

고조파가 물드변압기 수명에 미치는 영향분석

강 창 섬^o, 이 흥 기, 이 은 철, 윤 덕 광

전기안전시험연구원

Effect of Harmonics on the Cast-Resin Transformer Life Cycle

Chang-seob Kang, Hong-gee Lee, Un-cheol Lee, Duck-ryang Yoon

Electrical Safety Laboratory Research Institute

ABSTRACT

We've been reported recently that increase of installing big power converting equipment which makes harmonics result in damage on transformer for incoming and load.

Specially, harmonics that cause overheat and aging is severer in cast-resin transformer a kind of dry type than in oil one.

The goal of this paper is to prove the process for aging of transformer that result from harmonics in according to both of theory and actual measurement on site.

And we introduce diagnostic methods to estimate aging condition of cast-resin transformer in accordance with simulation.

I. 서 론

산업현장에서 사용하고 있는 변압기는 유입식이 대부분을 차지하였으나 근래 들어와 다양한 용도의 특수변압기를 필요로 하면서 물드타입의 변압기가 광범위하게 보급되고 있다. 그러나 이러한 형태는 유입식 변압기에 비해서 신뢰성을 확보하는 것이 어려운 것으로 알려져 있다. 유입식보다 물드타입의 신뢰성 저하요인 중에 하나로서 절연내력 및 임펄스 내력이 유입식과 같지 않기 때문에 신뢰성이 떨어진다. 실제로 물드 변압기는 임펄스 내력을 충분히 견디도록 제작하는 것이 어렵기 때문에 충격 시험에 대한 규격이 유입식과 동등한 경우가 거의 없다[1].

물드변압기는 난연성의 특징을 갖고 있어 80년대부터 광범위하게 보급되기 시작한 기종이다. 따라서 유입변압기에 비해서 역사가 짧아 수명진단기술은 아직 충분한 연구가 이루어지지 않은 실정이다.

변압기는 전기기기 중에서 가장 손실이 적은 고효율 기기의 하나이다. 그러나 전기설비의 주요기기로써 사용하고 있기 때문에 항상 가동되고 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 그 손실을 연간으로 산출하면 대단히 큰 수치라고 할 수 있다.

최근에 들어와 고조파를 발생하는 대용량 전력변환장치가 공장전기설비에 다양으로 설치되면서 수전용 및 배전용 변압기를 소손시키는 사고사례가 보고되고 있다[2]. 특히 고조파가 변압기 과열 및 열화의 원인이되면서 유입식보다는 건식변압기의 일종인 물드변압기에 열적 스트레스를 심하게 인가하여 절연파괴를

일으켜 수명단축의 원인이 되는 것으로 나타났다[3, 4].

본 논문에서는 변압기의 효율저하 및 열화원인의 하나인 고조파 성분이 물드변압기를 열화시키는 과정에 대해 수식적으로 검증하고, 현장실측 자료에 근거하여 물드변압기의 소손과정을 규명하며, 고조파에 의한 물드변압기 열화상태를 진단할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1 구조

물드변압기라고 하는 것은 「철심 및 권선이 절연유 속에 있지 않고 권선의 전표면이 수지 또는 수지를 포함한 절연재료로서 피복된 변압기」라고 정의하고 있다[2].

물드변압기 구조의 한 예를 나타내면 아래 그림과 같다.

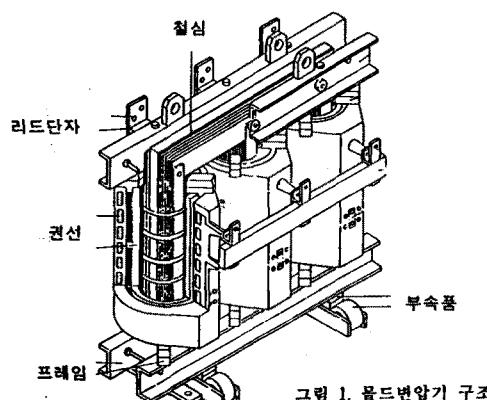


그림 1. 물드변압기 구조

그 구조를 크게 분류하면 철심, 권선, 프레임, 리드, 부속품 등으로 분류할 수 있다.

