

## 전류분석을 이용한 유도 전동기의 결함분석 알고리즘 개발

### A Development of the Algorithm to Detect the Fault of the Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis

정병훈<sup>†</sup> · 신대철\*

Byung-Hoon Chung and Dae-Chul Shin

(2004년 3월 4일 접수 : 2004년 7월 5일 심사완료)

**Key Words** : Airgap Eccentricity(공극 편심), Rotor Bar Fault(회전자봉 결함), Motor Current Signature Analysis(전동기 전류신호분석), Stator Winding Fault(고정자 권선 결함)

#### ABSTRACT

The motor current signature provides an important source of the information for the faults diagnosis of three-phase induction motor. The theoretical principles behind the generation of unique signal characteristics, which are indicative of failure mechanisms, are presented. The fault detection techniques that can be used to diagnose mechanical problems, stator and rotor winding failure mechanisms, and air-gap eccentricity are described. A theoretical analysis is presented which predicts the presence of unique signature patterns in the current that are only characteristics of the fault. The predictions are verified by experimental results from a special fault producing test rig and on-site tests in a steel company. And this study have made new diagnostic algorithm for the operating induction motors with the test results. These developments are including the use of monitoring and analysis of electric current to diagnose mechanical and electrical problems and gave the precise test results automatically.

#### 기 호 설 명

$a$  = 정수(1,2,3... 통상  $a = 1$ )  
 BPFI = 내륜 불통과 주파수  
 (ball pass frequency of the inner race)  
 BPFO = 외륜 불통과 주파수  
 (ball pass frequency of the outer race)  
 BSF = 볼 스피ن 주파수(ball spin frequency)  
 CF = 중심 주파수(center frequency)  
 $e$  = 정수(1,2,3 ...)  
 FTF = 기본 트레인 주파수(fundamental train frequency)  
 $f_b$  = 베어링 결함 주파수

$f_{dg}$  = 동적 편심 주파수  
 $f_i$  = 전원주파수  
 $f_{rb}$  = 회전자봉 결함 주파수  
 $f_{rpm}$  = 회전 주파수  
 $f_s$  = 슬립주파수  
 $f_{sg}$  = 정적 편심 주파수  
 $N_{rt}$  = 회전자봉 수  
 $n_{us}$  = 하모닉 차수 (1, 3, 5, 7, ...)  
 $p$  = 전동기 극수  
 PPF = 극 통과 주파수(pole pass frequency,  
 $PPF = p \times f_s$ )  
 RBPF = 회전자 봉 통과 주파수(rotor bar pass frequency,  $RBPF = f_{rpm} \times N_{rt}$ )  
 $s$  = 전동기 슬립

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 호서대학교 대학원 전기공학과  
 E-mail : mnschung@unitel.co.kr  
 Tel : (017) 213-0839, Fax : (02) 484-6317

\* 정희원, 호서대학교 전기정보통신공학부

## 1. 서 론

3상 유도전동기는 냉각펌프, 팬, 보일러펌프 등과 같은 설비를 구동하기 위해 산업현장에서 가장 널리 사용된다. 이런 전동기에 갑작스런 고장이 발생이 발생하는 경우, 전동기의 교환 또는 수리의 비용은 저렴하여 전동기 자체의 중요성은 낮다고 하겠으나, 기계설비의 생산중단에 따른 비용은 실로 막대할 수 있다. 따라서 산업현장에서는 전동기의 초기 고장을 검출하고 계획된 예방정비와 수리를 수행하기 위해 주기적인 측정에 의한 상태 모니터링을 실시한다. 전동기의 모니터링은 주로 진동, 부분방전, 축(shaft) 전류, 축 전압, 온도 및 누설자속 등의 변수를 사용하여 수행하였다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 대부분의 현장 전동기는 접근하여 측정하기 곤란한 장소에 설치되어 있는 경우가 많고, 특히 원자로 내 전동기는 접근이 불가능하다. 원자로 내 전동기 구동 밸브의 결함을 알아낼 수 있는 방법에 대한 연구가 1980년대 초에 미국 Oak Ridge National Labs에서 수행되어, 전동기 전류 신호는 전동기 결함뿐만 아니라 부하의 어떤 결함 조건에 의해 변조된다는 것을 발견하였다.<sup>(3)</sup>

