. 415-419 (1999)
- [5] 이영주, “일반조명시스템의 신뢰성 평가를 위한 고장수명분포 및 보증수명 연구고찰”, 등지, (2003.12 ~ 2004.02)
- [6] 東芝ライテック, 技術解説, (2005)
- [7] URL : <http://www.iwasaki.co.jp/>