

배전용변압기의 소음저감을 위한 진동주파수의 스펙트럼분석

이도훈* 김재철 송승영
숭실대학교

이현구 (주)신한전기 김광화
한국전기연구소

Analysis of Vibration-Frequency Spectrum of Distribution Transformer for Noise Reduction

Lee Do Hoon* Kim jae chul Song seung youp
SoongSil University

Lee hyun gu Kim kwang whoa
New Korea Electric Co.,Ltc KERI

Abstract - This paper analyze spectrum of vibration-frequencies to reduce noise level of distribution transformer. Using loading back method on same condition of a real load to grasp the effect of core and winding which are caused by the transformer vibration, we were measured the vibration-frequency by varying applied voltage and load current of a transformer. The major cause of a transformer vibration is occurred by the harmonic effects, and was identified that the vibration is less influenced by the coil.

As the result of this paper, comparing the transformer with some isolated material with the general transformer, the transformer with some isolated material could reduce spectral amplitude of vibration-frequencies.

1. 서 론

변압기는 신뢰도를 향상시킴과 동시에 송·배전에서의 손실을 줄이기 위한 초고암, 대용량화의 모습으로만 개발, 발전되어왔으며 이 과정에서 환경에 대한 문제는 소홀히 다루어져 왔다. 배전선로에 사용하는 주상변압기의 경우 생활공간과 거리가 불과 수 m거리에 설치되어 소음의 문제가 날로 심각해지는 가운데, 최근 국제표준화기구의 소음규제에 대한 입법화로 우리나라의 중전기 산업의 국제무역 경쟁력에 부정적인 요소로 작용하고 있다.

변압기에서 발생되는 소음의 발생원은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 철심진동으로서 자화에 의한 여기와 공극에서 발생하는 여기이고, 다른 하나는 누설 자속과 권선 전류의 상호작용에 의해 발생하는 Lorenz의 힘에 의한 권선의 진동이다.[1]

본 논문에서는 철심과 권선에 의한 소음에 대해서만 다루었다. 시료변압기의 소음저감 특성을 보이기 위해 실제로 변압기가 가장 많이 운전되는 상태를 기준으로 하여 시료를 취부시킨 변압기와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 철심에 의한 진동

진동이란 기준위치에 대한 흔들림으로서 기계요소의 흔들림, 전류크기의 흔들림, 압력크기의 흔들림 등도 진동이라 말한다[2][3]. 본 논문에서는 기계요소의 흔들림으로 그 적용범위를 제한하고자 한다.

변압기에서 발생되는 소음은 주로 철심에서 발생된다. 철심에서 발생되는 소음은 크게 두 가지로 나누어진다. 가장 중요한 요소는 윙윙거리는 소리이다. 이 소리는 자기회로인 규소강판의 자기왜곡(magnetostriction) 때문에 발생되고, 자기왜곡력(magnetostriction force)은 자기회로에서 철심의 지지물뿐만 아니라 절연유와 절연물을 통해서 탱크 벽으로 전달된다.

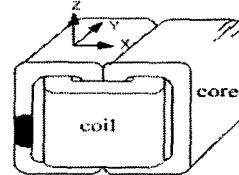


그림. 1 변압기의 개념도

시험변압기의 내부구성을 그림. 1에 나타냈다. 여기서 rolling direction(r.d.)을 x축으로 하고 r.d.에 직각인 방향인 transverse direction(t.d.)을 y축으로 잡았다. 또 x와 y의 수직인 방향을 normal direction(n.d.)을 z로 정하여 규소강판의 변위와 각 요소의 속도를 $d_x, d_y, d_z, v_x, v_y, v_z$ 로 정의한다. v_z 와 같은 방향의 철심표면의 속도를 v_n 으로 나타내며 각 측정 점의 속도를 평균하여 $\langle v_n \rangle$ 로 나타낸다. 이 조건들을 단순화 하여 총 발생된 소음을 다음과 같이 표현 할 수 있다[4].

$$P = F_{ref} v_n^2 dS_c \quad (1)$$

여기서 F_r 는 발생계수이고, r 은 전파매질의 밀도, c 는 음속을 나타낸다. 또 v_n 은 표면의 rms속도를 나타낸다. 이와 같은 전기적인 원인 이외에 기계적인 조임 상태의 이완으로 인한 加振力과 支持力의 불평형으로 철심과 탱크의 떨림이 소음의 크기를 증가시킨다. [5]

