

몰드변압기 진동신호의 FFT 및 시계열 계수 분석

(FFT and AR Coefficient Analysis of Vibration Signal in Mold Transformer)

정용기* · 정종욱** · 김재철*** · 곽희로***

(Young-Ki Chung · Jong-Wook Jung · Jae-Chul Kim · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 몰드변압기 예방진단을 위해 정상상태와 비정상상태 몰드변압기의 진동신호의 FFT 및 시계열 분석에 관해 연구하였다.

실험을 위한 제어변수들로 공급전압, 부하전류 및 주위온도를 변화시키면서, 진동신호 크기, 주파수 스펙트럼 및 시계열 계수와 같은 측정변수들을 분석하였다. 제어변수 변화에 의한 진동신호는 권선표면과 철심에 부착된 가속도센서로 측정되었으며, 이 신호들은 증폭기를 거쳐 데이터 수집장치에서 측정변수들로 계산되었다. 또한, 정상상태 분석 후, 몰드변압기의 구조적 변형을 모의하였다. 비정상상태 진동신호는 정상상태와 같은 제어변수 변화에 의해 측정되었다.

연구 결과, 정상상태와 비정상상태 진동신호는 수직진동신호와 수평진동신호를 비교하여 분석함으로써 구별이 가능하였다.

Abstract

This paper describes the FFT and coefficient analysis of vibration signals for preventive diagnosis of a mold transformer at normal and abnormal state.

Varying applied voltage, loading current and temperature as control variables for the experiment, measurement variables such as magnitude of vibration signals, frequency spectrum and time series coefficient were analyzed. The vibration signals by variation of control variables were measured by acceleration sensor adhered on the surface of winding and core, and measurement variables were calculated using data acquisition system. After analyzing the normal state, the structural distortion was also simulated. The vibration signals at abnormal state were measured by the same control variables variation as the normal state.

As a result, vibration signals between normal and abnormal state could be distinguished by comparison of the perpendicular and horizontal vibration signal.

* 정희원 : 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정

** 정희원 : 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정

*** 정희원 : 숭실대 공대 전기공학과 교수

접수일자 : 1998. 9. 18

1. 서론

본 논문 연구배경은 최근 몰드변압기 수요 증가에 따른 예방진단 기술의 필요성에 의한 것이다.

현대사회에서 필수적인 전기에너지를 변성하는 변압기는 고전압·대용량화와 성능향상이 요구된다. 이는 전기설비에 대한 안전성과 신뢰성을 의미하며, 옥내 경우, 방재성, 소형, 저소음 이외에도 환경보전, 보수성, 에너지 절감 등이 추가로 요구된다. 이 중 방재성이란 화재에 대한 안전성으로, 변압기 건식화의 의미를 내포한다.[1]

몰드변압기는 이러한 요구에 부응하는 전력설비로서, 고체 절연방식이 갖는 제반 장점 때문에 기존 유입변압기와 대체되어 사용범위가 확장되어 왔다. 그러나 이러한 추세에도 불구하고, 몰드변압기 이상징후에 대한 예방진단 기술은 유입변압기에 비해 미비한 실정이며, [2] 전력계통 신뢰도 향상 차원에서 그 필요성은 날로 증가하고 있다.

전철에 사용되는 몰드변압기 사고 경우, 대부분은 진동용력을 포함한 제반 용력 복합작용으로 유발되어, 표면균열로 발전한다. 표면균열 정도는 진동신호 변화와 연관되며, 공급전압, 부하전류를 포함한 제반 제어변수에 의해 변화한다.

본 논문은 진동신호 분석법을 이용하여, 제어변수에 의한 진동신호를 측정하였으며, 세 측정변수를 정상상태와 비정상상태로 나누어 분석하였다.

2. 진동신호 분석이론

2.1 진동발생

몰드변압기 권선은 Lorentz 힘을 받으며, 이는 전류밀도 \vec{J} 와 누설자속밀도 \vec{B} 의 외적으로서, 힘 밀도 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 로 표현된다. 몰드변압기에 작용하는 힘은 여러 고조파 성분이 합성되어, 몰드권선 및 철심 진동으로 나타난다. 부하전류 $i(t)$ 는 무한 푸리에급수에 의해 표현되며, 기본 각주파수 ω_0 의 주기함수다. 예를 들어 $\beta_{2n+1} = (2n+1)\omega_0 t + \delta_{2n+1}$ 이고, δ_{2n+1} 는 위상이동일 때, 전류 $i(t)$ 가

$i(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} I_{2n+1} e^{j\beta_{2n+1}} \right\}$ 로 주어지는 경우를 가정하고, 처음 세 번째까지 고조파를 취해 $i(t)$ 를 근사하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$i(t) = \text{Re} \{ I_1 e^{j\beta_1} + I_3 e^{j\beta_3} + I_5 e^{j\beta_5} \} \quad (1)$$