전동기 전류신호분석은 전동기에서 떨어진 제어실 내의 컨트롤 패널에서 전류와 전압 신호를 취득하여 신호를 조절한 후 다양한 결함을 찾아내는 방법이다. 과거 20년간 이 방법을 이용하여 유도전동기의 새로운 상태 모니터링 기술개발에 대한 실용적인 연구가 이어져왔다. 그럼에도 불구하고 회전수 오차 및 하모닉 분석 오류 등이 존재하여 유도 전동 시스템에 알맞은 가장 적합하고 효율적인 모니터링 시스템의 개발은 이루어지지 않았다. 본 논문은 현존의 전류 모니터링 시스템의 단점을 보완하여 유도 전동기의 결함을 검출하는 최적의 알고리즘 개발에 목표를 두었다. 각종 고장을 의도적으로 발생시킨 유도 전동기를 제작하여 부하를 변경시키면서 온-라인 계측으로부터 얻은 실측데이터와 이론적 예측이 증명되었으며, 전동기 내부의 고장에 따라 라인전류의 주파수 스펙트럼에서 독특한 신호 패턴이 발생한다는 결론을 도출하였다. 이를 바탕으로 유도 전동기의 고장을 자동으로 검출하는 모니터링 시스템을 위한 최신의 알고리즘을 개발하였다.

## 2. 전동기의 결함과 신호

### 2.1 회전자 봉 결함

유도전동기의 회전자에 결함이 있는 경우 결함의 위치가 자극을 통과할 때 흐르는 전류에 변화가 생기게 되므로, 전원주파수 피크에 결함 회전자의 회전과 함께 변조가 일어나게 된다. 주파수 영역에서는 식 (1)과 같이 전동기의 극 통과 주파수(PPF)가 전원주파수의 양쪽에 측대파(Sidebands)로서 나타나게 된다.<sup>(5)</sup>

$$f_{rb} = f_l \pm p f_s \text{ (PPF)} \quad (1)$$

경험적인 연구결과 전원주파수 성분  $f_l$  과 측대파 PPF의 레벨 사이에 60 dB 이상의 차이는 회전자 봉 상태가 양호함을 나타내며, 회전자 봉이 나빠지기 시작함에 따라 회전자 임피던스가 증가하고, 이것에 의해 전원에서 흐르는 전류는 증가하게 되어, 전류 스펙트럼에서는 PPF 피크 진폭이 증가하도록 만든다. 따라서 전원주파수 성분과 자극통과 주파수 성분(PPF)과의 레벨 차에 의해 회전자 결함의 정도를 검출할 수 있다. 진폭차가 50 dB 이상이면 전동기 회전자봉이 정상이고, 40 dB 이하인 경우 확실하게 문제가 있고, 레벨 값이 작아짐에 따라 회전자에 문제가 심각해짐을 나타낸다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 이 레벨 차는 회전자봉에 결함이 있다하더라도 무 부하에서는 거의 나타나지 않으며, 부하에 따라 상당한 차이를 보이므로 통상적인 부하(75~100%)에서 적용가능하다.

### 2.2 회전자 편심 현상

공극편심은 정적 편심 과 동적 편심의 형태로 분류할 수 있다. 정적 편심은 회전자 중심의 위치가 치우쳐져 회전하는 경우이다. 정적 편심은 타원형 고정자 철심에 의해 원인이 되거나, 설치단계에서 회전자 또

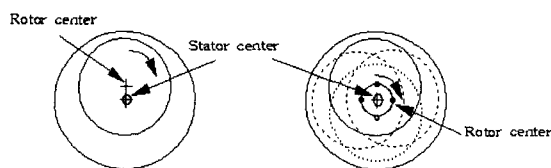


Fig. 1 Static & dynamic eccentricity<sup>(5)</sup>

는 고정자의 부정확한 위치로부터 원인이 될 수 있다. 회전자 축 조립이 충분히 견고한 경우, 정적 편심의 정도는 변화하지 않으므로 편심이 어느 정도 존재하여도 큰 문제는 없다. 동적 편심은 회전자의 중심이 회전중심에 있지 않아 최소 공극이 회전자와 함께 회전하는 경우에 일어난다.

