

## 변압기 권선진동의 모형화 연구

이성호\*<sup>o</sup> 강창구\* 김재철\* 정찬수\* kw희로\* 주병수\*\* 윤진열\*\* 정상진\*\*  
\*숭실대학교 \*\*한국전력 기술연구원

### A study on the modelling of power transformer winding vibration

Lee Sung Ho\*<sup>o</sup>, Kang Chang-gu\*, Kim Jae-Chul\*, Chung Chan-Soo\*  
Kwak Hee-Ro\*, Joo Byung-Soo\*\*, Yoon Jin-Yeol\*\*, Chung Sang-Jin\*\*  
\*Soongsil University \*\*KEPCO

#### Abstract

This paper established on vibration model of transformer winding caused, mainly, by load current. We considered the relations between loads and vibration amplitudes by changing load current in constant temperature and voltage, to get the modelling of transformer winding vibration. Equation between loads and vibration signal's amplitudes using LS approximation made it possible to predict a vibration signal's amplitude at any load. With this equation, we are willing to establish the basis data for power transformer diagnosis.

#### 1 서론

전력설비중에서 큰 비중을 차지하고 있는 변압기는 구조적으로 복잡하고 밀폐화되어, 이상 발생시 즉각적인 관측에 의해 구별할 수 없으므로 고 신뢰성을 확보하기 위해서는 이상의 징후를 관측할 수 있는 예방진단기법이 필요하다. 그러므로, 활성상태에서 변압기 초기고장을 예측하고, 확인할 수 있는 기법에 대한 연구가 활발하게 진행중이다.[1][2]

국내외의 연구 및 기술개발의 현황은 각종 센서개발 및 컴퓨터 산업의 급속한 발전에 따라 예방진단 장치의 온라인화, 정밀화, 지능화가 진행되고 있다. 따라서, 전력공급에서 가장 중요한 설비중의 하나인 변압기에 대해서 열화상태를 판정하고, 사고를 미연에 방지하기 위한 제반특징적인 진동, 온도, 유전체손, 부분방전, 유중수분 및 가스량을 측정, 분석하는 시스템 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 일본 및 미국 등에서는 시제품을 현장에 설치하여 신뢰성을 제고하기 위한 실증연구가 진행되고 있다.[3]~[5] 진동모드분석은 운전중인 변압기에 인가되는 전지력, 과부하에 의한 이상 온도상승, 절연물 열화 등에 의한 권선지력의 변화, 권선의 탈락 등 변압기의 권선 지지력을 상시 감시를 하므로 변압기의 권선이 파괴되기 이전에 이를 효과적으로 검출할 수 있다.

변압기의 진동원인은 크게 권류, 전압 및 온도에 의한 변압기 권선이나 철심의 떨림이다. 그 중 가장 큰 원인은 권류의 전지력에 의한 힘이다. 이 전지력이 권선과 권선사이에 작용하여 권선을 진동시키고 이 진동이 기계적으로 결합되어 있는 철심을 진동시킨다. 본 연구에서는 변압기 권선의 진동모형을 구하기 위하여 진동에 가장 큰 영향을

주는 부하전류의 크기에 따른 진동신호 크기의 관계식을 LS근사화[6]를 이용하여 구함으로써 각 부하시에 진동신호의 크기를 예측할 수 있도록 하여 변압기 예방진단의 기초 자료로 이용할 수 있도록 하였다.

#### 2 실험장치 및 실험방법

진동신호와 부하전류간의 근사화를 위하여 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 권선의 진동원인인 전류, 전압과 온도에서 가장 큰 영향을 주는 것은 부하전류의 변화이므로, 본 실험에서는 전압은 인가하지 않은 상태에서 온도는 일정하다고 가정하고 부하전류 크기를 변화시키면서 출력으로 진동신호를 선택하였다. 변압기 권선에서 발생하는 진동을 검출하기 위하여 권선에 가속도계를 부착하여 진동신호를 감지하고, 신호를 알맞은 크기로 변환한 뒤, PC로 파형을 관찰하였다. 변압기에 가속도계를 부착하는 방법에 있어서, 변압기의 외함에 부착하는 방법은 외부잡음의 혼입 및 진동신호가 외함에 전달하기까지의 진동의 감소 등으로 유용하지 못하다. 진동이 가장 큰 부분은 권선이므로, 센서를 지지할 수 있는 지지대를 설계, 제작하여 권선의 중앙에 고정시켜서, 진동을 측정할 수 있도록 구성하였다. 또한 부착방향은 권선의 진동방향과 가속도계 감도의 주 방향이 일치하도록 설치하였다. 또한 외란의 영향을 줄이기 위해 측정신호의 전달은 이중 차폐하였다. 진동신호 측정용 가속도계는 증폭기가 내장된 압전 가속도계(piezoelectric accelerometer)이고, 감도가 평탄한 주파수대역은 3-10,000[Hz]이다. 측정된 신호는 A/D 변환기, FFT 분석기 및 PC와 공유회로를 가진 장치인 신호분석기(DP420)를 통해서 PC와 연결되도록 하였다.