2.2 수명 결정요소

(1) 유지보수의 관점

기기의 각구성요소에 대해서 그것을 어떻게 관리할 것인가의 관점에서 분류하면 아래와 같이 판정할 수 있다.

- [R] : 개별적으로 수명진단 시험을 실시하여 수명관리를 할 것.
 [S] : 교체기준을 만들어 수명관리를 할 것.
 [T] : 이상유무를 확인하여 관리할 것.

(2) 수명평가대상 추출

각구성요소의 재료를 보면 철심이나 도체, 프레임 등으로 사용되는 금속재료(철, 동, 알루미늄)와 절연물이나 부품으로서 사용되는 유기재료로 나눌 수 있다. 이중에 금속재료에 대해서는 거의 열화가 없어 부식을 방지하기 위한 정기적인 유지관리만 요구되므로 판정기준은 [T]가 된다. 예전시 수지, 내열필름, 고무 등의 유기재료에 대해서는 일반적으로 열, 전압, 용력, 환경 등의 스트레스를 받으면 열화한다. 이중에서 스트레스가 경미하거나 유관점검으로 유지관리가 가능한 부품에 대해서는 금속재료와 마찬가지로 [T]가 된다.

이에 대해서 가혹한 스트레스를 받고 열화상황을 외부에서 판정하기 어려운 부품은 도체에 밸열이나 전압 스트레스를 향상 받고 있는 내열프레임이나 예전시 수지이며, 이것을 교환하는 경우에는 권선전체 교환이 필요하다. 이러한 점을 고려하면 도체 절연이나 코일절연에 사용되고 있는 절연재료의 판정기준은 [R]이 된다.

2.3 수명평가기술 분석

절연재료의 열화는 표 1과 같이 4종류로 구분할 수 있다. 이중에 열열화나 용력열화는 단독으로도 기기의 수명에 영향을 미칠 수 있는 것이며, 열열화나 용력열화에 따라서 절연물에 보이드(기포)나 크랙이 생기면 부분방전이나 트리열화가 발생하여 수명(절연파괴)에 영향을 미친다. 그러나 이러한 스트레스가 복합적인 경우 열화 데이터는 아직 충분하지 않아 수명평가법이 확정된 것은 없다[3].

환경 스트레스에 의한 열화는 주로 표면에 발생하는 것으로 적절한 유지관리에 의해서 기기의 성능을 유지할 수 있다. 여기서는 물드변압기의 수명에 영향을 미치는 고조파와 인과관계를 갖고 있는 열열화와 전압열화를 중심으로 분석하였다.

a. 열열화와 내열수명

절연재료의 열열화는 일종의 화학반응이며, 열화속도는 온도와 함께 증가한다. 재료의 특성값이 설정래별로 열화하는데 걸리는 시간 t_e 와 절대온도 T 사이에는 다음식의 관계가 성립한다 [2].

$$t_e[t_e] = A + \frac{E}{RT} \quad (2.1)$$

여기서 A, R : 정수, E : 활성화 에너지

즉 수명대수를 종축으로 하고, 온도의 역수를 횡축으로 하면 수명과 온도의 관계는 직선으로 나타낼 수 있다.[4]

예전시 수지 및 내열필름의 열화특성은 식(2.1)에 의해서 설명할 수 있으며, 그밖에도 기기의 수명에 영향을 직접적으로 미치지 않더라도 각종의 특성치를 적용할 수 있다.

b. 전압열화와 내전압 수명

절연재료의 내전압 수명에 대해서는 전압 V와 수명 t 사이에 V-t 특성으로서 아래식과 같은 관계가 성립한다.

$$t = kV^n \quad (k, n : \text{정수}) \quad (2.2)$$

절연물에 결함이 없고, 전계집중이 없는 전압스트레스가 인가된 경우의 V-t 특성을 그림 2에 나타냈다[6]. 여기서 알 수 있는 바와 같이 기울기가 완만해서 운전전압(수kV)에서는 열화과정에 별로 영향을 미치지 않는다. 그러나 절연을 내부에 보이드나 돌기 있는 경우에 부분방전이나 트리에 의해 열화가 촉진되며, V-t 특성곡선으로부터 추정할 수 있는 수명은 크게 짧아진다.