동적 편심은 축 휨, 임계속도에서 기계적 공진, 또는 베어링 손상 또는 움직임에 의해 발생될 수 있다. 동적 편심이 증가하면 회전자 축에 과도한 불평형 자력을 발생하여 회전자와 고정자사이의 마찰위험이 증가하므로 운전 중인 유도전동기에서 공극편심의 비정상적인 레벨은 모니터링 되고 분석되어야 한다. 정적 편심과 동적 편심에 의한 주파수 성분은 회전자가  $f_{rpm}$ 으로 회전하고 회전자에 봉이  $N_{rt}$ 개 있을 때, 공극편심에 의한 회전자봉 통과주파수는  $f_{rpm} N_{rt}$  가 되고 전류 측정에 의해 나타나는 주파수 성분은 전원 성분의 홀수 하모닉에서 나타나게 된다. 이를 수식으로 만들면 식 (2)와 같다.<sup>(5, 6)</sup>

정적 편심

$$f_{sg} = f_i \left[ a N_{rt} \frac{2(1-s)}{p} \pm n_{we} \right]$$

$$= f_{rpm} N_{rt} \pm n_{we} f_i \quad a=1 \text{ 일 때} \quad (2)$$

= Rotor bar pass frequency  $\pm$  Line frequency harmonics

동적 편심

$$f_{dg} = f_i \left[ (a N_{rt} R \pm e) \frac{2(1-s)}{p} \pm n_{we} \right]$$

$$= f_{rpm} N_{rt} \pm n_{we} f_i \pm e f_{rpm}$$

$$(3)$$

= Rotor bar pass frequency  $\pm$  Line frequency  $\pm$  Rotating frequency harmonics

### 2.3 베어링 결함 현상

유도 전동기에서 베어링 문제를 진단하기 위한 새로운 기법으로서 전류 모니터링이 지난 수년간 활발한 연구대상이 되어왔으며, 실험실 시험을 통해 구름 베어링 결함은 전류 스펙트럼에 변화를 일으킨다는 것을 증명하였다.<sup>(7)</sup> 베어링 결함은 공극의 동적편심과 유사하게 공극 가속밀도에 불 균일을 주어 고정자 전류에 변화를 준다. 베어링 결함 주파수는 베어링

제작회사에서 제공되는 곱합 수(bearing multiplier)에 회전주파수를 곱한 것의 전원 주파수 측대파로서 나타나게 된다. 전류 스펙트럼에서 나타나는 베어링 결함 주파수를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$f_b = e f_{rpm} (\text{Bearing Multiplier}) \pm f_i \quad (4)$$

베어링 결함 성분은 전류 스펙트럼 상에서 Fig. 2와 같이 베어링 주파수의 정수(e) 배  $\pm$  라인 주파수에서 나타나므로 결함진단에 이용할 수 있다.

### 2.4 고정자 권선 결함

권선 내에서 선간단락(1 또는 2 선 단락)과 권선 간 단락은 임피던스 불 평형 측정에 의한 온라인 진단 기법으로 고정자권선 고장을 초기에 진단할 수 있다.<sup>(8)</sup> 3권선 중에서 어느 한 권선이 낮은 인덕턴스 값을 나타내면 전동기가 운전되는 동안 불 평형된 자속발생의 원인이 된다. 선간단락이 진전되기 전 절연저하의 초기진단을 위해 연속적인 온-라인 모니터링이 필요하다. 권선내의 선간 단락이 상간, 또는 상과 대지간 결함, 전동기 결함으로 진전되는데 얼마나 걸릴 것인가가 또한 문제이다. 이 문제는 수많은 변수들의 함수이고 각 전동기에 따른 유일하므로 분석하기는 어렵다.

유도 전동기에 대하여 연속 온-라인 모니터링 시스템에서 결함을 검출하기에는 고장에 다다른 시간이 너무 짧으므로 고정자 권선의 선간단락을 진단하는 것이 매우 어려울 수도 있다. 그러므로 고정자 권선에 선간단락이 진단된 경우, 지체 없이 조치를 취하고 고장이 발생한 전동기를 새 전동기로 교환하여야 한다.

