

진동 신호 분석을 이용한 전력용 변압기의 고장 판별

Fault Discrimination of Power Transformers using Vibration Signal Analysis

尹龍漢* · 柳治馨** · 金載哲*** · 鄭讚壽*** · 李廷鎮§

(Yong-Han Yoon* · Chi-Hyoung You** · Jae-Chul Kim*** · Chan-Soo Chung*** · Jung-Jin Lee§)

Abstract - In power transformers, vibration signals can occur at winding and core due to the change of current, voltage, and temperature and the deformation of winding and core. The deformation of winding and core occurs electromagnetic force induced by fault current in power systems. Therefore, the changes of vibration signals can be varied in power transformers. In fact, the trends of fundamental waves and higher harmonics of vibration signals are very different in normal or fault states of power transformers. We detect and analyze the changes of vibration signals and use them as a tool for fault diagnosis of power transformers. This paper presents fault discriminating possibility using the changes of fundamental waves and higher harmonics in power transformers. We showed the fault discriminating functions that are made at each case ; normal state and fault state. These functions are tested by the detected vibration signals, and we showed that the proposed method can discriminate the state of power transformers.

Key Words : Power Transformer, Fault Diagnosis, Vibration Signal, Fundamental Waves, Higher Harmonics, Trend Analysis, Fault Discriminating Function

1. 서론

전력 공급 신뢰도의 향상을 위해 전력용 변압기의 이상 징후를 관측하고, 고장을 미리 예측할 수 있는 진단 기법의 필요성이 점차 증가되고 있다. 전력용 변압기의 이상 징후로는 유중 가스의 증가, 부분 방전의 발생, 온도의 상승 및 진동 신호의 변화 등이 있다. 이 중 기계적 힘에 의한 구조 변화에 따른 징후로는 진동 신호의 변화가 가장 뚜렷하다. 전력 계통의 변압기 사고 중 대다수는 단락 및 지락 사고 시에 흐르는 고장 전류에 의한 것이며, 고장 전류에 의한 전자기력은 권선과 철심의 변형과 진동 신호의 변화를 가져온다. 따라서 전력용 변압기의 진동 신호를 상시 감시함으로써 고장을 예측할 수 있다.[1-8]

전력용 변압기의 진동 신호 분석에 대한 연구는 현재 미국에서 진행 중이다. 그 예로 MIT에서는 TMS(transformer monitoring system)라는 종합 예방 진단 시스템을 개발하여 그 중 진동 감시 시스템으로 진동 신호를 각각의 고조파로 분리시켜 전류에 대한 진동 신호의 상관 관계를 연구하고

있다.[1-3] 국내의 연구로는 진동 신호와 진동의 발생 원인인 전류, 전압 및 온도의 상관 관계를 수리적인 모형으로 수립하였다.[4] 또한 진동의 가장 큰 원인인 전류에 대한 변압기 권선의 진동 모형을 수립하였다.[5] 다른 예로는 전력용 변압기를 상시 감시할 수 있는 예방 진단 기법으로 측정된 진동 신호를 RMS(root mean square), 스펙트럼(spectrum), AR(auto regressive) 모델 계수 값의 3가지 측면에서 변화 경향을 분석하였다.[6-7] 그러나 이와 같은 연구에서는 고장 전과 고장 후의 진동 신호에 뚜렷한 차이가 있다는 것은 확인하였으나, 전압 및 전류의 영향인지, 혹은 고장의 영향인지는 판정하지 못하였다. 즉, 전력용 변압기의 고장 전(정상 상태)과 고장 후(고장 상태)에는 권선과 철심의 변형에 의해 같은 운전 조건에서도 진동 신호가 변화하는 것을 확인하였으나, 측정된 진동 신호의 변화가 운전 조건(전압, 전류 및 온도)에 의한 것인지, 전력용 변압기의 내부 구조 변화(고장 전류에 의한 철심과 권선의 변형)에 의한 것인지는 판정하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 특정 시점에서 측정된 진동 신호의 표본을 분석하여 운전 조건에 관계없이 전력용 변압기 내부 구조 변화의 유무, 즉 전력용 변압기의 고장 유무를 판정할 수 있는 방법을 연구하였다. 진동 신호의 크기를 다각도로 분석하여 전력용 변압기 운전 조건에 관계없이 고장 유무를 인식할 수 있는 고장 판별 함수를 유도하여 그 유용성을 검토하였다.

2. 진동 신호 분석과 실험 장치

* 正 會 員 : 崇實大 生産技術研究所 研究員 · 工博
 ** 正 會 員 : 崇實大 電子計算院 專任講師 · 工博
 *** 正 會 員 : 崇實大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 § 正 會 員 : 崇實大 自然科學大 情報統計學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1997年 12月 24日
 最終完了 : 1998年 11月 30日

2.1 진동 신호

전력용 변압기에서 발생하는 진동은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 철심 진동이 있다. 이는 자화(magnetization)에 의한 여기(excitation)와 공극(air gaps)에서 발생하는 여기로 나눌 수 있다. 공극 여기는 규소 강판의 판과 판 사이에서 발생하고, 모서리 끝에서도 발생한다. 두 번째로 권선 진동이 있다. 이는 누설 자속과 권선 전류의 상호 작용에 의해 발생하는 로렌츠힘에 의해 발생한다.[4-5]

