

진동신호 분석을 위한 On-Line 시스템 개발

*김언석^o . **임성정 . **김영식 . **이영길 . **김재철 . **정찬수 . ***정상진

*한국전기연구소 **숭실대학교 전기공학과 ***한전 기술연구원

Developement of On-Line System for Vibration Signal Analysis

*O.S. Kim^o . **S.J. RIM . **Y.S. Kim . **Y.G. LEE . **J.C. Kim . **C.S. Chung . ***S.J. Chung

*Korea Electrotechnology Research Institute. **Soong Sil Univ. ***KEPCO Research Center.

Abstract - This paper describes developement of on-line system for vibration signal analysis. In the power system, the main reason of transformer fault is due to a large amount of current by a short-circuit and a ground-fault. The electromagnetic force caused by fault-current deforms transformer windings and results in vibration pattern change. Therefore if the continuous on-line vibration monitoring on transformer is performed, an incipient failure can be detected. The developed system is composed of data acquisition devices, user interface program, signal processing program, diagnosis and trend analysis program, self diagnosis program and communication program.

1. 서론

전력수급을 위한 전력계통의 규모와 설비는 점차 대형화하는 추세에 있다. 이에따른 전력설비의 해상을 이루는 전력용 변압기 역시 대형화되고 있다. 그러므로 변압기의 사고 및 고장시의 파급효과는 매우커서 전력수급 중단으로 인한 직접적인 경제적 손실은 물론 수리비용 역시 막대한 것이어서 고신회도의 운전이 요구되고 있다. 현재 전력계통의 주변압기 사고의 상당부분이 단락사고와 지락사고시에 흐르는 큰 고장전류에 의한 것이며, 이런 고장전류에 의한 큰 전자기력은 권선을 변형시키고 이로인하여 변압기의 전동폐단이 변화하게 된다. 따라서 진동신호를 상시감시하게 되면 변압기의 초기고장을 탐지할 수 있다. 이러한 진동신호를 이용한 변압기 진단에 관한 연구는 미국의 M.I.T에서 최초로 시작하였다. 그러나 off-line 방식을 이용하였으므로 실시간 진단 방식으로는 부적절하였고, 결과적으로 실시간 경향분석을 하지 못하였다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자 변압기의 소음 및 진동신호의 특성 변화를 이용하여, 전력용 변압기를 상시감시할 수 있는 on-line 진동신호 분석 시스템을 개발하였다.

개발된 시스템은 크게 하드웨어와 소프트웨어로 구분 할 수 있다. 하드웨어는 PC를 기본으로하여 데이터 취득장치를 구성하였으며, 소프트웨어는 사용자 인터페이스 부분, 아날로그 신호를 디지탈로 바꾸어 주는 데이터 취득부분, 취득된 신호를 시간 영역 해석과 주파수 영역 해석을 하는 신호처리 부분, 해석결과를 data base 화일로 저장하는 회인 저장부분, 신호처리 결과를 판단하는 이상판정 및 경향분석 부분, 주변장치의 이상을 감시하는 자기진단 부분, 해석결과를 통신망을 이용하여 전송하는 통신

부분으로 구성되어 있다. 전체적인 구성도를 그림1에 나타내었다.

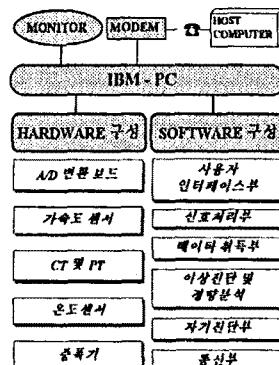


그림 1. on-line 진동분석 시스템 구성도

실증 실험결과, on-line 시스템을 이용하여 변압기의 진동에 의한 초기고장을 탐지할 수 있음을 확인하였다.

2. 하드웨어 구성

데이터 취득장치는 PC(IBM-PC 80386/40[MHz])를 기본으로 하여 주변장치를 침가하는 형식으로 구성하였다. 이에대한 블록도를 그림 2에 나타내었으며 분야별 세부사항은 다음과 같다.