III. 제반 문제에 대한 검토

물드변압기의 수명진단을 위해서는 아래의 여러 조건을 고려할 필요가 있다.

(1) 구조 문제

(2) 내(耐) 크랙 및 코일 냉각을 위한 에어덕트 문제

(3) 내습성 문제

(4) 임펄스 내력 문제

(5) 기포 문제(CORONA특성)

(6) 난연성 문제

그러나 본 논문에서는 고조파 및 임펄스에 의해서 직접 영향을 받는 열화요인만을 선정하여 검토하였다.

IV. 고조파에 기인한 스트레스

변압기의 고조파 영향은 주로 다음의 두가지를 생각할 수 있다.

(i) 고조파전류 증첨에 의한 손실증가

(ii) 고조파전류 증첨에 의한 철심의 자화현상

4.1 손실의 증가

기본파 전류에 고조파 전류가 포함되면 도체의 표피효과에 의해서 식(4.1)에 의한 동손증가 현상이 일어난다.

(1) 동손의 증가율

$$\varepsilon_c = (W_c/W_d) \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

$$W_c = I_1^2 R \cdot (1 + \beta)$$

$$W_d = W_d + I_1^2 R \cdot \sum_n \alpha_n^2 n (1 + \beta \cdot n^m)$$

여기서, W_d : 기본파전류 I_1 에서의 동손

R : 권선의 적률저항

β : 기본파에 있어 표류손실계수

W_c : 고조파 유입시의 동손

n : 고조파 차수

α_n : $I_n/I_1 = n$ 차조파 함유율

m : 계수 ($m = 1.6 \sim 2.0$ 정도)

(2) 동손의 계산

이와 관련하여 제5조파가 10% 포함되어 있을 때 $\alpha_5 = 0.1$,

$$\beta = 0.25, m = 1.8$$
로서 계산하면

$$W_d = 1.25 I_1^2 R$$

$$W_c = 1.31 I_1^2 R$$

$$\varepsilon_c = \frac{1.31}{1.25} \times 100 = 104.8\% \text{로서 동손이 약 } 5\% \text{ 증가한다.}$$

(3) 철손의 증가율

다음에 히스테리시스손과 와전류손의 합계인 철손의 증가율을 다음 식으로 나타낸다.

$$\varepsilon_1 = (W_i/W_d) \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

$$\text{여기서, } W_i = K_1 E_a^m + K_2 (k_j E_a)^2$$

W_i : 기본파(정현파)전압에서 여자되있을 때의 철손

E_a : 고조파를 포함한 여자전압 평균치

m : 스타인메츠 정수(약 1.6~2.5)

k_j : 고조파를 포함한 여자전압의 파형률($k_j > 1$,

기본파만일 때 $k_j = 1$)

K_1, K_2 : 정수

이러한 손실의 증가로 인하여 변압기유 및 권선의 온도상승을 초래한다. 더우기 손실의 대부분은 동손이다.

4.2. 철심의 자화현상

변압기는 고조파 전류에 따른 철심의 자속으로 인하여 철심에 자화현상이 일어나며, 그 손실 P 는

$$P = K_2 n f \left(\frac{4L}{L} \right) \quad (4.3)$$

K_2 : 정수, f : 기본주파수, n : 고조파 차수이며 주파수가 높으면 손실이 커진다.