2.2 실험 장치

본 연구의 진동 분석 시스템은 154[KV]급의 3상 45/60[MVA] 용량인 배전용 변전소의 주 변압기를 모의할 수 있도록 설계하였다. 따라서 주 변압기와 같은 특성을 갖는 변압기를 제작하여 실험을 해야 하나 이와 유사한 연구를 수행한 MIT에서도 보통의 주상 변압기를 대상으로 실험하였다. 즉, 용량은 50[kVA] 정도의 주상 변압기로 한국 전력 공사에서 쓰고 있는 일단 접지 변압기 대신 2부상 변압기를 선정하였다. 철심 형태도 주상 변압기의 권철심 대신에 적층형으로 선택하였고, 권선 외부에 가속도 센서를 부착할 수 있도록 고압 권선을 내측에, 저압 권선을 외측에 배열하였으며, 변압기의 형은 단상 외철형 구조로 설계하였다. 그림 1은 진동 신호를 검출하기 위한 가속도 센서가 부착된 실험용 변압기의 내부 구조를 나타내고 있다.

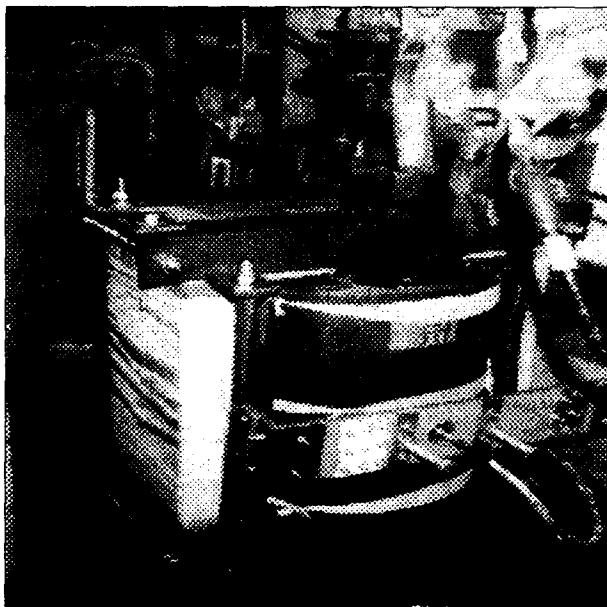


그림 1 실험용 변압기의 내부 구조
Fig. 1 Inside structure of experimental transformer

본 연구에서는 실험용 변압기의 부하를 변화시키기 위하여 반환 부하법을 사용하였으며 그림 2는 그 구조를 나타내고 있다. 그림 2와 같이 두 대의 변압기를 같은 전원에 같은 극성으로 연결하면 유기 전압의 크기가 서로 같고 방향이 반대이므로 고압 권선에 전류가 흐르지 않는다. 저압 권

선은 전원에서 자화 전류를 공급받으며, 전원에서 받은 전력은 두 변압기의 철손에 해당한다. 이 때 고압 회로에 임피던스 전압에 해당하는 교류 전원을 TR3을 통해 공급하면 평형이 깨진다. 공급된 교류 전원 전압의 변동은 고압 권선에 흐르는 순환 전류를 변화시켜 저압 권선에서 이에 비례하는 전류가 흐른다. 이와 같은 방법으로 두 변압기 내에서 소비되는 손실만을 외부로부터 공급함으로써 실 부하를 가한 것과 같이 모의하는 방법을 반환 부하법이라고 한다.[8]

실험 장치는 주 실험용 변압기로 단상 50[kVA](13200[V]/230[V]) 적 철심형 변압기(TR2), 그리고 같은 규격의 기준 변압기(TR1)로 구성되어 있다. 동손 공급을 위한 변압기는 단상 30[kVA](1320[V]/230[V]) 변압기(TR3)가 있고, 이 변압기 전원측과 철손 공급을 위한 전원은 단상 15[kVA](입력 : 200[V], 출력 : 0[V]~300[V])인 유도 전압 조정기(IVR : induction voltage regulator) 2대가 그림 2와 같이 연결되어 있다.