2.2 권선에 의한 진동

배전용 변압기의 권선배치는 절연성능을 극대화 시키고 비용을 줄이기 위해 철심에 가까운 쪽에 저압권선을 배치하고 저압권선의 바깥쪽에 고압권선을 배치하는 방법을 주로 선택한다. 도체에 전류가 흐르게 되면 도체주변에 자계가 형성되고, 전류가 흐르는 도체 가까이에 전류가 흐르는 다른 도체가 놓이게 되면 이 두개의 도체주위의 자계는 각 자계의 벡터 합이 된다. 두 전류가 반대 방향으로 흐르게 되면 도체사이의 공간에서 자속밀도는 증가하고 이를 두 도체 사이에는 로렌츠의 법칙에 따라 반발력이 발생한다. 이로 인해 두 도체는 멀어지게 된다. 또한 두 전류가 같은 방향으로 흐르게 되면 도체의 외부공간에서 자속밀도가 증가하고 이를 두 도체는 흡인력이 작용하게 된다. 이로 인해 두 도체는 서로 가까워진다. 흡인력과 반발력을 로렌츠 힘 또는 $J \times B$ 힘이라고 하며, J 는 전류밀도 B 는 자속이며 벡터곱 $J \times B$ 의 단위는 $[N/m^2]$ 이다. 변압기에서 전류밀도와 누설자속이 부하전류 $i(t)$ 의 선형함수로 표현 될 수 있으며, 권선에 작용하는 힘은 부하전류 $i(t)$ 의 제곱에 비례하는 함수가 된다. 즉 권선에 작용하는 힘은 직류성분과 부하전류 주파수의 두 배의 주파수를 갖는 교류성분을 지니게 된다.

2.3 실험 장치구성 및 규격

본 실험을 위한 장치는 반환부하장치, 가속도 센서, 전동주파수 측정장치로 구성되었다. 실부하와 동일한 조건을 갖게 할 수 있는 동순공급용 Induction Voltage Regulator(IVR)와 철순공급용 IVR 2대를 사용하여 정격전압과 정격전류를 훌릴 수 있도록 반환부하법을 선택하였고, 그림. 2의 회로도와 같이 실험장치를 구성하였다.[1]

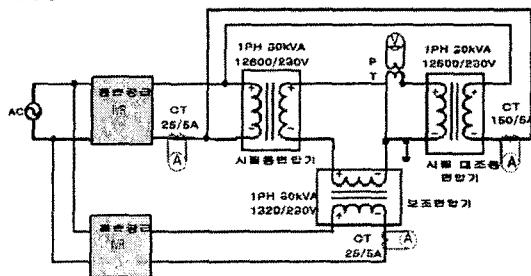


그림. 2 반환부하법의 시험회로도

진동신호를 측정하기 위해 2개의 가속도센서를 시험용 변압기의 코일과 외함의 연결장치부근 그리고 카바에 부착하였다. 가속도 센서의 부착모습을 그림. 3에 나타냈다.



그림. 3 가속도센서의 취부위치

소음진동신호를 저감시키기 위해서 코일(core and coil assembly)과 외함 사이의 고정 장치에 Belleville spring과 NBR를 삽입하고, 바닥에 코르크를 삽입하여 코일에서 발생되는 진동을 차단하여 제어변수를 변화시킴으로서 진동신호를 시간영역으로 측정하였다.

가속도 센서에 측정한 진동신호는 크기가 작아 A/D변환기의 입력레벨인 40[dB]까지 증폭하기 위해서 Pre-amp를 사용하였다. 진동파형을 측정하기 위해 LeCroy사의 500MHz 오실로스코프를 사용하여 진동파형을 측정하였고, 시간영역으로 측정된 데이터는 MATLAB을 이용하여 FFT 주파수 영역으로 변환하였다.

표. 1 Specification of Experimental Transformer

	실험대상 변압기	실험대조 변압기	동순공급용 변압기
상 수	1상	1상	1상
정격주파수	60Hz	60Hz	60Hz
정격용량	30 kVA	30 kVA	30 kVA
일차 전압	12600V 일단접지	12600V 일단접지	1320V
정격 전류	2.38A	2.38A	22.7A
이차 전압	230V	230V	230V
정격 전류	130.4A	130.4A	130.4A
%IMP	4.3%	4.4%	-
자속밀도	1.36Tesla	1.48Tesla	-

표. 2 Specification of Sensor

구분	특 성		측정범위 및 오차
	Voltage Sensitivity	100[mV/g]	
가속도 센서	Mounted Resonance	32[kHz]	
	Maximum Amplitude Range	50[g,peak]	
	Transverse Sensitivity	2% of axis	
	Frequency	3~10,000[Hz]	±5[%]
	Resonance	2~12,000[Hz]	±10[%]
온도 센서	Thermo-couple	-100 ~ 200 [°C]	