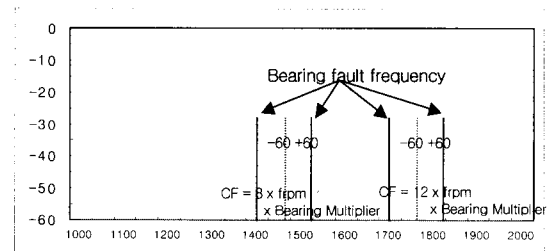


Fig. 2 Bearing fault frequency at current spectrum

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 전동기 결합측정 실험 장치를 보여준다. 시험 전동기는 베이스에 볼트로 체결되어 각종 결합 전동기를 쉽게 교환 설치할 수 있는 구조로 되어있고, 전동기에 부하를 주기위해 유압제동장치가 커플링을 통해 연결되어 있다. 데이터 측정은 Fig. 4와 같이 전동기 제어단자함에서 전압과 전류 프로브를 통해 측정된 신호를 주파수 분석기에서 진단하도록 되어있다.

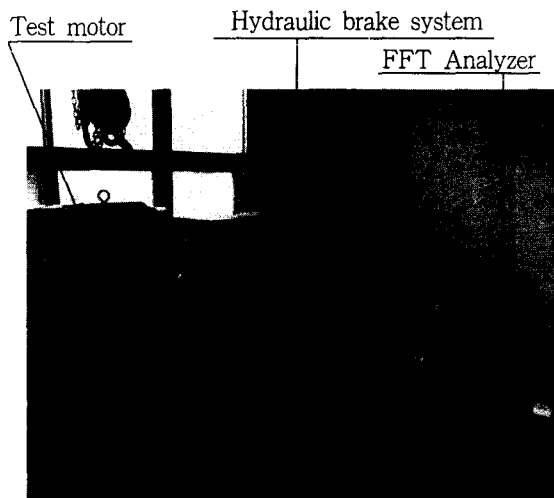


Fig. 3 Induction motor test bench

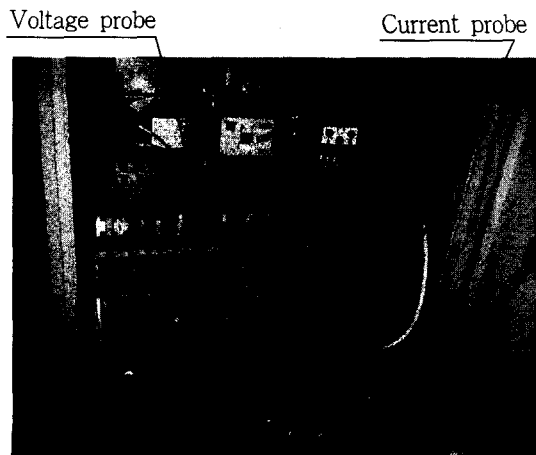


Fig. 4 Photograph of the voltage and current probe in the motor control panel

실험에 사용된 전동기는 정격전압 220 V, 30 kW, 4극 유도전동기로서 각종 결함을 시뮬레이션하기 위해 Table 1과 같은 4가지의 결함 전동기를 만들어 정상 전동기와 비교 실험하였다. 특히 신호 패턴이 부하율에 따라 큰 차이를 보였으므로 20~100%까지 변경시키면서 시험한 후, 분석한 데이터는 80%의 데이터를 기준으로 비교 분석하였다.

Table 1 Fault simulation motor for current signature test

1	Rotor bar fault	2 rotor bars broken among 56 bars
2	Rotor eccentricity	0.2 mm off centered rotor
3	Bearing fault	Outer race spall at drive side bearing
4	Stator winding fault	2 shorted turn in one phase winding