대수적 처리에 의해, 힘 밀도 $\vec{F}(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

힘 밀도는 식 (2)와 같이, 교류성분과 함께 직류성분도 지니고 있다. 기본주파수는 $2\omega_0$ 로서 전류 기본주파수의 2배이고, $2\omega_0$ 의 모든 고조파가 $8\omega_0$ 까지 존재한다.[3],[4]

$$\begin{aligned} \vec{F}(t) = & \frac{1}{2} \text{Re} \{ F_1^2 + F_3^2 + F_5^2 \\ & + F_1^2 e^{j2\beta_1} + F_3^2 e^{j2\beta_3} + F_5^2 e^{j2\beta_5} \\ & + F_1 F_3 e^{j(\beta_1 + \beta_3)} + F_1 F_3 e^{j(\beta_1 - \beta_3)} \\ & + F_1 F_5 e^{j(\beta_1 + \beta_5)} + F_1 F_5 e^{j(\beta_1 - \beta_5)} \\ & + F_3 F_5 e^{j(\beta_3 + \beta_5)} + F_3 F_5 e^{j(\beta_3 - \beta_5)} \} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 진동신호 크기

시변 진동신호는 시간영역에서 분석이 정량화될 필요가 있다. 본 논문은 진동신호 크기 표현을 위해, 에너지양 평균치를 나타내는 실효치로 정량화하였다. 실효치를 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{x_i^2}} \quad (3)$$

여기서, N 은 측정 데이터 샘플 개수이며, $\overline{x_i}$ 는 바이어스가 제거된 i 번째 샘플 데이터 크기이다.[4],[5]

2.3 주파수 스펙트럼

센서로 측정되고, Transducer에서 변환된 진동신호는 FFT를 통해 진동파형 주파수 스펙트럼으로 표현되며, 상대적 크기 비교로 변압기 비정상상태를 구별할 수 있다. FFT 변환 결과는 복소수 형태를 취하므로, 다음 수식으로 상대적 크기를 비교한다.

주파수 스펙트럼 상대적 크기

$$M(\omega_i) = 20 \log_{10} (p(\omega_i)) \text{ [dB]} \quad (4)$$

여기서, $p(\omega i) = \sqrt{p_r(\omega i)^2 + p_i(\omega i)^2}$ 이며, p_r 은 FFT 변환 결과 실수부이고, p_i 는 허수부이다.[2],[4]

2.4 시계열 계수

입출력 모형화 기법은 변압기 구조적 변형을 감지하는데 유용하며, 모형화 대상을 미지함수로 보고, 입력과 출력만으로 시스템 모형을 구하는 것이다. 출력이 입력에 대해 선형이라고 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(q)y(n) = B(q)u(n) + C(q)e(n) \quad (5)$$

여기서, $A(q)$, $B(q)$ 및 $C(q)$ 는 시스템에 따라 정해지는 다항식으로, q 는 지연소자이며, 다음과 같이 나타내어진다.

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_m q^{-m} \quad (6)$$

$$B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m} \quad (7)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_m q^{-m} \quad (8)$$

$u(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 입력과 출력이다. $e(n)$ 은 외부잡음 및 측정오차가 원인인 잡음신호이다. 잡음 $e(n)$ 이 입력 $u(n)$ 및 출력 $y(n)$ 과 서로 상관관계가 없으면, 다음 식이 성립한다.

$$E[y(n)e(n-k)] = 0. \quad k = 0, 1, 2 \dots n \quad (9)$$

$$E[u(n)e(n-k)] = 0. \quad k = 0, 1, 2 \dots n \quad (10)$$

$$E[e(n)e(n-k)] = 0. \quad k = 0, 1, 2 \dots n \quad (11)$$

식 (5)는 다음과 같이 단순화된다.

$$A(q)y(n) = B(q)u(n) + e(n) \quad (12)$$

변압기 진동은 여러 입력의 복합적 작용에 의해 발생하므로, 입력을 고려하지 않고, 출력만으로 시스템을 모형화하면, 식 (12)는 다음과 같다.

$$A(q)y(n) = e(n) \quad (13)$$

다항식 $A(q)$ 를 풀어서, 식 (13)을 다시 쓰면, 다음과 같다.

$$y(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_m y(n-m) = e(n) \quad (14)$$

시계열 계수 a_i 를 다음과 같이 벡터로 정의한다.

$$\theta^T = [-a_1, -a_2, \dots, -a_m] \quad (15)$$

식 (15)를 식 (14)에 대입하면, 다음과 같다.

$$y(n) = \theta^T \Phi(n) + e(n) \quad (16)$$

여기서, $\Phi(n)$ 은 다음과 같이 정의되는 벡터이다.

$$\Phi^T(n) = [y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-m)] \quad (17)$$

측정치 $y(n)$ 과 $\Phi(n)$ 으로부터, 모형화 오차 $e(n)$ 을 최소로 하는 θ^* 를 구하기 위해, 평가함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = \sum_{n=n_0}^N [e(n)]^2 \quad (18)$$