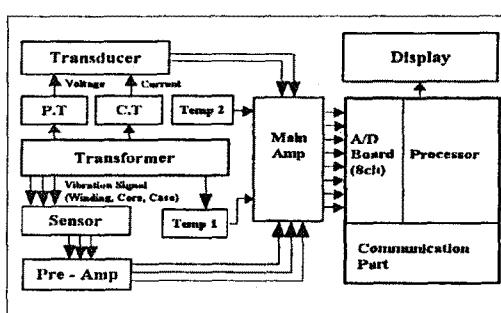


그림 2. 데이터 취득장치 구성도

- 가속도 센서 : 전동 신호 측정용으로 전압감도 100[mV/g] 용 가속도 센서를 사용하였다.
- 온도센서 : 주위온도 및 유증온도를 측정하기 위하여 -100 [°C] ~ +200[°C] 의 열전쌍 온도센서를 사용하였다.
- PT 및 CT : 전압 및 전류를 측정하기 위하여 12,600/115[V] 용 PT 및 100/5[A]용 CT를 사용하였다.
- 전압 및 전류용 transducer : PT 및 CT 출력을 A/D변환기 입력레벨로 조정하기 위하여 출력이 DC 4-20[mA]인 transducer를 선택하였으며 출력에는 500[Ω]의 저항을 연결하여 DC 2-10[V] 출력을 얻었다.
- main-amp : 각종 센서 혹은 주변보조 장치들로부터 들어오는 신호들을 취합하는 곳이며, 전동신호는 100배의 증폭율을 가지며 기타신호들은 바이пас스 되었다.
- A/D 변환 보드 : 각종 아날로그 신호들을 디지털로 변환하기 위하여 차동입력으로 8채널까지 가능하며 33[kHz]의 샘플링 성능을 가지고 있다. 이러한 성능은 전동측정 시스템의 주파수 대역을 고려하여 선택하였다.

3. 소프트웨어 구성

소프트웨어는 크게 사용자 인터페이스 프로그램, 데이터 취득 프로그램, 신호처리 프로그램, 회일지장 프로그램, 이상판정 및 경향분석 프로그램, 자가진단 프로그램, 통신 프로그램으로 구분할 수 있다. 프로그램은 이식성이 뛰어난 객체지향형 언어인 C++ 을 이용하였고, large 모델을 사용하여 컴파일 하였다.

3.1. 사용자 인터페이스 프로그램

사용자 인터페이스 프로그램은 사용자의 편의를 위하여 popup/pulldown 방식을 사용하였으며, 한글 라이브러리를 사용하여 한글화 하였다. 주요기능은 각종 환경설정, 데이터 취득작업, 취득된 데이터의 분석작업, 분석된 데이터의 화면표시작업, 분석된 데이터의 저장작업 등 시스템을 통합관리하는 것이다. 그림2는 사용자 인터페이스의 주 메뉴 화면이며, 3개의 진동파형 및 1개의 입의 파형을 보여주고 있다.

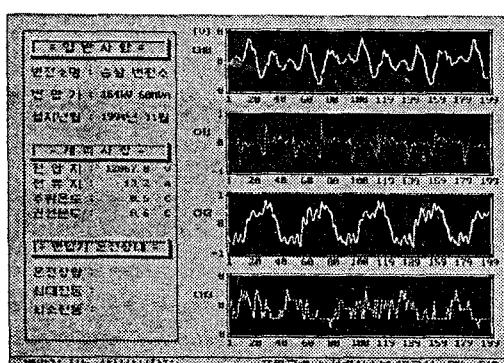


그림 3. 사용자 인터페이스 주화면

3.2. 데이터 취득 프로그램

데이터 취득 프로그램은 A/D 변환기의 8개 채널에 대하여 512 개의 데이터를 순차적으로 취득하여야 하므로 보드에 내장된 timer을 사용한 인터럽트 방식을 사용하였다. 본 프로그램은 A/D 변환기의 환경 설정(입력전압 범위, 이득 등), 샘플링 시간 간격 조정, 타이머 조정, 인터럽트 설정 및 해제등의 함수로 구성되어 있다.

3.3. 신호처리 프로그램

신호처리 프로그램은 상대파형 분석 및 전동파형 분석 모듈로 구성되어 있다.