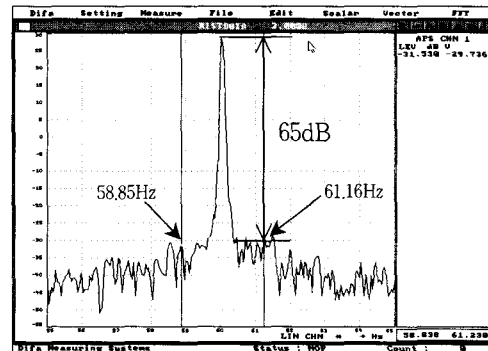


Fig. 5 Current spectrum of a normal motor

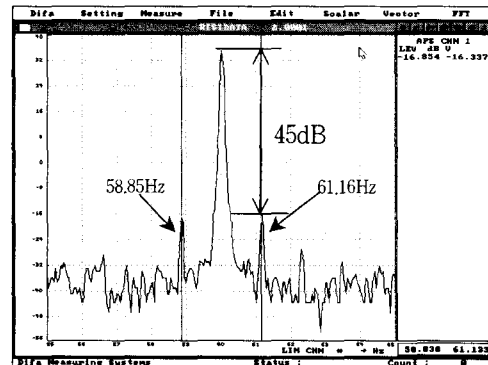


Fig. 6 Current spectrum of a motor with rotor bar fault

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 회전자 봉 결합

회전자 봉에 결합이 있는 경우 60 Hz를 중심으로  $\pm pf_s$  Hz에서 측대파(sideband)가 나타난다. 측대파는 60 Hz와 매우 근접하고 있어 고해상도로 분석하여야 하며, 회전자 결합이 심할수록 60 Hz 성분과 측대파(sideband) 성분과의 차이가 점점 커지므로 쉽게 회전자 결합을 확인할 수 있다.

이 측대파로부터 슬립주파수는 식 (5)와 같이 구해질 수 있다.

$$f_s = \frac{f_l(60) - 58.85(\text{left sideband})}{p(\text{극수})} = 0.288 \text{ Hz} \quad (5)$$

Fig. 5의 정상 전동기에서는 왼쪽 측대파 58.85 Hz, 오른쪽 측대파 61.16 Hz의 레벨이 60 Hz 레벨과의 차이가 65 dB 이상으로 매우 크다. 이것은 회전자 전류가 회전과 함께 균일하게 흐른다는 것으로 회전자에 결합이 없음을 의미한다. Fig. 6은 왼쪽 측대파 58.85 Hz, 오른쪽 측대파 61.16 Hz에서 60 Hz와의 레벨차이가 45 dB로서 회전자의 회전과 함께 전류가 변화(진폭변조)를 나타내고 있음을 의미하는 것으로 회전자에 문제가 있음을 나타낸다. 이 결합 전동기는 Table 1에서와 같이 회전자 봉 2개를 절단시킨 것으로 측정과 일치한다.

##### 4.2 편심불량

###### (1) 정적 편심 주파수 분석

30 kW의 전동기로 시험한 결과, 정상전동기 스펙트럼은 Fig. 7과 같이 하모닉 성분이 전혀 없으나, 편심불량 전동기의 스펙트럼은 Fig. 8과 같이 많은 하모닉 성분을 동반하였다.

정적 편심과 동적 편심에 관한 식 (2),(3)을 이용한 하모닉 주파수를 계산하면 각각 Table 2, Table 3과 같다. 측정된 스펙트럼의 주파수 성분이 계산된 성분과 일치하는 것을 추출하여 Table 2, 3을 완성하였다. Table 2의 정적 편심 표에서는 많은 주파수 성분이 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 실험에 사용된 결합 전동기가 Table 1과 같이 정적 편심 불량을

삼입시킨 것으로 이론과 일치하였다.

계산식에서 회전자봉의 수가 알려진 경우 편심은 매우 쉽게 발견할 수 있지만, 회전자봉수는 제조자의 설계 대외비로 되어있어 잘 알지 못하는 경우가 대다수다. 본 실험의 경우도 회전자봉 수는 제조자의 사양을 통해서 알 수가 없었다. 따라서 모든 주파수 성분을 종합하여 가장 일치하는  $N_{rt}$ (회전자봉 수)를 검색하여야 한다. 회전수( $f_{rpm}$ )는 정확히 알았으므로 이를 바탕으로 스펙트럼 성분과 가장 잘 맞는 전원 하모닉을 배열한 Tabel 2의 측정값으로부터 식 (6)과 같이 계산하면  $N_{rt}$ 를 찾을 수 있다.

$$N_{rt} = \frac{1609.73 + 1729.73}{2f_{rpm}} = 56 \quad (6)$$

실제 측정에 사용된 전동기의 회전자봉 수를 확인한 결과 56개로서 실험 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