그런데 식 (16)에서 $e(n)$ 은

$$e(n) = y(n) - \theta^T \Phi(n) \quad (19)$$

이므로, 이를 식 (18)에 대입하면, 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \sum_{n=n_0}^N [y(n) - \theta^T \Phi(n)]^2 \quad (20)$$

평가함수 J 를 최소화하는 θ 를 구하기 위해, J 를 θ 로 편미분한 값을 0으로 놓으면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = 2 \sum_{n=n_0}^N [y(n) - \theta^{*T} \Phi(n)] \Phi(n) = 0 \quad (21)$$

이를 정리하면, 식 (22)와 같은 정규방정식을 얻는다.

$$\Phi \Phi^T \theta^* = \Phi Y \quad (22)$$

여기서, Φ 와 Y 는 다음과 같다.

$$\Phi = [\Phi(n), \Phi(n-1), \dots, \Phi(n_0)]^T \quad (23)$$

$$Y = [y(n), y(n-1), \dots, y(n_0)] \quad (24)$$

이제 $\Phi\Phi^T = R$, $\Phi Y = r$ 이라 놓으면, θ^* 는 식 (25)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta^* = R^{-1}r \quad (25)$$

식 (22) 또는 식 (25)와 같이 시스템 시계열 계수 θ^* 를 구하는 방법을 최소자승(Least Square : LS) 법이라 한다. θ^* 는 변압기의 구조적 비정상 유무를 구별하는 측정변수로서, θ^* 의 변화정도를 분석하여, 정상상태와 비정상상태를 구별할 수 있다.[3]~[10], [11]~[13] 시계열 계수와 측정 변수와의 관련성으로 θ^* 는 측정 변수중 시계열 계수와 관련되며, θ^* 는 몰드 변압기의 구조적 변형을 검출할 수 있는 요소이다.

3. 장치구성 및 실험방법

3.1 실험개요

본 실험을 위한 장치는 반환부하장치, 가속도센서, 데이터 수집장치로 구성되었다. 부하모의를 위해, 반환부하법을 사용하고, 제어변수로 공급전압, 부하전류, 주위온도 변화 및 비정상상태를 모의하였다. 제어변수에 의한 진동신호는 가속도센서로 측정되었다. 가속도센서는 공급전압과 부하전류를 고려하여, 몰드 변압기 저압권선 수직, 수평방향과 철심 모서리 상부에 부착하였다. 측정된 진동신호는 데이터 수집장치에서 크기, 주파수 스펙트럼, 시계열 계수와 같은 측정변수로 계산되었다.

정상상태 분석 후, 비정상상태 진동분석을 위해, 몰드변압기의 구조적 변형을 모의하였다. 권선 수직, 수평방향 크랙을 모의하기 위해, 지지블럭을 제거하였으며, 철심클램프를 이완하여 변압기 단락사고시의 철심 박판간 팽창을 모의하였다. 이와 같은 구조적 변형을 모의하고, 정상상태와 같은 제어변수로 비정상상태 측정변수를 분석하였다.

3.2 실험설계

실험설계는 제어변수와 측정변수로 나누어 적용하였다.

현장 설치된 변압기 운전전압은 정격의 $100 \pm 5\%$ 범위이고, 부하전류는 정격의 30[%]부터 60[%]까지

이다. 그러나 본 실험 목적은 몰드변압기 진동신호를 분석하여, 정상상태와 비정상상태 측정변수의 변화경향을 비교하는 것에 있으므로, 0~110[%] 범위 공급전압(0~14,520[V]) 및 부하전류(0~143.3[A])를 제어변수로 사용하였다.

표 1. 변수
Table 1. Variables

변수 종류	범 위		비 고
제어변수	공 급 전 압	0[%] ~ 110[%]	정상상태 제어후 고장상태 제어
	부 하 전 류	0[V]~14,520[V] 0[A]~143.4[A]	
	주 위 온 도	10[°C], 25[°C]	
측정변수	진동신호 크기	제어변수 변화에 의해 측정	정상상태 분석후 고장상태 분석
	진동신호 주파수 스펙트럼		
	진동신호 AR 계수		

제어변수는 각 공급전압에 대해, 부하전류를 0[%]부터 110[%]까지 10[%]씩 증가시키면서, 각 상태에서 진동신호를 취득하여, 측정변수들을 계산하였다. 주위온도 변화시 제어변수로서 10[°C]에서 실험하였으며, 몰드변압기가 옥내 설치되는 점을 감안하여, 25[°C]에서도 10[°C]와 같은 방법으로 분석 후, 비교하였다. 표 1에 실험에 적용된 제어변수와 측정변수를 나타내었다.

3.3 장치규격

실험용 몰드변압기에 사용된 에폭시수지는 스위스 Ciba-Geigy사의 제품으로 전기·기계적 특성향상을 위해, 충전재를 첨가하였으며, 표 2에 재료구성을 나타내었다.