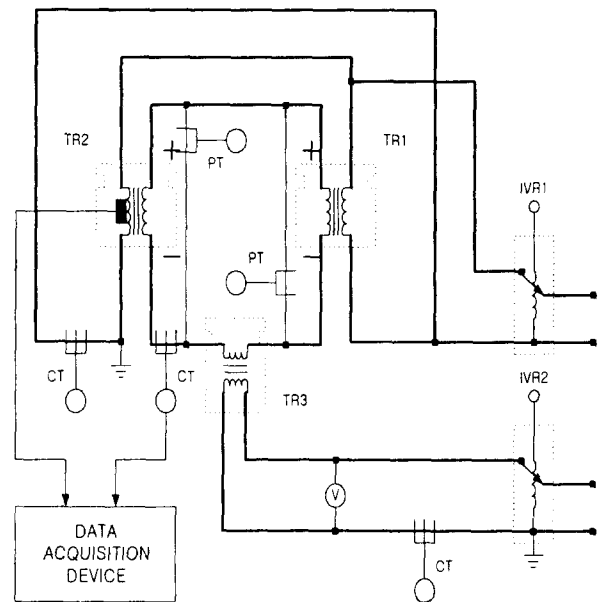


그림 2 실험 장치의 구조
Fig. 2 Structure of experimental device

실험용 변압기의 진동 신호를 측정하기 위해 본 연구에서는 Wilcoxon Research사의 100[mV/g]급 고 감도 앰프 내장형 가속도 센서를 사용하였다. 가속도 센서는 속도의 변화량을 측정하는 센서로 이것을 실험용 변압기 권선과 철심에 각각 부착하여 진동 신호를 측정하였다. 가속도 센서의 설치 방법이 나쁘면 센서의 사용 가능 주파수 영역이 줄어들게 되어 잘못된 진동 측정이 될 수 있다. 따라서 가속도 센서의 부착시에는 센서의 바닥면과 피 측정물 표면이 가능한 완전히 접촉하는 것이 좋다. 가속도 센서의 부착 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 이용하였다.

(1) 권선의 가속도 센서 부착 방법

권선 부위에 가속도계를 지지할 수 있는 지지대를 설계·제작하여 권선 중앙에 고정시키는 방법을 사용하였다.

(2) 철심의 가속도 센서 부착 방법

손쉽게 빠른 방법으로 측정 위치의 이동이 용이한 자석을 이용하는 방법으로 전자기력이 가장 큰 철심 상부에 부착하였다.

가속도 센서의 부착 위치 및 방법은 아직 완전히 해결하지 못한 점으로 남아 있는 문제이다. 특히, 권선의 경우 화학 접착제는 여름철 온도 상승시 강도가 떨어져 사용할 수 없으며 나사를 이용하기에는 절연 문제가 야기된다. 더욱이 고장 전류로 인하여 권선 배열에 뒤트럼이 생길 경우 센서가 떨어져 나갈 경우도 있기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 실험한 여러 가지 방법 중에서 가장 결과가 우수한 방법을 채택하였다. 또한 변압기의 진동 신호는 가속도 센서의 설치 위치와 방법에 문제가 없으면 변압기의 운전 상태가 변하여도 측정 오차의 크거나 그 형태가 같으므로 진동 신호의 수리적 모형은 달라질 수 있으나 예방 진단을 하는 자료로서는 유용할 것이라고 판단된다.

가속도 센서에 의해 취득된 실험용 변압기의 진동 신호는 전치 증폭기와 주 증폭기를 거쳐 PC의 확장 보드에 삽입된 A/D보드 등의 입력으로 사용된다. 실험용 변압기의 2차측 전압, 전류는 각각 전압 변성기(PT), 전류 변성기(CT)를 거친 후 트랜스듀서(Transducer)에 의한 직류 변환 후 A/D보드의 입력으로 사용된다. 진동 신호 분석을 위하여 Data Physics사의 DP420 FFT Analyzer를 PC에 연결하였다. DP420 FFT Analyzer는 PC용 다채널 Dynamic 신호 분석 장치로 두 개의 DSP칩이 내장되어 있고, 4채널까지 신호 처리가 가능하다. 그림 3은 데이터 취득 장치의 구성도이다.[8]

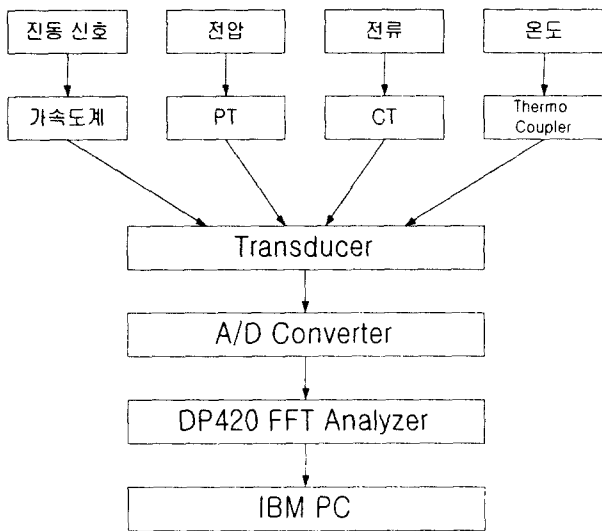


그림 3 데이터 취득 장치의 블럭도
Fig. 3 Block diagram of data acquisition device

2.3 분석 방법 - 고장 판별 함수

진동 신호의 분석은 시간 영역 분석과 주파수 영역 분석으로 나눌 수 있다. 시간 영역의 분석은 시간의 변화에 따른 진폭의 변화를 분석하며, 각 구성 요소의 운동을 물리적

인 크기로 정의할 수 있다. 주파수 영역의 분석은 진동 신호를 각 주파수에 따른 진폭으로 나타내어 분석함으로써 특유의 주기적 주파수 성분들을 찾아내어 내부 변화에 대한 추측이 가능하다.[8, 9] 따라서 본 연구에서는 변압기 진동 신호의 변화 경향을 주파수 영역상의 분석으로 실험용 변압기의 고장을 인식할 수 있는 고장 판별 함수를 도출하였다. 고장 판별 함수를 도출하는 과정은 다음과 같다.