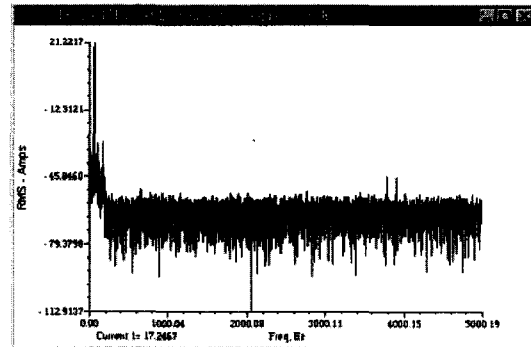


Fig. 7 Frequency spectrum of the normal motor

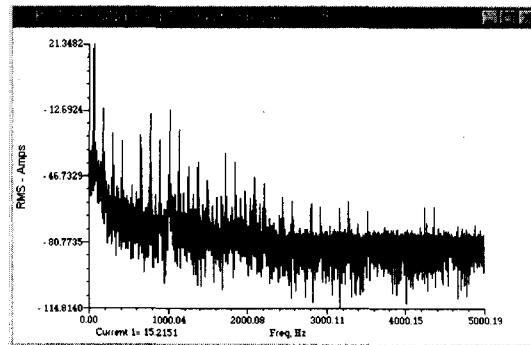


Fig. 8 Frequency spectrum of the motor with the eccentricity

(2) 동적 편심 주파수 분석

식 (3)을 이용하여 동적 편심 주파수를 계산하여 Table 3을 완성시켰다. 계측된 스펙트럼 주파수 성분에서 Table 3의 주파수와 일치하는 주파수를 찾았으나, 일치하는 성분이 전혀 나타나지 않았다. 이것은 실험에 사용된 결합 전동기가 정적 편심 불량만을 삽입시킨 것으로 실제와 일치한다. 전동기가 편심이 전혀 없는 이상적인 상태라면, Fig. 7과 같이 전류 스펙트럼에서 높은 주파수 성분에 피크가 전혀 없는 경우, 회전자봉 수  $N_r$ 를 찾을 수 없다. 그러나 편심에 결합이 없다면  $N_r$ 를 계산할 수 없어도 지장은 없을 것이다.

4.3 베어링 결함

베어링 결함을 진단하기 위해서 진동측정에 의한

결합진단 방법을 많이 이용해 왔다. 그러나 전류모니터링에 의한 결합진단방법은 진동 센서와 전치증폭기를 사용하는 방법과 비교하여 상대적으로 계측이 쉽고 저렴한 전류 변환기를 사용할 수 있다는 것이 큰 장점이다. 전류 스펙트럼에 의한 베어링 고장 주파수는 베어링 특성주파수의 정수배(하모닉) ± 전원주파수에서 성분이 나타난다. 실험 전동기에 사용된 베어링의 곱합수는 베어링 제작사 사양에서 다음과 같이 제시되었다.

부하 측 (6312C3): BPF1=4.987, BPFO=3.013, BSF=1.903

반부하측(6310C3): BPF1=4.982, BPFO=3.018, FTF=0.377, BSF=1.914

전동기의 회전주파수가  $f_{rpm} = 29.817$  Hz이므로 베어링 결함에 의해 나타날 수 있는 성분은 부하 측과 반부하측 베어링에서 각각 BPF1, BPFO, FTF, BSF의 특성 주파수를 계산할 수 있다. 식 (4)으로부

Table 2 Harmonic frequency list of the motor static eccentricity

Equation	Calculated Freq. [Hz]	Level [dB]
$f_{rpm}N_{rt} - 9F_L$	1129.73	-
$f_{rpm}N_{rt} - 7F_L$	1249.73	-
$f_{rpm}N_{rt} - 5F_L$	1369.73	-
$f_{rpm}N_{rt} - 3F_L$	1489.73	1489.88
$f_{rpm}N_{rt} - 1F_L$	1609.73	-57.44
$f_{rpm}N_{rt} + 1F_L$	1729.73	-34.97
$f_{rpm}N_{rt} + 3F_L$	1849.73	1849.84
$f_{rpm}N_{rt} + 5F_L$	1969.73	1970.34
$f_{rpm}N_{rt} + 7F_L$	2089.73	2090.06
$f_{rpm}N_{rt} + 9F_L$	2209.73	2209.79
$f_{rpm}N_{rt} + 11F_L$	2329.73	-
$f_{rpm}N_{rt} + 13F_L$	2449.74	2450.01
$f_{rpm}N_{rt} + 15F_L$	2569.73	2570.52
$f_{rpm}N_{rt} + 17F_L$	2689.73	-
$f_{rpm}N_{rt} + 19F_L$	2809.73	-
$f_{rpm}N_{rt} + 21F_L$	2929.73	2930.47