표 2. 실험용 몰드변압기 재료구성
Table 2. Material component of experimental mold transformer

구성	Resin	Hardener	Flexibilizer	Accelerator	Color paste
재료	CY205 (Araldite F)	HY905	DY040	DY062	DW0 133(red)

실험용 변압기로 동일 규격 몰드변압기 2대(실험용, 대조용)와 유입변압기 1대를 사용하였으며, 표 3

물드변압기 진동신호의 FFT 및 시계열 계수 분석

에 규격을 나타내었다.

저압권선 및 철심진동신호 측정을 위해, Wicoxon Research사의 고감도 앰프내장형 가속도센서를, 저압 권선 표면온도 및 주위온도 측정을 위해, 열전쌍 센서를 사용하였으며, 표 4에 규격을 나타내었다.

가속도센서에서 측정된 진동신호는 크기가 매우 작으므로, A/D 변환기 입력레벨인 40[dB]까지 증폭하기 위해, Pre-Amp를 사용하였다.

또한 VT 및 CT 출력은 각각 110[V] 및 5[A]이므로, A/D 변환기 입력레벨까지 직류변환을 위해, 전압, 전류 Transducer를 사용하였으며, 표 5에 규격을 나타내었다.

표 3. 실험용 변압기 규격
Table 3. Specification of experimental transformer

구분	구격	물드변압기	유입변압기
상수		1 ϕ	1 ϕ
정격용량		30[kVA]	30[kVA]
일차정격	전압	13,200[V]	1,320[V]
	전류	2.2[A]	22[A]
이차정격	전압	230[V]	230[V]
	전류	130.4[A]	13.04[A]
주파수		60[Hz]	60[Hz]
%임피던스 전압		5.67[%]	-

표 4. 센서 규격
Table 4. Specification of sensor

구분	특성	측정범위 및 오차
가속도센서	Voltage Sensitivity	100[mV/g]
	Mounted resonance	32[kHz]
	Maximum amplitude range	50[g·peak]
	Transverse sensitivity	2[% of axial]
	Frequency resonance	3~10,000[Hz]
2~12,000[Hz]		±10[%]
열전쌍센서	시즈형	-100~200[°C]

Pre-Amp 및 Transducer의 Analog 출력신호를 Digital 신호로 변환하기 위해, A/D 변환기를 사용하였으며, 표 6에 규격을 나타내었다.

표 5. 증폭기 규격
Table 5. Specification of amplifier

구분	구격	입력범위	출력범위	제어전원	정밀도
Pre-Amp	전압 Transducer	AC 0~150[V], 60[Hz]	DC 4~20[mA]	AC 110/220[V]	0.25[%]
	전류 Transducer	AC 0~150[V], 60[Hz]	DC 4~20[mA]	AC 110/220[V]	0.25[%]
Main-Amp	열전쌍센서	-50~200[°C]	DC 1~5[V]	AC 110/220[V]	-
	가속도센서 (P-unit)	· Voltage to Transducer : DC 27[V] · Current to Transducer : 2.4[mA] · Maximum Input Voltage : 10[V _{RMS}]			
Main-Amp		· 증폭율 : 100배 · Channel 수 : 8[channel] · 제어전원 : AC 110[V], 60[Hz]			

표 6. A/D 변환기 규격
Table 6. Specification of A/D converter board

구분	구격		
Bus	IBM PC Bus		
I/O port addr.	200H~2F0H(16가지 DIP 선택)		
크기	220×100[mm]		
입·출력 Channel	Analog	입력면	16[channel] Single-ended
		출력면	2[channel]
	Digital	입력면	16[channel]
		출력면	16[channel]
Digital 입·출력	· 16 ch. TTL Input/Output · 구동능력 : 15 TTL		

3.4 장치구성

부하시험시 일부하시험은 비용면과 제어면에서 실행하기 곤란하므로, 실험용 변압기에 철손과 동손을 따로 공급하여, 일부하시험과 같은 효과를 얻는 허부하시험법을 이용하였다. 정격이 같은 두 변압기를 같은 전원에 같은 극성끼리 결선하면, 두 변압기는 상호 부하가 되고, 고압회로 순환전류는 0[A]이다.

순환전류는 고압회로 임피던스 전압 이하의 전원 전압 공급에 의해 증가한다. 이와 같이, 두 변압기 내에서 소비되는 손실의 외부 공급에 의해 일부하를 모의하는 것을 반환부하법이라고 하며, 그림 1에 회

로도를 나타내었다.

몰드변압기 진동신호 측정을 위해, 저압권선 표면의 수직, 수평방향 및 철심에 각각 가속도센서를 부착하였으며, 저압권선 표면과 주위온도 측정을 위해, 2개 열전쌍 센서를 저압권선 표면과 실험장치 외부에 각각 설치하였다.