측정된 진동 신호의 각 주파수 성분을 추출한다. 특정 주파수의 각 성분은 부하(혹은 전압)의 변화를 가로축으로 설정하고, 크기를 절대 크기의 [dB] 값으로 세로축에 그린다. 고장 전과 고장 후의 특징을 확인하기 위하여 처음 제작된 실험용 변압기를 대상으로 부하와 전압을 변화시키면서 진동 신호를 측정 수집하고, 이 변압기의 단락 시험 후 다시 진동 신호를 측정 수집하였다. 단락 시험 후 실험용 변압기의 권선과 철심이 변형되었음을 눈으로 확인할 수 있었으며, 진동 신호도 뚜렷하게 상이한 특징을 나타내었다. 가속도 센서를 설치한 상태에서 오랫동안 변압기를 운전하면서 진동 신호의 경향을 분석해야 하지만, 시간을 고려하여 단락 시험을 통해 권선을 변형시킨 후 진동 신호의 변화를 분석하였다. 그림 4는 실험용 변압기의 전압을 고정하고, 부하를 변화(60[%]~100[%])시킬 때 나타나는 권선의 기본파 변화 경향으로 부하 변동이 있더라도 고장 전과 고장 후의 진동 신호 크기가 뚜렷이 구분되고 있다. 따라서 고장 판별 함수는 이들 두 그룹의 진동 신호를 구분할 수 있는 선이므로 본 연구에서는 최소 자승법 도입으로 고장 판별 함수를 도출하였다.[10-13]

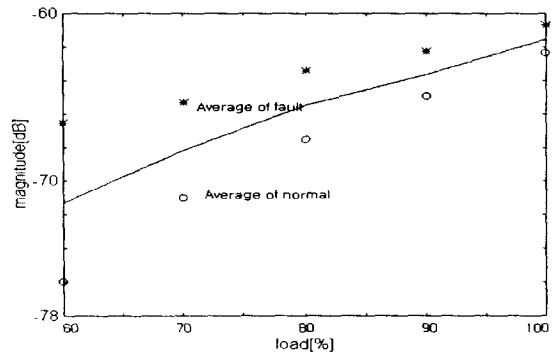


그림 4 진동 신호의 변화 경향과 고장 판별 함수
Fig. 4 Trend of vibration signals and fault discriminating function

구체적으로 그림 4는 고장 판별 함수를 유도하기 위해 각 부하에서 정상일 때와 고장일 때 취득한 진동 신호에 평균을 취했다. 정상일 때의 평균값은 60[%], 70[%], 80[%], 90[%], 100[%]의 각 부하에 대해서 -76.01[dB], -71.03[dB], -67.57[dB], -64.94[dB], -62.36[dB]이며, 원으로 표시하였고, 고장일 때의 평균값은 -66.57[dB], -65.33[dB], -63.42[dB], -62.29[dB], -60.69[dB]이며, 별표로 표시하였다. 이들 각 평균값의 평균을 다시 구해 보면 -71.29[dB], -68.18[dB], -65.49[dB], -63.61[dB], -61.52[dB]이다. 각 부하에서 이 값들을 연결하여 고장 판별 함수를 도출하였다. 즉, 이 고장

판별 함수는 변압기의 정상과 고장을 구분하는 경계선으로 사용할 수 있다. 따라서 이렇게 유도한 고장 판별 함수를 이용하면 변압기의 정상과 고장을 판별할 수 있다.

3. 고장 판별 함수의 유도

고장 판별 함수를 유도하는 과정에서 한가지 고려할 문제점은 전압과 부하의 변화 범위이다. 일반적으로 변압기는 주로 정격 전압에서 운전되므로 본 연구에서 전압의 가변 범위는 정격 전압의 100[%] 근방에서 변화를 주었고, 부하는 정격 부하의 70[%] 근방에서 많이 운전되므로 정격 부하의 70[%] 근방에서 변화를 주었다. 이것은 고장 판별 함수의 도출 여부를 결정하는 중요한 문제이다. 즉, 전압 또는 부하의 특정 범위에서 고장 판별이 되지 않아 전체 가변 범위에 대한 고장 판별 함수를 도출할 수 없는 경우가 있더라도 이 특정 범위가 변압기의 평상시 운전 범위가 아니라면 그 특정 범위에서는 고장 판별이 불가능하더라도 변압기 운전 가능성이 높은 전압 및 부하의 가변 범위(예를 들면, 전압 : 85~105[%], 부하 : 60~100[%])에서 판별이 가능한 고장 판별 함수라도 구하고자 하였다.

3.1 기본파의 변화 경향

권선 및 철심에서 취득한 진동 신호에 대해서 기본파(120[Hz])의 변화 경향은 부하를 고정하고, 전압을 변화시키거나, 또한 전압을 고정하고, 부하를 변화시키며 분석하였다. 변압기의 정상 상태와 고장 상태의 기본파를 함께 분석하였으며, 정상과 고장의 구별이 가능한 경우에는 고장 판별 함수를 유도하였다.