따라서 고조파가 변압기에 유입되면 소음이 발생하며, 때로는 금속적인 소리나 이상음을 만들기도 한다. 또한 소음의 크기도 평소보다 10~20[dB] 정도 높아지는 일이 있다.

V. 사례연구

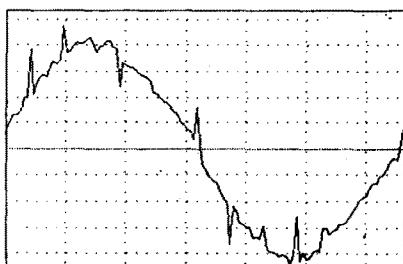


그림 4. 고조파 실측파형

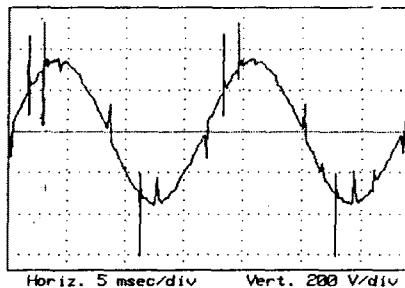
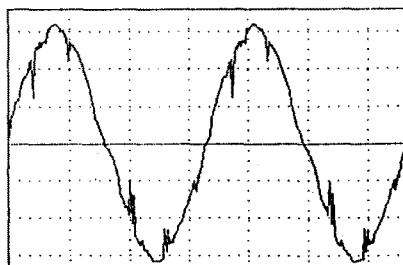
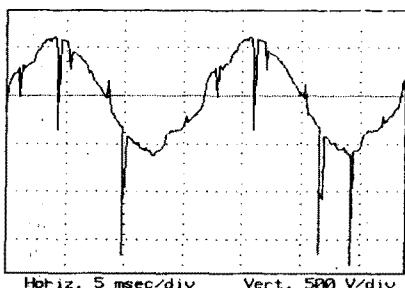


그림 5 반복적인 충격파(임펄스, 고조파)



Horiz. 5 msec/div Vert. 500 V/div

VI. 결론

본 논문에서는 고조파에 기인한 열화과정을 규명하고, 이러한 스트레스가 물드변압기의 수명에 미치는 영향을 분석하여 그 인과관계를 검증하였다.

1. THD < 5% 이상인 전압왜형의 경우, 와전류손실과 히스테리시스 손실의 과로한 증가를 일으키지 않도록 하고
2. 전류 왜형파는 권선손실에 직접 영향을 미치며 와전류 손실의 미소한 증가만으로도 전체손실의 큰 원인이 된다.
3. 물드변압기의 수명감소는 과열 온도에 따라 달라지기 때문에 전류왜형은 주의깊게 관찰할 필요가 있다.

향후 진단정보 검출기술이나 진단기법의 개발이 필요하며, 자동감시 시스템화에 의한 수명예측기술의 실용화가 필요하다.

[참고문헌]

- [1] J. Arrillaga, D.A. Bradley, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985
- [2] 久 仁, "EPOXY MOLD 絶縁の V-t 特性と 耐電壓 寿命評價" 宮社時報, 50, No.5, 1977
- [3] Acosta, O. N., "Interphase Transformer for Multiple Connected Power Rectifiers," IEEE Trans., Vol. IGA-1, Nov./ Dec. 1975, pp.423-8, 1975
- [4] 久 仁, "MOLD-COILS の 絶縁層間 IMPULSE 破壊特性試験" 日本電気學會, No.320, 1984
- [5] Alexander, E., "Effect of Voltage and Current Distortion on Iron and Copper Losses" IEEE Trans., pp. 106-111,
- [6] A. E. Emanuel and Xiaoming Wang, "Estimation of Loss of Life of Power Transformer Supplying Nonlinear Loads", IEEE PES Summer Meeting, Seattle, 1984
- [7] Dougiass, D. A., "Potential Transformer Accuracy at 60 Hz Voltage above and below rating and at Frequencies above 60 Hz", IEEE Trans., PAS-100, pp.1370-1375, 1981