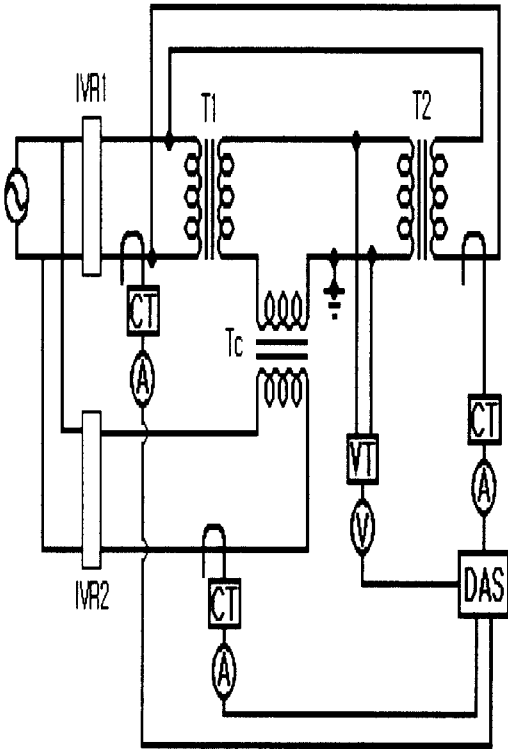


그림 1. 반환부하법 회로도
Fig. 1. Circuit diagram of loading back method

실험장치는 실험용 변압기로 1 ϕ 30[kVA] (13,200/230[V]) 몰드변압기 2대와 동손 공급을 위한 1 ϕ 30[kVA] (1,320/230[V]) 유도변압기 1대로 구성하였으며, 변압기 전원공급을 위해, 1 ϕ 15[kVA] (입력 : 200[V], 출력 : 0~300[V]) 유도전압조정기(IVR) 2대(동손 및 철손공급용)를 그림 1과 같이 결선하였다. 또한, 변성 및 계측장치로서, 고압측 전압 변성을 위해, 13,200/110[V] VT를, 부하측과 공급전류 변성을 위해, 150/5[A] CT 1[EA]와 25/5[A] CT 2[EA]를 설

치하였으며, VT와 CT 2차측에는 전압계, 전류계를 연결하였다.

가속도센서에 의해 측정된 진동신호는 Pre-Amp와 Main-Amp에서 증폭되어, PC 확장보드에 삽입된 A/D 변환기 입력이 되며, 실험용 변압기 2차측 전압, 전류도 각각 VT와 CT를 거친 후, Transducer에 의해 직류로 변환되어, A/D 변환기 입력이 된다. 몰드권선 표면온도와 외부온도를 측정하기 위해, 열전쌍센서를 설치하였으며, 열전쌍센서에서 측정된 온도신호는 Main-Amp를 거쳐, A/D 변환기 입력이 된다. 그림 2에 진동신호 흐름도를 나타내었다[4].

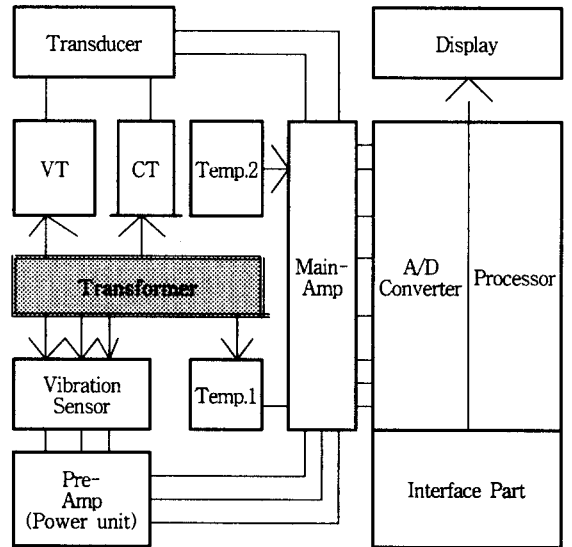


그림 2. 진동신호 흐름도
Fig. 2. Flow diagram of vibration signal

3.5 실험방법

진동신호 분석을 위한 제어변수 변화는 각 공급전압(0[%]~110[%] : 0[V]~14,520[V])에 대해, 부하전류를 0[%](0[A])에서 110[%](143.4[A])까지 10[%]씩 증가시키면서, 각 상태별로 측정변수인 진동신호 크기, 주파수 스펙트럼, AR 계수 변화 경향을 분석하였다. 주위온도는 25[$^{\circ}$ C]에서 실험하였으며, 비정상상태 진동신호 분석을 위해, 단철과 철심을 조이는 4개 철심클램프를 이완시키고, 권선 지지블럭을 제거하여, 비정상상태를 모의하였다. 이러한 상태에서 측정된

진동신호를 정상상태와 같은 측정변수로 분석하여, 정상상태와 비교하였다.

진동신호 분석에 있어, 비정상상태를 구별하기 위해, 기준이 되는 정상상태 진동신호 측정오차가 작아야 한다. 오차 경감을 위해, 본 실험은 제어변수 변화시 진동신호가 안정되는 11번째부터 15번째까지 5번의 데이터 평균치를 취하였으며, 잡음신호에 의한 영향을 최소로 하기 위해, 실험은 야간에 진행되었다.