실험용변압기는 정격전압이 13,200/230[V]이고, 용량이 50[KVA]인 내철형 적철심 단상변압기이다. 부하전류는 반환부하법을 사용하여 자동전압조정기를 통해 가변시키면서 공급하였다. 반환부하법은 실제의 부하를 걸지 않고 변압기의 철손 및 동손을 공급할 수 있는 시험 방법이다. 그림 1과 같이 변압기 1과 변압기 2를 같은 극성으로 연결하고, 변압기 1과 변압기 2에 정격전압을 인가하면 유품전압은 서로 크기가 같고 방향이 반대가 되므로 변압기 1과 변압기 2 사이에는 전류가 흐르지 않는다. 변압기 3에 임피던스 전압의 2배(약 70[V])를 인가하면 변압기 1, 변압기 2 사이의 전압차에 의해 전류가 흐른다. 본 실험에서는 변압기 1과 변압기 2는 0[V]로 설정하고, 변압기 3을 가변시켜 부하전류를 증가시켰다. 그림 2는 데이터 취득장치의 구성

도이다. 가속도계에 의하여 측정되어진 진동신호의 크기는 매우 미약한 신호이므로 알맞은 크기의 신호로 변환시킨다. 트랜스듀서의 출력신호는 신호분석기에서 필요한 데이터로 변환되어 PC에서 연산하게 된다.

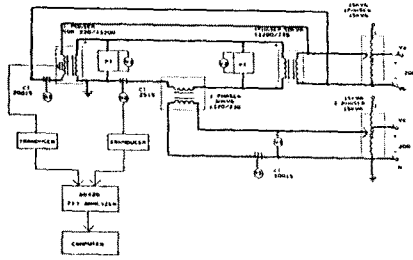


그림 1 실험장치의 구성도

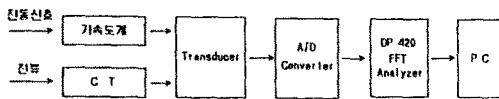


그림 2 데이터 취득장치 구성도

### 3 실험결과 및 고찰

그림 6은 변압기 권선으로 부터 부하전류를 10[%]씩 증가시키면서 10회 반복 실험하여 각 부하전류에서 고조파에 대한 절대크기를 구하고 그 값들의 평균값을 나타낸 것이다. 각 주파수별 진동신호는 전류신호가 증가함에 따라 크기가 증가함을 알 수 있으며, 진동신호의 중심주파수는 120[Hz]를 나타내었다. 또한, 부하전류가 2배 증가하면 진동신호는 약 4배로 증가하였다.

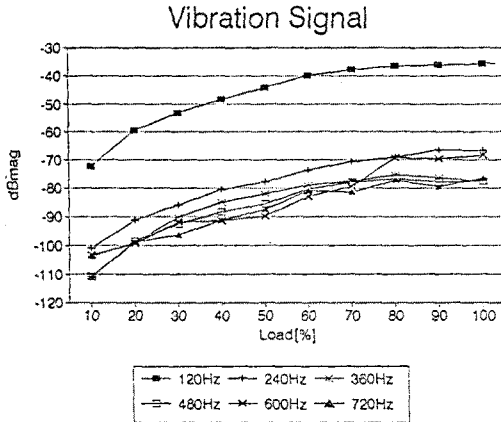


그림 3 부하전류 증가에 따른 주파수별 진동신호의 크기

부하전류 크기의 변화에 대한 120[Hz]의 진동크기를 기준으로 하여 각 고조파에서의 상대크기를 이용한 부하전류와 진동신호간의 관계식을 구하였다. 즉, 25[%], 50[%], 75[%], 100[%]에서 각각 20번씩 반복실험하여 얻은 데이터를 모두 고려한 80개의 각 고조파에서의 진동신호의 크기(120[Hz] 기준 상대크기)를 구하였으며, 그 평균값과 고조파의 수(60, 240, 360, 480, 600, 720, 840[Hz])를 이용하여 3차식의 함수를 구하였다. 부하전류와 진동신호에 대한 3차식은 다음과 같다.