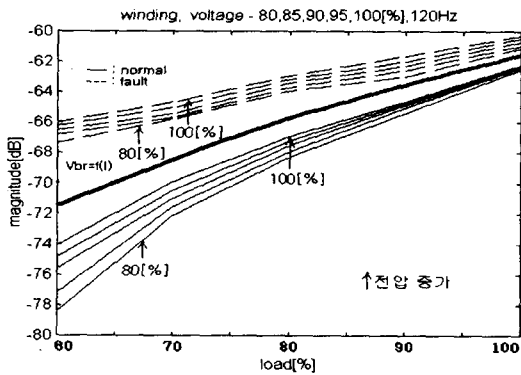


그림 5 권선에서의 기본파 변화 경향(전압 고정, 부하 변화)
 Fig. 5 Trend of fundamental waves in winding
 (fixed voltage, variable load)

그림 5는 그림 4를 다른 관점으로 다시 표현한 것으로 단락 시험 전·후 전압을 80[%]~100[%]까지 변화시킬 때 권선의 기본파 경향을 각각의 부하(60[%]~100[%])에서 나타낸 것이다. 이 때 변압기의 정상 상태와 고장 상태가 구별 가능함을 알 수 있으며 고장 판별 함수는

$$V_{br}(L) = -0.002375L^2 + 0.6275L - 100.5 \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서, L은 [%]로 표시한 부하이고, $V_{br}(L)$ 은 해당 부하에서 고장 판별 함수값을 나타내는 [dB]값이다. 측정된 진동 신호의 기본파 크기가 고장 판별 함수 V_{br} 값보다 클 경우에는 고장, 작을 경우에는 정상이라 구별할 수 있다. 또한 이 수식은 부하 변화의 전 범위에서 적용할 수 있다.

그림 6은 철심에서의 기본파 변화 경향이다. 전압을 변화시키며 살펴본 경우 변압기가 정상 상태일 때와 고장 상태일 때 기본파 전압 변화의 범위를 95[%]~105[%]로 설정할 경우 구별이 가능하다. 95[%] 미만의 전압 범위에서 상태 구별이 불가능한 이유는 정상과 고장의 경계가 1[dB] 미만의 좁은 크기로, 특히 90[%]의 전압에서는 0.5[dB] 이하로 형성되어 있기 때문이다. 정상 상태일 때의 기본파가 고장 상태일 때의 기본파보다 크기가 더 크다는 것을 알 수 있다. 고장 판별 함수는

$$V_{br}(V) = 0.33V - 100.7 \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서, V는 [%]로 표시한 실험용 변압기 전압이고, $V_{br}(V)$ 는 해당 전압에서 고장 판별 함수값을 나타내는 [dB]값이다. 위의 전압 범위에서 측정된 진동 신호의 기본파 크기가 고장 판별 함수 V_{br} 값보다 클 경우에는 정상, 작을 경우에는 고장으로 구별할 수 있다. 즉, 권선의 경우와는 반대임을 알 수 있다.

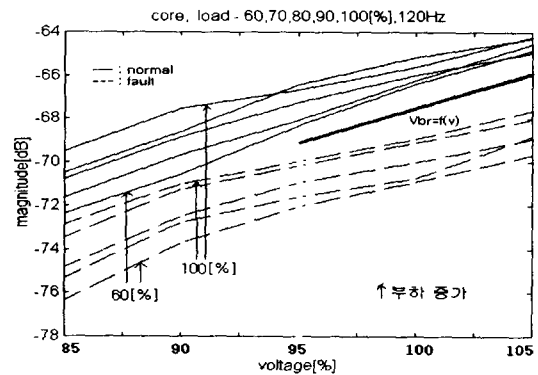


그림 6 철심에서의 기본파 변화 경향(부하 고정, 전압 변화)
 Fig. 6 Trend of fundamental waves in core
 (fixed load, variable voltage)

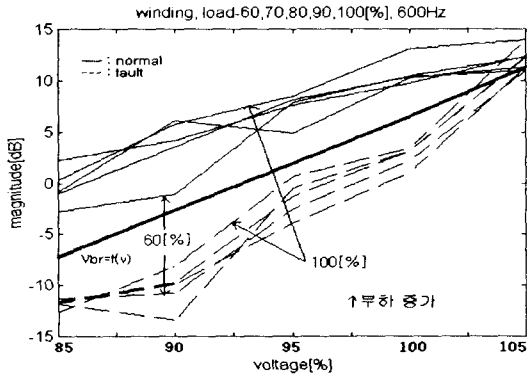
결론적으로 기본파의 경우 권선에서는 부하를, 철심에서는 전압을 변화시킬 때 정상과 고장의 구분이 가능했다. 기본파에 관계된 권선과 철심에서의 고장 판별 함수와 고장 판별 범위를 표 1에 정리하였다.

3.2 고조파의 변화 경향

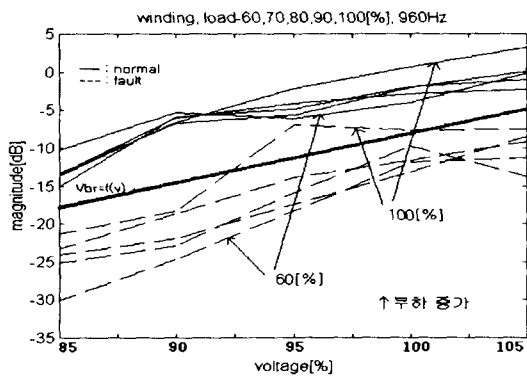
변압기 진동 신호 중 고조파 분석의 경우 정상 상태의 120[Hz]를 기준으로 정상 상태일 때와 고장 상태일 때의 상대 크기를 분석하였다. 즉, 정상 상태와 고장 상태 각각의 고조파에서 정상 상태의 120[Hz] 성분의 값을 제외하고 그 변화 경향을 분석하였다. 고조파 성분의 상대적 크기는 변압기의 기계적 구조 변화를 파악하는 중요한 지표가 된다.