4 실험결과 및 분석

4.1 진동신호 크기

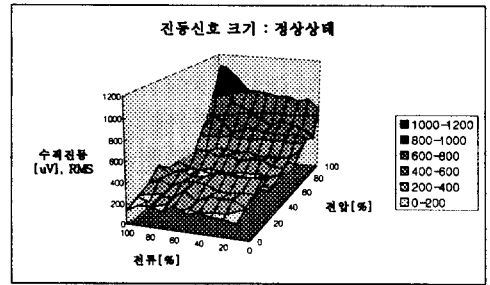
정상상태 진동신호 크기는 수직진동 및 철심진동 경우, 부하전류보다 공급전압에 의해 증가하였으며, 수평진동은 공급전압이 낮을 경우, 부하전류에 의해, 부하전류가 낮을 경우, 공급전압에 의해 증가했지만, 이들 제어변수치가 높아질수록 크기가 일정하지 않았으며, 전체적으로 굴곡이 심한 특징을 나타내었다. 그림 3에 주위온도 25[°C]에서 측정된 정상상태 진동신호 크기를 나타내었다.

비정상상태 진동신호 크기는 수직진동의 경우, 정상상태와 달리 공급전압보다 부하전류에 의해 증가하였으며, 수평진동은 공급전압과 부하전류에 의해 증가하였고, 정상상태와 달리 굴곡이 작았으나, 공급전압과 부하전류가 함께 증가할수록 진동신호 크기는 정상상태보다 크게 증가하였다. 철심진동은 정상상태와 달리 공급전압이 낮을 경우, 부하전류에 의해, 부하전류가 낮을 경우, 공급전압에 의해 증가하였으나, 이들 제어변수치가 증가할수록 크기가 완만하게 변화하였으며, 전체적으로 굴곡이 심한 특징을 나타내었다. 정상상태와 비교시, 비정상상태 진동신호는 수평진동신호만이 공급전압과 부하전류 동시 증가에 의해 진동신호 크기가 증가할 뿐, 수직진동과 철심진동신호 크기 변화는 미소하였다. 그림 4에 주위온도 25[°C]에서 측정된 비정상상태 진동신호 크기를 나타내었다.

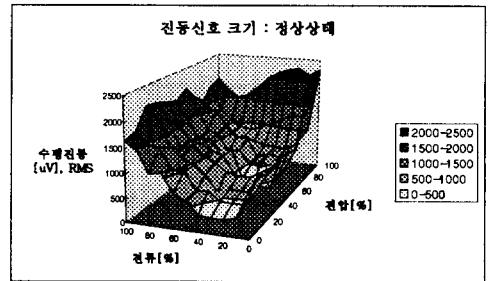
4.2 분석

측정된 진동신호 크기, 주파수, 시계열 계수 분석 결과를 표 7, 표 8, 표 9에 나타내었다.

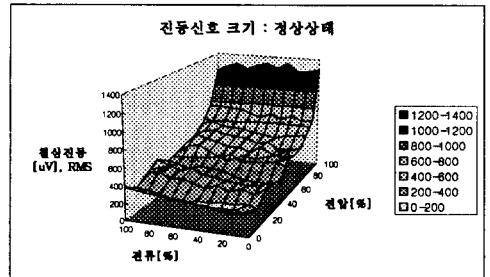
표 7에서 알 수 있듯이, 정상상태와 비정상상태 구별은 수직진동신호 크기와 철심진동신호 크기를



(a) 수직진동



(b) 수평진동



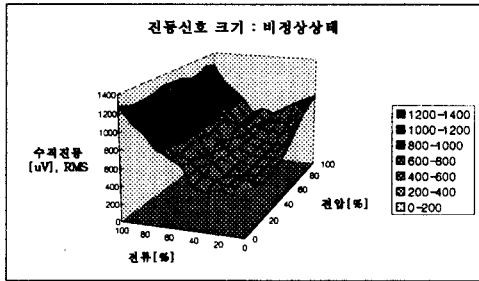
(c) 철심진동

그림 3. 정상상태 진동신호 크기

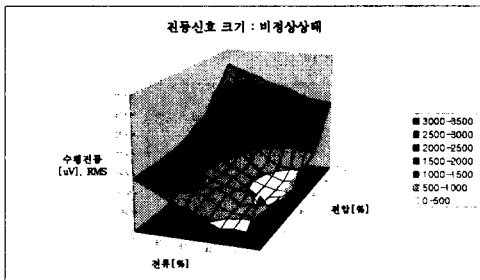
Fig. 3. Magnitude of vibration signal at normal state

비교함으로써 가능하였다. 진동신호 크기는 수직진동 경우, 정상상태에서는 공급전압에 의해 증가했지만, 비정상상태에서는 부하전류에 의해 증가하였다. 또한 철심진동신호 크기 경우, 정상상태에서는 공급전압에 의해서만 증가했지만, 비정상상태에서는 공급전압은 물론 부하전류에 의해서도 증가하였다.