3.3.1. 상대파형 분석 모듈

상대파형 분석 모듈은 변압기의 주변상태를 측정하여 자료화하는 곳으로 변압기 내부온도와 주위온도, 전압, 전류를 계측하여 처리 할 수 있는 프로그램이다. 적정시간마다 현재상태값(온도 2개 및 전압, 전류)을 측정하여 실효값을 계산한 다음 실제값으로 조정(tunning) 하도록 구성되어 있다. 처리순서는 다음과 같다.

- (1) 수치계산을 위하여 배정도 실수형 배열을 선언하며, 메모리를 효율적으로 관리하기 위하여 동적 메모리로 할당한다.
- (2) 측정된 정수형 데이터를 수치계산하기 위하여 실수형 배열에 할당한다.
- (3) 실수형 배열의 값에 대한 실효값을 아래의 식에 의하여 계산 한다.

$$R.M.S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i X_i^2} \quad (1)$$

여기서, N : 측정된 데이터의 샘플갯수
 X_i : i번째 샘플데이터

- (4) 계산된 실효값을 증폭율 등을 고려하여 실제값으로 변환한다.
- (5) 메모리를 효율적으로 관리하기 위하여 설정된 배열을 해제한다.

3.3.2. 전동파형 분석 모듈

진동파형 분석 모듈은 3개의 진동신호를 받아들여 실효값 계산, ARX 모델의 개수값 계산, 스펙트럼 분석을 위한 고조파값 계산을 하는 부분으로 구성되어 있다. 그림4는 진동신호에 대한 FFT 결과 화면이며, 화면의 가로축은 주파수 대역이며 세로축은 그 크기이다. 신호처리 순서는 다음과 같다.

- (1) 수치계산을 위하여 배정도 실수형 배열을 선언하며, 메모리를 효율적으로 관리하기 위하여 동적 메모리로 할당한다.
- (2) 측정된 정수형 데이터를 수치계산하기 위하여 실수형 배열에 할당한다.

(3) 측정된 진동신호에는 어느 정도의 바이어스가 포함되어 있어 이를 제거 한 후 분석해야 안정성을 보장 할 수 있다. 바이어스 성분을 제거하기 위하여 신호의 평균값을 계산한다음 각각의 샘플링 데이터에서 평균값을 빼주어 바이어스를 제거 한다. 그런다음 실효값 및 ARX 모델 계수를 계산한다. ARX 모델 계수값 계산은 최소자승 알고리즘을 적용하여 16차까지 구한다. 이때 계산시간과 기억용량을 절약하기 위하여 역행렬 계산은 gauss 소거법을 사용하였다.

(4) 진동파형의 주파수 성분을 분석하기 위하여 측정한 신호를 전처리 후에 각 주파수 성분을 분석한다. 프로그램 구성은 다음과 같다.

- 동적 메모리 할당

- zero padding

취득된 512개의 시간대역 데이터를 가지고 FFT 변환을 할 경우 주파수 대역의 해상도를 향상시키기 위하여 512 개의 0데이터를 본래 진동 데이터의 앞부분에 삽입한다.

- FFT 변환

취득한 진동신호를 zero padding 한 후 FFT를 다음 아래 식에 의하여 변환한다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (2)$$

$$k = 0, \dots, N-1$$

- power spectrum 계산

fourier 변환된 결과는 복소수의 형태이므로 이를 크기로 나타내기 위하여 power spectrum 을 계산한다. 복소수중 실수부를 real, 허수부를 imag라 할 경우 power spectrum 에 대한 공식은 다음과 같다.

$$\text{POWER} = 20 * \log(p_i) \quad (3)$$

$$\text{여기서, } p_i = \sqrt{\text{real}^2 + \text{imag}^2}$$

- 침두값 탐색

fourier 변환된 결과로 power spectrum 을 구하고 그 결과를 이용하여 60[Hz]의 2배수에 해당되는 정화한 고조파 값을 추출 할 필요가 있다. 실제로는 이론상으로 예전은 고조파에서 최대점이 나타나지 않고 상용주파수의 2배수에 해당되는 값을 주위에서 나타난다. 따라서 이를 극복하기 위하여 정수배열에서 각각의 고조파 배열 근처에서 가장 큰 값을 취득하여 그 값을 고조파값으로 취한다.