기본파에서와 같은 방법으로 전압과 부하를 변화시키며 분석하였고, 이 때 정상과 고장이 구별되는 경우에는 고장 판별 함수를 도출하였다.

우선 권선에 센서를 부착시킨 후, 부하를 고정하고, 전압을 변화시키며 실험하였다. 그림 7의 (a)와 그림 7의 (b)는 권선에서의 600[Hz]와 960[Hz]의 고조파 변화 경향이다.



(a) 600[Hz]의 경우



(b) 960[Hz]의 경우

그림 7 권선에서의 고조파 변화 경향(부하 고정, 전압 변화)

Fig. 7 Trend of higher harmonics in winding (fixed load, variable voltage)

600[Hz]의 경우 105[%] 부근에서의 오차를 제외한다면 전압의 전 범위에서 정상과 고장의 구분이 가능하며, 960[Hz]의 경우는 전압의 전 범위에서 구별이 가능하다. 600[Hz]의 경우에 전압 전 범위에서 판별 가능한 고장 판별 함수를 유도하면

$$V_{br}(V) = 0.915V - 85.075 \quad (3)$$

로 표현된다. 즉, 고장 판별 함수 V_{br} 의 크기에 의해 정상과 고장의 구별이 가능하다. 960[Hz]의 경우의 고장 판별 함수는

$$V_{br}(V) = 0.635V - 71.675 \quad (4)$$

로 표현된다. 이때 고장 판별 함수 위에 위치한 고장 상태의 고조파는 부하 100[%]일 때의 경우이다. 이 경우를 제외한다면 전압의 전 범위에서 변압기의 정상과 고장 구별이

가능할 것이다. 참고적으로 600[Hz]과 960[Hz]를 제외한 고조파에서는 고장 판별 함수를 유도할 수 없었다. 그밖에 고조파의 경우 부하를 고정하고 전압을 변화시키는 경우, 철심에서는 240[Hz]와 360[Hz]에서 정상과 고장의 구별이 가능하였다. 기본파와 고조파에 관계된 고장 판별 함수와 고장 판별 범위를 표 1에 정리하였다.

표 1 기본파와 고조파의 고장 판별 함수 및 고장 판별 범위

Table 1 Fault discriminating functions and ranges in fundamental waves and higher harmonics

(a) 전압 변화시의 고장 판별 함수

		전압 변화시 (V : 전압)	전압 변화 범위[%]
권선	600[Hz]	* $V_{br} = 0.915V - 85.075$	85-105
	960[Hz]	* $V_{br} = 0.635V - 71.675$	85-105
철심	120[Hz]	* $V_{br} = 0.33V - 100.7$	95-105
	240[Hz]	** $V_{br} = 0.00099V^2 + 0.05549V - 19.42$	95-105
	360[Hz]	** $V_{br} = -0.003V^2 + 0.485V - 34.5$	95-105

(b) 부하 변화시의 고장 판별 함수

		부하 변화시 (L : 부하)	부하 변화 범위[%]
권선	120[Hz]	** $V_{br} = -0.002375L^2 + 0.6275L - 100.5$	60-100

(주) * : 측정값이 고장 판별 함수 값보다 클 때 정상

** : 측정값이 고장 판별 함수 값보다 작을 때 정상

4. 사례 연구

본 연구에서는 실험실에서 운전 중인 변압기에서 취득한 진동 신호에 고장 판별 함수를 적용함으로써 고장 판별이 가능한지 검토하기 위하여 다양한 사례 연구를 실시하였다. 실험 운전 중인 변압기에서 취득한 두 개의 진동 신호 즉, 정상 상태 변압기의 진동 신호(N)와 고장 상태 변압기의 진동 신호(F)를 대상으로 본 연구에서 제안한 고장 판별 함수의 적용 가능성을 확인하였다. 변압기에서 취득한 진동 신호의 스펙트럼 분석 결과는 각 기본파와 고조파의 크기로 나누어 표 2에 정리하였다. 참고적으로 정상 상태의 변압기(단락 시험 전)와 고장 상태(단락 시험 후)의 변압기 내부의 모습은 그림 8과 같다. 기계적인 구조 변화가 많이 발생했음을 알 수 있다.

변압기 권선의 경우 기본파(120[Hz])와 고조파의 경우에는 600[Hz], 960[Hz]에서 고장 판별 가능하였다. N_{w1} 를 기본파(표 2에서 음영 부분으로 나타냄)에 적용시켜 보았다. 그림 9는 기본파에 적용시켰을 때의 결과이다. 별표로 나타낸 측정 진동 신호의 크기는 -74.71[dB]로 고장 판별 함수 값 -65.5[dB](표 1의 이용으로 계산)보다 작음을 알 수 있다. 즉, 측정값이 고장 판별 함수에 의한 계산값보다 작으므로 변압기가 정상 상태임으로 판별되었다. 즉, 기본파의 변화 경향에서 측정값이 계산값보다 작은 경우가 정상 상태임으로 올바르게 판별되었다.