$$v = a f^3 + b f^2 + c f + d \quad (1)$$

$$= [a \ b \ c \ d] F$$

$$F = [f^3 \ f^2 \ f \ 1]^T$$

f : 고조파의 수/120[Hz],

v : 각 고조파에서의 진동신호 크기(dB 값)

식 (1)에서 최소자승법을 이용하여 각 부하시 계수 a, b, c, d를 구해내면 a=1.17E-1, b=-1.40, c=1.46, d=32.67이다. 표 1은 50[%]부하시 진동신호와 위에서 구한 계수 a, b, c, d를 가지고 구한 진동신호의 크기를 나타내었다. 실험에서 구한 진동신호와 식 (1)에 의해서 구한 진동신호와의 상대오차는 360[Hz]에서 8.26[%]로 가장 높은 상대오차를 나타내었고, 240[Hz]에서 0.19[%]로 가장 낮은 상대오차를 나타내었다. 또한 다른 부하에서도 10[%]이내의 작은 상대오차를 나타내었다. 그러므로, 부하가 변동해도 120[Hz] 성분의 크기와 비교할 때 상대크기는 크게 변화하지 않았으며, 식 (1)의 3차 방정식을 이용한다면 실험에서 구하지 않은 고조파에 대한 진동신호의 크기를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 고장 발생시 특정 주파수에서의 이상을 발견함으로써 고장 진단뿐만 아니라 고장 위치도 예측할 수 있다.

식 (1)에 의해 구한 예측신호의 정확성을 알아보기 위해 상대오차를 도입하였다. 실측치에 대한 상대오차는 다음과 같다.

$$\text{상대오차} = \frac{|\hat{y} - y|}{y} \times 100 [\%] \quad (2)$$

여기서,  $\hat{y}$ : LS근사화로 구한 진동의 크기

y: 실험에서 구한 진동의 크기

표 1 50[%] 부하시 실측신호 및 식 (1)을 이용한 진동신호의 크기

[Hz]	측정값	계산값	오차	상대오차 [%]
60	-27.51	-26.94	0.57	2.09
240	-29.02	-29.07	-0.05	0.19
360	-29.92	-32.39	-2.47	8.26
480	-36.54	-36.40	0.14	0.38
600	-38.84	-40.41	-1.57	4.03
720	-46.33	-43.70	2.63	5.68
840	-48.26	-45.58	2.68	5.56

그림 4는 각 부하시 구한 진동의 크기를 모두 고려한 그림이다. 그림에서 보듯이 실험에서 구한 진동신호와 식 (1)에 의해서 구한 진동신호와의 상대오차는 720[Hz]에서 5.50[%]로 가장 높은 상대오차를 나타내었고, 360[Hz]에서 0.06[%]로 가장 낮은 상대오차를 나타내었다.

부하전류변화에 대한 진동신호의 RMS(Root Mean Square)값으로 부하전류와 진동신호간의 관계식을 구하였다. 즉, 25[%], 40[%], 50[%], 60[%], 75[%], 90[%], 100[%] 부하에서 반복실험하여 진동신호와 부하전류를 RMS값으로 검출하였으며 그 평균값으로 최소자승법을 사용하여 2차식의 함수를 구하였다. 부하전류와 진동신호에 대한 2차식은 다음과 같다.

$$v = a i^2 + b i + c$$

$$= [a \ b \ c] I \quad (3)$$

$$I = [i^2 \ i \ 1]$$

i : 부하전류의 크기

v : 진동신호의 크기(실측치)