- 메모리 해제

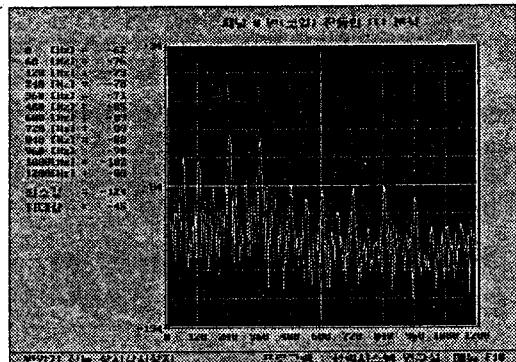


그림 4. 진동신호의 fft 결과화면

3.4. Data base용 파일저장 프로그램

개발된 실시간 측정장치는 변압기에서 진동신호 및 주변상태 등을 약 6초마다 측정해오며 2분에 한번씩 분석결과를 저장한다. 매 2분마다 저장하는 해석된 데이터는 각 채널별로 저장한다. 저장되는 데이터는 진동 신호에 대한 실효값, ARX 모델 계수, FFT에 의한 고조파값, 그리고 환경(온도1, 온도2, 전압, 전류)에 대한 실효값이다.

2분마다 저장되는 분 데이터는 매 시간별로 생성된다. 매 시간별로 생성되는 시간 데이터는 분 데이터에 대한 평균(mean)과 분산(varience)을 계산하여 저장하게 된다.

이러한 방식으로 시간 데이터는 매24시간마다 일 데이터로, 일 데이터는 매 월마다 월 데이터로, 월 데이터는 매년 연 데이터로 생성 및 저장된다.

측정간격 및 저장간격은 환경설정에서 변경가능하며, 저장된 데이터들은 진동신호의 경향분석시 사용되며 필요시 사용자 인터페이스 화면에서 불러 볼 수 있다.

3.5. 이상판정 및 경향분석 프로그램

이번 시스템의 이상유무는 정량적인 방법과 과거 데이터를 이용한 경향 분석을 하는 것이 일반적인 방법이다. 본 연구에서 채택한 방식은 다음과 같다.

정량적인 방법에 의한 이상유무 판정은 진동신호의 실효치와 ARX계수값의 정량적인 비교에 의하여 판정한다. 변압기 설치후 상당한 기간 동안의 평균치를 구한 후 이상판정치의 레벨로 설정하여 평균보다 큰값이 나타나는 경우 프로그램에서 경보를 발생하고, 그 내역을 사고발생 데이터 파일에 저장한다.

경향분석에 의한 이상유무 판정은 주파수 성분을 비교하여 정상일 때 포함되어 있지 않은 주파수 성분의 출현 또는 소멸등을 조사한다. 본 연구에서는 변화성질이 확실한 몇 가지 주파수만 관찰 대상으로 하였다.

경향분석의 또 다른 방법으로 진동 스펙트럼의 각 주파수 성분 및 ARX계수들을 연속적으로 화면에 표시하여 어느 시점에서 갑자기 폐턴이 변화하면 이상으로 판정한다. 본 연구에서는 갑자기 이상 폐턴을 감지하도록 하였으나, 폐턴 인식 또는 신경망 등을 이용하면 매우 효과적인 방법이 될 수 있다.

3.6. 자기진단 프로그램

컴퓨터화된 on-line 시스템에서 중요한 부분의 하나는 하드웨어적인 부분에 대한 자기진단 기능이다. 주변장치가 고장난 경우의 데이터를 가지고 이상진단을 하거나 경향분석용 파일을 구성하면 치명적인 결과를 야기 할 수 있다. 그러므로 주변장치에 대하여는 상시감시하여 이상유무를 확인하여야 한다. 본 연구에서 구현한 상시감시한 주변장치 및 구현원리는 다음과 같다.

- 온도센서 : 주위온도 및 유풍온도는 온도가 값자기 변화하지 않는다는 원리를 이용하였다. 매번 온도 데이터를 과거 대이타와의 차를 구하여 어느 일정한 값 이상이면 경보를 발생한다. 온도 센서별 한계 변화율 값은 환경설정에서 지정 가능하다.
- 전압 및 전류용 트랜스듀서 : 트랜스듀서의 출력은 항상 DC 4-20[mA] 범위임을 이용하여 단선유류만을 확인하였다.
- A/D 변환기 : 8채널 중 사용하지 않는 1개 채널에 기지의 DC 전압을 인가하고, 매번 A/D 변환시마다 이 값을 체크하여 어느 범위 이상을 벗어나면 이상으로 판정한다.