본 연구에서는 고장 판별의 신뢰성을 검증하기 위하여 표 2에 나타난 여러 진동 신호들을 제안한 고장 판별 함수에



그림 8 단락 시험 전·후의 실험용 변압기 내부 모습
 Fig. 8 Inside character of experimental transformer before and after short circuit test

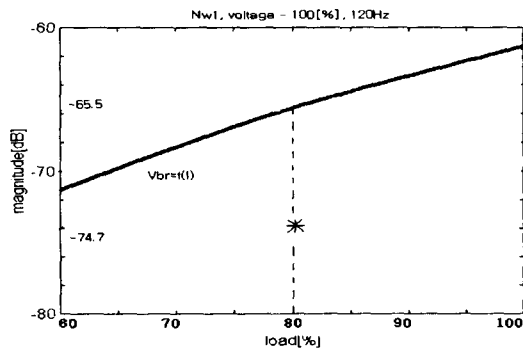


그림 9 N_{w1} 을 기본파에 적용
 Fig. 9 Applied N_{w1} to fundamental wave

적용하여 보았다. 즉, 권선과 철심에서 취득한 진동 신호를 위의 경우와 같이 적용하여 고장 판별 결과를 취득하였다. 그 결과는 표 3과 같다. 표 3의 측정값은 취득 진동 신호의 크기이며, 계산값은 취득 진동 신호를 고장 판별 함수에 적용한 후 계산된 값이다. 확인란은 고장 판별 결과를 나타내며 올바르게 판별된 경우는 'True'로, 올바르게 판별된 경우는 'False'로 나타내었다. 정상 상태 변압기의 신호를 적용시켜 보았을 때 철심의 경우 기본파에서만 올바르게 판별되었고, 고장 상태 변압기의 신호를 적용시켜 보았을 때 권선의 경우에는 기본파에서만 올바르게 판별된 것을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 결과는 기본파가 아닌 고조파의 적용으로 전체적으로 살펴볼 때는 올바르게 판정할 수 있다. 따라서 고장 판별 결과 24개의 경우 중 20개의 경우에서 올바르게 판별되었고, 4개의 경우에서 올바르게 판별되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 알고리즘은 개별 시험 자료로는 약 83.3%의 판별률을 나타내고 있다. 그러나 판정을 위한 시험 자료 12개중에서 정상 변압기에서는 10개가 정상으로, 2개가 고장으로 판정되었으므로 전체적으로는 '정상'으로 판단할 수 있으며, 고장 변압기에서는 2개가 정상으로, 10개가 고장으로 판정되었으므로 전체적으로는 '고장'으로 판단할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제시한 판별 함수를 사용하여 변압기의 고장 유무를 판단하는 것이 가능함을 알 수 있다.

표 2 취득 진동 신호의 기본파와 고조파의 크기

Table 2 Magnitudes of fundamental waves and higher harmonics in acquired vibration signals

(단위 : [dB])

	진동 신호의 주파수 성분									
	120 [Hz]	240 [Hz]	360 [Hz]	480 [Hz]	600 [Hz]	720 [Hz]	840 [Hz]	960 [Hz]	1080 [Hz]	
N_{w1}	-74.71	-72.27	-75.05	-69.87	-64.37	-64.37	-80.13	-77.56	-82.67	
F_{w1}	-74.05	-75.65	-86.62	-91.82	-71.90	-85.26	-87.82	-85.98	-82.21	
N_{w2}	-74.70	-70.09	-76.64	-70.59	-64.43	-82.37	-79.53	-76.66	-82.65	
F_{w2}	-72.98	-72.74	-88.73	-86.19	-71.98	-83.50	-87.11	-84.68	-79.22	
N_{c1}	-68.93	-77.64	-92.72	-82.23	-77.67	-79.01	-80.94	-78.38	-88.32	
F_{c1}	-72.35	-76.12	-83.59	-82.69	-84.55	-88.30	-85.96	-75.15	-83.33	
N_{c2}	-69.51	-78.80	-88.55	-81.46	-77.90	-81.19	-78.29	-79.10	-96.97	
F_{c2}	-72.18	-74.98	-82.07	-81.72	-84.65	-85.54	-83.53	-75.61	-83.68	

(주) N_{w1} , F_{w1} : 정격 전압 100%, 정격 부하 80% 상태에서 운전 중인 변압기의 권선에서 취득한 두 개의 신호
 N_{w2} , F_{w2} : 정격 전압 100%, 정격 부하 90% 상태에서 운전 중인 변압기의 권선에서 취득한 두 개의 신호
 N_{c1} , F_{c1} : 정격 전압 100%, 정격 부하 80% 상태에서 운전 중인 변압기의 철심에서 취득한 두 개의 신호
 N_{c2} , F_{c2} : 정격 전압 100%, 정격 부하 90% 상태에서 운전 중인 변압기의 철심에서 취득한 두 개의 신호