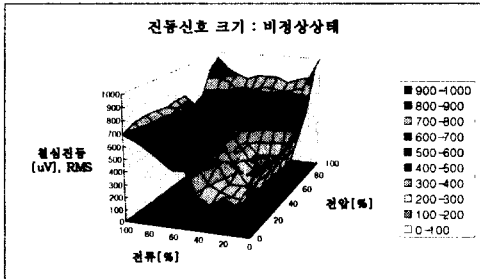
표 8에서 알 수 있듯이, 진동신호 주파수 스펙트럼 분석에 의한 정상상태와 비정상상태 구별은 수직진동과 수평진동신호 주파수 스펙트럼을 비교함으로써 가능하였다. 비정상상태 진동신호의 주파수 스펙트럼은 수직진동 경우, 90[%] 공급전압에서 480[Hz]



(a) 수직진동



(b) 수평진동



(c) 철심진동

그림 4. 비정상상태 진동신호 크기
Fig. 4. Magnitude of vibration signal at abnormal state

와 720[Hz]가 증가하였고, 정상상태 수평진동 경우, 90[%] 공급전압에서 600[Hz]가 급증하였다.

또한 표 9에서 알 수 있듯이, 진동신호 시계열 계수 분석에 의한 정상과 비정상상태 구별은 수직진동 신호 시계열 계수를 비교함으로써 가능하였다. 수직 진동신호 경우, 정상상태시 공급전압에 의해 시계열 계수 a0, a1, a2, a3 절대치가 증가하였으나, 비정상 상태시는 시계열 계수 a0, a3 절대치가 증가하였다.

표 7. 진동신호 크기 분석

Table 7. Magnitude analysis of vibration signal

구 분		공급 전압	부하 전류	주위 온도 (25[°C])	정상상태와 구별
정상상태 진동	수직	크기 증가	불 변	불 변	정상시 : 공급전압에 의해 증가 고장시 : 부하전류에 의해 증가
	수평	크기 진류에서 증가	낮은 전압에서 증가	불 변	
	특징	굴심 곡함	굴심 곡함	.	
철심	크기 증가	불 변	불 변		
비정상상태 진동	수직	크기 불 변	증 가	불 변	정상시 : 공급전압에 의해 증가 고장시 : 부하전류에 의해 증가
	수평	크기 증가	증 가	불 변	
	특징	경사 완만	경사 완만	.	
철심	크기 증가	증 가	불 변	정상시 : 공급전압에 의해 증가 고장시 : 부하전류에 의해서도 증가	
특징	굴심 곡함	굴심 곡함	.		

표 8. 진동신호 주파수 스펙트럼 분석

Table 8. Frequency spectrum analysis of vibration signal

구 분		공급 전압	부하 전류	주위 온도 (25[°C])	정상상태와 구별
정상상태	수직 진동	크기 증가	미소 변화	불 변	정상시 : 공급전압에 의해 증가 고장시 : 부하전류에 의해 증가
	특징	80[%] 공급전압: 240[Hz] 증가	.	.	
	수평 진동	크기 증가	미소 증가	불 변	
특징	80[%]공급전압 : 240~720[Hz] 증가 (600[Hz] 제외) 90[%] 공급전압 : 600[Hz] 급증	60[Hz] 증가	.		
철심 진동	크기 증가	미소 변화	불 변	정상시 : 공급전압에 의해 증가 고장시 : 부하전류에 의해서도 증가	
특징	80[%] 공급전압: 240, 360[Hz] 증가	60[Hz] 감소	.		

구 분		공 급 전 압	부하 전류	주 위 온 도 (25[°C])	정 상 상 태 와 구 별	
비 정상 상 태	수 직 진 동	크 기	증 가	미 소 변 화	불 변	
		특 징	90[%] 공 급 전 압 : 480[Hz], 720[Hz] 증 가	.	.	90[%] 이 상 전 압 공 급 시 480[Hz], 720[Hz] 비 교 로 구 별 가 능
	수 평 진 동	크 기	증 가	미 소 변 화	불 변	90[%] 이 상 전 압 공 급 시 600[Hz] 비 교 로 구 별 가 능
		특 징	80[%] 공 급 전 압 : 240~840[Hz] 증 가 (단, 600[Hz] : 정 상 상 태 에 비 해 감 소)	60[Hz] 증 가	.	
	철 심 진 동	크 기	증 가	미 소 변 화	불 변	불 가
		특 징	90[%] 공 급 전 압 : 240[Hz], 360[Hz] 급 증, 720[Hz], 840[Hz] 증 가	.	.	

표 9. 진동신호 AR 계수 분석
Table 9. AR coefficient analysis of vibration signal

구 분		공 급 전 압	부하 전류	주 위 온 도 (25[°C])	정 상 상 태 와 구 별	
정 상 상 태	수 직 진 동	크 기	절 대 치 증 가	미 소 변 화	불 변	
		특 징	a ₀ , a ₁ , a ₂ , a ₃ 절 대 치 증 가	.	.	
	수 평 진 동	크 기	절 대 치 증 가	변 화	불 변	/
		특 징	a ₀ , a ₁ , a ₂ 절 대 치 증 가	a ₃ 까 지 절 대 치 변 화	.	
	철 심 진 동	크 기	절 대 치 증 가	불 변	불 변	/
		특 징	a ₁ , a ₃ 절 대 치 증 가	.	.	