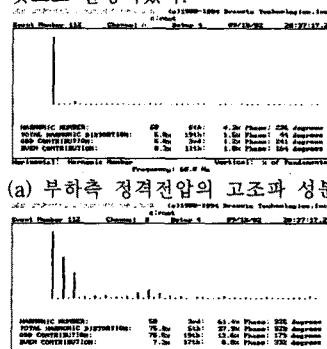
3. 실험 및 결과분석

변압기 진동신호의 경향을 분석하기 위한 수단으로 진동신호를 주파수분석하여 고조파 성분과 크기를 계산하였다. 변압기의 측정된 진동신호로부터 내부의 기계적 구조변화를 판단하기 위해서는 그 변압기의 진동신호를 오랫동안 관찰하면서 진동신호의 특성이 변화하는 경향을 살펴야 한다. 그런데 운전중인 변압기는 수시로 그 운전조건이 변화된다. 전압은 정격전압의 100±5[%]에서 변화되며 어떤 순간에는 이보다 큰 변동폭을 보일 수도 있다. 부하전류는 보통 정격부하의 30~60[%]에서 운전되지만 그 밖의 범위에서 운전될 때도 많이 있다. 또한 온도는 부하상태에 따라서 변화되고 더욱이 계절의 영향도 크게 받는다. 그런데 이를 세 변수로 분석된 진동신호의 각종 매개변수들은 표준운전상태를 설정하여 분석하였다. 표준운전상태는 실제로 변압기가 운전되는 시간이 가장 많은 운전상태, 예를들면 정격전압의 100[%]전압, 정격부하의 50[%]부하 및 철심 위부분의 온도가 64~70[°C]일 때로 정하였다.

표준운전상태를 기준으로 하여 소음진동을 저감시키기 위한 방법 제안하고자 한다. Type-A 방법으로 코일(core and coil assembly)과 외함 사이의 고정 장치에 Belleville spring과 NBR를 삽입했고, Type-B의 방법으로는 Type-A에서 변압기 내부의 바닥에 코르크판을 삽입하였다.

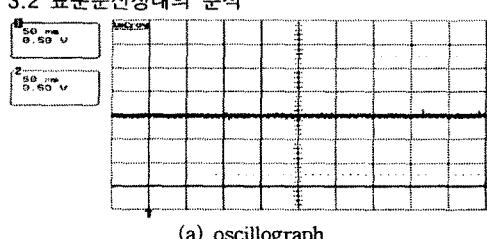
3.1 IVR의 고조파 측정

그림. 4는 IVR의 입력과 출력단자의 전압과 전류에 포함된 고조파 성분의 측정결과를 보여준다. (a)부하측의 정격전압에는 제5고조파 성분이 4.3%, (b)무부하시 여자전류의 고조파는 61.4%가 포함되어 있는 것으로 측정되었다. 그리고 전압이 높아질수록 고조파를 더 많이 포함하고 있는 것으로 판명되었다.

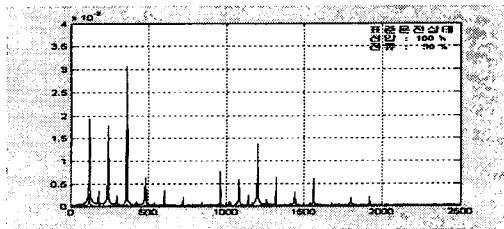


(b) 무부하시 여자전류의 고조파 성분
그림. 4 IVR의 입력과 출력단자의 전압과 전류에 포함된 고조파 성분

3.2 표준운전상태의 분석



(a) oscillograph



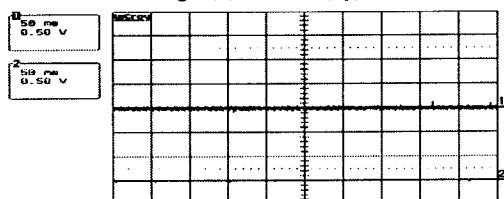
(b) FFT 과형

그림. 5 표준운전상태의 Oscillograph와 FFT waveform

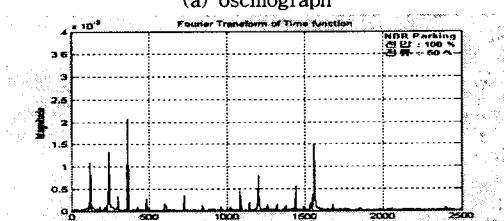
진동신호를 주파수영역에서 분석하기 위하여 측정된 신호를 FFT방법을 사용해서 스펙트럼을 구했다. 그림. 5는 표준운전 상태의 측정신호의 과형과 주파수 스펙트럼 분포를 나타내고 있다. 앞에서 살펴보았듯이 변압기의 진동원인은 철심에 작용하는 자기유력과 권선에 작용하는 전자력이다. 이 힘의 크기와 작용점을 정확히 계산하는 것은 현실적으로 불가능하다. 어쨌든 이를 힘이 복합적으로 작용하여 변압기를 진동시키게 되며, 그 기본 주파수가 120[Hz]이고 그 고조파 성분이 섞인 정현파이다.[5] 120[Hz]를 기본 주파수로 하여 제 20 고조파까지 분석하였으며, 60[Hz]와 그 이상의 고조파도 존재하나 그 크기가 미약하므로 분석 대상으로는 삼지 않았다.