표 3 취득 진동 신호의 고장 판별 결과

Table 3 Results of fault discrimination in acquired vibration signals

취득 신호	주파수 [Hz]	부하 [%]	측정값 [dB]	판별 조건	계산값 [dB]	판별 결과	확인
N_{w1}	120	80	-74.71	<	-65.50	정상	True
	600		+10.34	>	+6.43	정상	True
	960		-2.85	>	-8.18	정상	True
F_{w1}	120	80	-74.05	>	-65.50	정상	False
	600		+2.15	<	+6.43	고장	True
	960		-11.93	<	-8.18	고장	True
N_{w2}	120	90	-74.70	<	-63.26	정상	True
	600		+10.27	>	+6.43	정상	True
	960		-1.96	>	-8.18	정상	True
F_{w2}	120	90	-72.98	>	-63.26	정상	False
	600		+1.00	<	+6.43	고장	True
	960		-11.70	<	-8.18	고장	True
N_{c1}	120	80	-68.93	>	-67.70	고장	False
	240		-8.71	<	-3.97	정상	True
	360		-23.79	<	-16.00	정상	True
F_{c1}	120	80	-72.35	<	-67.70	고장	True
	240		-3.84	>	-3.97	고장	True
	360		-11.24	>	-16.00	고장	True
N_{c2}	120	90	-69.51	>	-67.70	고장	False
	240		-9.29	<	-3.97	정상	True
	360		-19.04	<	-16.00	정상	True
F_{c2}	120	90	-72.18	<	-67.70	고장	True
	240		-2.80	>	-3.97	고장	True
	360		-9.89	>	-16.00	고장	True

5. 결론

본 연구에서는 진동 신호 분석을 이용한 전력용 변압기의 고장 판별 알고리즘을 제안하였다. 즉, 전력용 변압기에서 발생하는 진동 신호의 기본파와 고조파의 변화 경향에서 정상 상태와 고장 상태의 변압기 구별이 가능하였고, 이 경우에는 고장 판별 함수를 유도하였다. 기본파의 경우 권선에서는 부하를 변화시킬 때, 철심에서는 전압을 변화시킬 때 정상과 고장의 구별이 가능했다. 고조파의 경우 전압을 변화시킬 때 권선에서는 600[Hz]와 960[Hz], 철심에서는 240[Hz]와 360[Hz]에서 정상과 고장이 잘 구별되었다. 개개의 시험 자료를 통하여 정확히 판단한 확률이 83.3[%]로써 고장 유무를 정확히 판단하지 못했지만 12개의 시험 자료를 종합하면 고장 유무를 정확히 판단할 수 있었다.

그러나 변압기 진동 신호의 측정으로 기계적 구조의 변화 여부, 변화 정도 및 변화 위치를 파악하기 위해서는 더욱 많은 실험 시간과 자료가 요구된다. 특히 본 연구에서는 전력용 변압기 대신 주상 변압기로 실험을 수행했기 때문에 진단치 제시 등은 할 수 없는 어려운 점이 있다. 따라서 향후 더욱 많은 실험과 데이터 분석으로 진동 신호에 대한 기본파와 고조파의 변화 경향과 고장 판별 함수를 유도한다면 실제 운전 중인 전력용 변압기의 신뢰성 있는 고장 진단이 가능할 것이다.

본 논문은 1994년도 한국 학술 진흥 재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] J.C. Lavelle, Failure Detection in Transformer Using Vibration Analysis, The MIT Press, 1986.
- [2] D.J. McCarthy, An Adaptive Model for Vibration Monitoring of Power Transformers, The MIT Press, 1987.
- [3] W.H. Hagman, An Adaptive Transformer Monitoring System, The MIT Press, 1989.
- [4] 권혁승, 전력용 변압기 진동의 모형화, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1993.
- [5] 이성호, 전력용 변압기의 예방 진단을 위한 권선 진동 크기의 모형화, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1994.
- [6] 김영식, 진동 신호 분석을 이용한 전력용 변압기의 예방 진단에 관한 연구, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1995.
- [7] 김현식, 변압기 진동 신호의 소음 제거, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1995.
- [8] 박수문, 진동 신호 분석을 이용한 변압기 고장 판별법 연구, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1996.
- [9] L. Meirovitch, Analytical Method in Vibrations, The MacMillan Company, 1967.
- [10] G.C. Goodwin and K.S. Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice-Hall Inc., 1984.
- [11] L. Ljung, System Identification Theory for The

Users, Prentice-Hall Inc., 1986.

[12] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall Inc., 1986.

[13] T. Soderstrom, System Identification, Prentice-Hall Inc., 1989.

저 자 소 개



윤 용 한 (尹 龍 漢)

1967년 8월 28일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 숭실대학교 생산기술연구소 연구원.



유 치 형 (柳 治 馨)

1966년 10월 1일생. 1988년 숭실대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 숭실대학교 전자계산원 전임강사.



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.



정 찬 수 (鄭 讚 壽)

1949년 8월 10일생. 1972년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.



이 정 진 (李 廷 鎭)

1953년 12월 20일생. 1976년 서울대 계산통계학과 졸업. 1978년 동 대학원 계산통계학과 졸업(석사). 1986년 (미) Case Western Reserve 대학 경영과학박사. 현재 숭실대학교 정보통계학과 교수