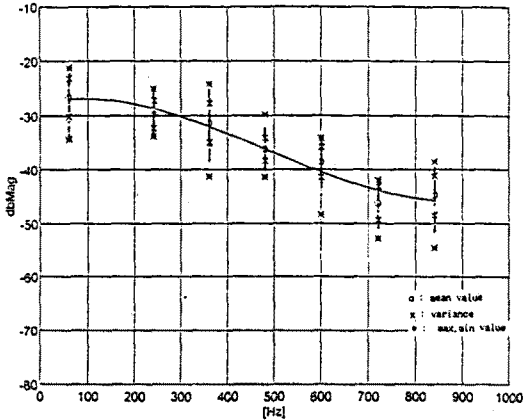


그림 4 모든 부하를 고려한 진동신호의 크기와 식 1을 이용한 예측신호

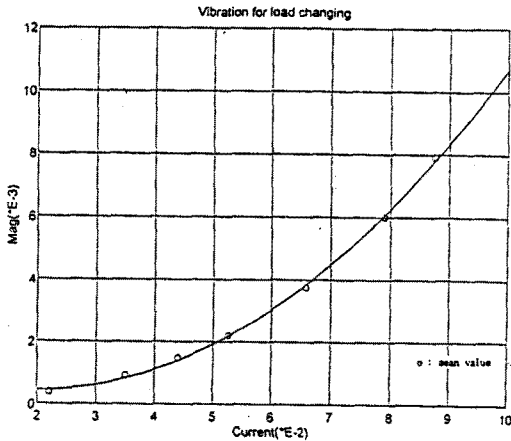


그림 5 실측한 진동신호와 식 (3)을 이용한 예측신호

식 (3)에서 최소자승법을 이용하여 계수 a, b, c를 구하면 0.158206, -0.611721, 1.031744이 된다. 표 2는 25[%]에서 100[%]까지 식 (3)을 이용하여 구한 진동신호의 크기와 실측한 진동신호의 크기이다. 25[%] 부하를 제외하고는 10[%] 이내로 아주 작은 상대오차를 나타냈다. 그림 5는 실험에서 구한 부하전류변화에 대한 진동신호의 크기와 식 (3)을 이용하여 구한 진동신호의 크기를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 진동신호의 크기는 부하전류의 제곱의 함수로 표현됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 식 (3)의 2차식을 이용한다면 실험에서 구하지 않은 다른 부하에서도 진동신호 크기를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 변압기 예방진단의 기초자료로 활용할 수 있다.

표 3 식 (3)을 이용한 진동신호와 실측한 진동신호

[%]	$y$	$\hat{y}$	상대오차 [%]
25	0.375E-3	0.452E-3	20.64
40	0.917E-3	0.829E-3	9.52
50	1.472E-3	1.398E-3	5.00
60	2.203E-3	2.198E-3	0.25
75	3.751E-3	3.858E-3	2.85
90	6.006E-3	6.075E-3	1.14
100	7.898E-3	7.811E-3	1.10

#### 4 결론

본 논문에서는 정상상태시 측정된 자료를 이용한 변압기의 모형은 변압기가 비정상상태가 된다면 모형화간에 오차가 생길 것이고 정상상태라면 모형은 변하지 않는 것을 이용하여 변압기를 모형화 하였다. 그러므로 이를 입증하기 위하여 온도와 전압을 고정한 상태에서 부하를 변화시켜 부하전류의 크기와 진동신호의 크기에 대한 관계식을 구함으로써 어느 부하시에도 진동신호를 예측할 수 있도록 하여 변압기 예방진단의 기초자료가 될 수 있도록 하였다.

#### 참고문헌

- [1] Lavelle, Juan C., "Failure Detection in Transformers Using Vibration Analysis," Department of Electrical Eng.n and Computer Science, M.I.T., Cambridge, MA, September 1986.
- [2] McCarthy, Daniel J., "An Adaptive Model for Vibrational Monitoring of Power Transformers," Department of Mechanical Eng., M.I.T., Cambridge, MA, May 1987
- [3] Hagman, Wayne H., "An Adaptive Transformer Monitoring System," Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems M.I.T., Cambridge, MA, 1989
- [4] Daniel J, McCarthy, "An Adaptive Model for Vibrational Monitoring of Power Transformer," LEES Technical Report, May 1987
- [5] Leonard Meirovitch, "Analytical Method in Vibration" The MacMillan Company, 1967
- [6] William H. Press, "Numerical Recipes in C," Cambridge University Press, 1987
- [7] 이성호 등, "부하전류 변화에 대한 변압기 권선의 진동분석에 관한 연구," 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 논문집, pp.54~57, 1994