구 분		공 급 전 압	부하 전류	주 위 온 도 (25[°C])	정 상 상 태 와 구 별	
비 정상 상 태	수 직 진 동	크 기	절 대 치 증 가	미 소 변 화	불 변	
		특 징	a ₀ , a ₃ 절 대 치 증 가	.	.	a ₁ , a ₂ 계 수 변 화 정 도 비 교 로 구 별 가 능
	수 평 진 동	크 기	절 대 치 증 가	미 소 변 화	불 변	불 가
		특 징	a ₀ , a ₁ , a ₂ , a ₃ 절 대 치 증 가	.	.	
	철 심 진 동	크 기	절 대 치 증 가	불 변	불 변	불 가
		특 징	a ₁ 절 대 치 증 가	.	.	

5. 결 론

몰드변압기 진동신호를 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 몰드변압기 진동신호 상대적 크기는 정상상태 시, 수직진동은 전압에 의해 증가하고, 수평진동은 전압과 전류에 의해 증가하였으며, 정상상태와 비정상상태 구별은 수직진동과 철심진동 크기를 비교함으로써 가능하였다.

(2) FFT 분석을 통한 주파수 스펙트럼은 부하전류보다 공급전압에 의해 증가하였으며, 정상상태와 비정상상태 구별은 수직진동과 수평진동의 주파수 스펙트럼을 비교함으로써 가능하였다.

(3) AR 계수는 부하전류보다는 공급전압에 의해 절대치가 증가하였고, 정상상태와 비정상상태 구별은 수직진동 AR 계수 비교에 의해 가능하였다.

(4) 실험에 사용한 몰드변압기 경우, 진동신호는 온도에 의해서는 영향이 없었다.

따라서 진동신호 분석에 의한 몰드 변압기의 예방 진단은 가능할 것으로 사료되며, 현장 적용시 주위 여건과 몰드 변압기 각각의 특성을 고려한다면, 타 몰드 변압기에 대한 예방진단도 충분히 가능할 것이라고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 細 溪 亨 正, 모-르-드 變 壓 器 의 保 護, 大 阪 變 壓 器 株 式 會 社,

- 1990.
- [2] 곽희로 외, 물드변압기의 방재 및 진단용 Monitoring System 개발에 관한 연구, 한국소방안전협회(연구보고서), pp. 51~105, 1997. 1.
 - [3] Juan Carlos Lavalle, "Failure Detection in Transformers Using Vibration Analysis," B.S. Iowa State University, pp. 20~26, 1984.
 - [4] 정찬수 외, 변압기 권선 고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발 연구", 한국전력공사 기술연구원(연구보고서), pp. 9~13, pp. 15~19, pp. 27~35, pp. 72~82, 1994. 12.
 - [5] 김영석, 진동신호 분석을 이용한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구, 송실대학교 대학원 석사학위 논문, 1995. 6.
 - [6] 貞川郁夫 외, モ-ルド變壓器の新しい展開, OHM, pp. 66~67, 1992. 6.
 - [7] 文字一郎 외, モ-ルド變壓器, pp. 26, 1981. 10.
 - [8] 김박윤, 예폭서수지, pp. 209, 1996. 6.
 - [9] 河村達雄 외, 電氣設備の診斷技術, 日本電氣學會, pp. 205~210, 1991. 10.
 - [10] 권혁승, 전력용 변압기 진동의 모형화, 송실대학교 대학원 석사학위 논문, 1993. 12.
 - [11] Jens Trampe Broch., Mechanical Vibration and Shock Measurements, Dipl. Ing. E.T.H., 1984.
 - [12] Daniel J. et. al., An Adaptive Model for Vibration Monitoring of Power Transformers, S.M. Thesis, Dept. of Mechanical Eng., M.I.T., Cambridge, MA, 1989.
 - [13] Leonard Meirovitch., Analytical Method in Vibrations, The McMillan Company, 1967.

본 연구는 사단법인 한국소방안전협회의 지원에 의해 수행되었습니다.

◇ 저자소개 ◇

정 용 기 (鄭龍基)

1952년 3월 5일생. 1976~1978년 미국 R.M PARSON ENGINEERING CO.(L.P.L) 1995년 송실대 대학원 전기공학과 박사과정, 의제전기설비연구원 대표, 미국 NFPA 정회원, 전기/소방기술사.

정 종 욱 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생. 1991년 송실대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 8월 송실대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

김 재 철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학과 교수.

곽 희 로 (郭熙魯)

1942년 3월1일생, 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 미국 MIT 방문교수, 현재 송실대 공대 전기공학과 교수. 당학회 부회장.