그림. 5 표준상태에서의 주파수 스펙트럼은 제 1~5 고조파와 제 8~13 고조파 영역을 중심으로 비교하였다. 제 1~5 고조파 영역은 철심의 고조파 차수에 의한 진동에 그리고 제 8~13 고조파 영역은 공진이나 기계적인 진동에 의한 것으로 판단되며, 제3고조파의 영향이 제일 크게 나타났다. 그러나 제 8~13 고조파의 영역이 인간이 느끼는 가청주파수 범위에 속해 있으므로 소음저감을 위해서는 제 8~13 고조파 성분의 크기를 줄여야 할 것이다.

3.3 NBR Packing 취부 변압기 (Type-A)



(a) oscillograph

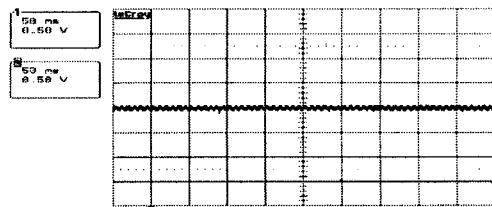


(b) FFT 과형

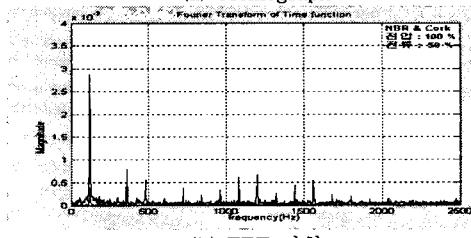
그림. 6 NBR Packing 취부 변압기(Type-A)의 Oscillograph와 FFT waveform

그림. 6은 코일(core and coil assembly)과 외함 사이의 고정 장치에 Belleville spring과 NBR를 삽입한 변압기의 측정파형과 주파수 스펙트럼이다. (b)의 FFT 분석 과형을 보면, 전체적으로 그 크기가 감소하였으나 제 13 고조파 성분 1560 [Hz]은 2배로 증가하였다.

3.4 NBR Packing and Cork 취부 변압기 (Type-B)



(a) oscillograph



(b) FFT 과형

그림. 7 NBR Packing and Cork 취부 변압기 (Type-B)의 Oscillograph와 FFT waveform

그림. 7은 Type-A의 조건에 변압기 내부의 밀바닥에 코르크판을 취부한 변압기의 측정파형과 주파수 스펙트럼이다. (b)의 FFT 분석파형을 보면, 기본 주파수 성분 120 [Hz]가 약 1.5배 증가하는 대신 다른 고조파 성분들은 현저히 감소했다. 특히, 소음과 관련되는 인간의 가청 주파수 대역에 속하는 제 8~13 고주파 성분대역의 주파수 성분 크기가 감소하는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 변압기 내부에 NBR Packing과 Cork 판을 취부 함으로서, 변압기의 코일에서 발생된 진동이 탱크 벽으로 전달되는 것을 감소시키고, 그 결과 소음을 감소시키는 방법을 제안하였다. 실험결과의 스펙트럼에서 보였듯이, 표준운전상태의 변압기에 단계적으로 흡음재를 취부시킨 결과 스펙트럼 성분 또한 단계적으로 감소하였다.

Type-A 경우의 시료변압기는 전체적인 주파수 성분의 감소효과를 보였다. Type-B 경우의 시료변압기는 기본주파수 성분인 120[Hz] 성분만 표준운전상태보다 1.5 배 증가하고, 모든 고주파 성분들의 감소를 가져왔다.

본 논문에서 제안한 방법은 변압기의 구조를 변경하지 않고, 제조과정에서 간단히 흡음재를 취부할 수 있으며, 저비용으로 변압기의 소음을 감소시킬 수 있는 방법이다. 앞으로 다른 여러 가지 흡음재들의 특성을 연구하고, 변압기 제조과정에서부터 이 방법으로 제조된다면 변압기의 소음감소 효과가 더욱 커질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국전기연구원의 연구비 지원으로 진행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] 정종우, “롤드변압기 예방진단을 위한 진동신호 분석”, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1997
- [2] Leonard Meirovitch, “Analytical Method in Vibration”, The Macmillian Company, 1967
- [3] H. G. Natke, “Identification of Vibrating Structure”, Springer-Verlag, 1982
- [4] B. Weiser, et al, “Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise Transformer Cores”, IEEE transactions on magnetics, vol 36, No. 5, 2000
- [5] 한국전력공사 기술연구원 보고서, “변압기 권선고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발연구”, 1994