3.7. 통신 프로그램

on-line 시스템에서 분석한 데이터에 대하여 지정된 시간마다 데이터를 전송하여 주는 프로그램이다. 모뎀에 대한 환경설정 및 전송 회일명, 전송시기, 전송 상대방 전화번호 등을 사용자 인터페이스 프로그램에서 설정가능하다. 또한 경고 발생시에도 그 상황을 알려 주도록 프로그램하였다.

4. 실증실험

제작된 사용자 인터페이스 화면과 펌터 및 개발된 S/W의 현장 적용 가능성을 확인하기 위하여 실규모 변압기에 대한 실증 시험을 하였다. 그림5는 실증실험 장면이다.

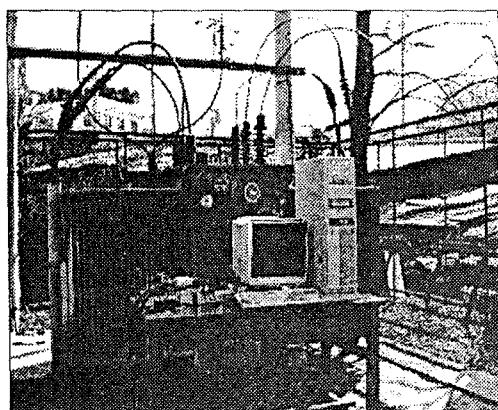


그림 5. 실증 실험 장면

실험대상 변압기는 충실대학교 옥외변전소의 배전용 변압기를 선택하였다. 변압기의 정격은 3상 22.9/3.3[kV], 2000[kVA], 유입 자냉식이다. 진동신호는 권선 및 철심에 대하여는 설치가 곤란

하여 외합의 진동만을 측정하여 분석하였다. 실험결과 본 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어는 양호하게 동작하여 실제 적용 가능성은 입증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 변압기의 소음 및 진동신호의 특성변화를 연구하기 위하여 하드웨어 구성 및 관련 소프트웨어를 개발하였다.

하드웨어는 PC에 A/D 변환 보드를 삽입하고 가속도 센서, 온도센서, PT 및 CT, 각종 트랜스듀서등을 이용하여 데이터 취득장치를 구성하였으며, 소프트웨어는 사용자 인터페이스 프로그램, 데이터 취득 프로그램, 신호처리 프로그램, 회일저장 프로그램, 이상판정 및 경향분석 프로그램, 통신 프로그램을 개발하였다. 본 시스템을 이용하여 측정한 진동신호를 RMS, FFT에 의한 진동 스펙트럼, ARX모델링 기법에 의한 계수값을 구하였다. 변압기의 진동신호를 계속해서 취득, 분석함으로써 그 경향을 비교한다면 변압기의 초기고장은 물론 고장진전 상황을 쉽게 감지할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Lavelle, Juan C, "Failure Detection Transformers Using Vibration Analysis," Department of Electrical Eng. and Computer Science, M.I.T., Cambridge, MA, September 1986.
- [2] McCarthy, Daniel J., "An Adaptive Model for Vibrational Monitoring of Power Transformers," 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] McCarthy, Daniel J., "An Adaptive Model for Vibrational Monitoring of Power Transformers," LEES Technical Report, May 1987.
- [5] Foster, S.L. Replinger, E. "Characteristics and Control of Transformer Sound", IEEE Trans. Power Appar. System, Vol. PAS-100, No.3, pp.1072-1077, March 1981.
- [6] L.Ljung, "System Identification Theory for the User", Prentice Hall, N.Y., NY 1986
- [7] 정찬수, 김재철 외 "부하전류 변화에 대한 변압기 권선의 진동분석에 관한 연구" 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 논문집, pp.54-57, 1994.
- [8] 정찬수, 김재철, 정상진 외 "변압기 권선고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발 연구", 한국전력공사 기술연구원, 1994. 12.
- [9] 김재철, 정찬수 외 "변압기의 기계적구조 변형에 따른 진동신호 특성변화", 대한전기학회 전력계통 연구회 논문집, pp.39-42, 1995. 5.