'-' Indicates below -70 dB  
Rotating speed = 1789 rpm (29.8717 Hz)

Table 3 Harmonic frequency list of the motor with dynamic eccentricity

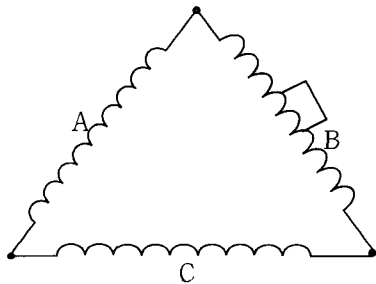
Equation	Calculated Freq. [Hz]	Level [dB]
$f_{rpm}N_{rt} - 5F_L - f_{rpm}$	1339.91	-
$f_{rpm}N_{rt} - 5F_L + f_{rpm}$	1399.55	-
$f_{rpm}N_{rt} - 3F_L - f_{rpm}$	1459.91	-
$f_{rpm}N_{rt} - 3F_L + f_{rpm}$	1519.55	-
$f_{rpm}N_{rt} - 1F_L - f_{rpm}$	1579.91	-
$f_{rpm}N_{rt} - 1F_L + f_{rpm}$	1639.55	-
$f_{rpm}N_{rt} + 1F_L - f_{rpm}$	1699.91	-
$f_{rpm}N_{rt} + 1F_L + f_{rpm}$	1759.55	-
$f_{rpm}N_{rt} + 3F_L - f_{rpm}$	1819.91	-
$f_{rpm}N_{rt} + 3F_L + f_{rpm}$	1879.55	-
$f_{rpm}N_{rt} + 5F_L - f_{rpm}$	1939.91	-
$f_{rpm}N_{rt} + 5F_L + f_{rpm}$	1999.55	-
$f_{rpm}N_{rt} + 7F_L - f_{rpm}$	2059.91	-
$f_{rpm}N_{rt} + 7F_L + f_{rpm}$	2119.55	-
$f_{rpm}N_{rt} + 9F_L - f_{rpm}$	2179.91	-

'-' Indicates below -70 dB

터 1-30차까지의 하모닉을 포함하는 모든 주파수를 계산하여 진단에 이용하나, Table 4에는 부하측 베어링

**Table 4** Frequency list of the motor with bearing fault

n	BPM+90	BP	BP-90	BP+60	BP-60	BP+60
7	980.87	1040.87	1100.87	568.86	628.86	688.86
8	1129.56	1189.56	1249.56	658.70	718.70	778.70
9	1278.26	1338.26	1398.26	748.54	808.54	868.54
10	1426.95	1486.95	1546.95	838.37	898.37	958.37
11	1575.65	1635.65	1695.65	928.21	988.21	1048.21
12	1724.34	1784.34	1844.34	1018.05	1078.05	1138.05
13	1873.04	1933.04	1993.04	1107.89	1167.89	1227.89
14	2021.74	2081.74	2141.74	1197.72	1257.72	1317.72
15	2170.43	2230.43	2290.43	1287.56	1347.56	1407.56
16	2319.13	2379.13	2439.13	1377.40	1437.40	1497.40
17	2467.82	2527.82	2587.82	1467.24	1527.24	1587.24
18	2616.52	2676.52	2736.52	1557.07	1617.07	1677.07
19	2765.21	2825.21	2885.21	1646.91	1706.91	1766.91
20	2913.91	2973.91	3033.91	1736.75	1796.75	1856.75



**Fig. 9** Shorted turns in the delta wound motor

**Table 5** Voltage, current & impedance unbalance

Phase	Voltage [V]	Current [A]	Impedance [Ω]
A	445.8	31.3	14.2
B	438.4	38.8	11.3
C	442.4	29.6	14.9
% Deviation	0.9[%]	16.8[%]	16.3[%]

링의 BPF1과 BPFO에 대한 주파수를 7-20차까지만 나타내었다.

측정 결과, 베어링 결함 전동기의 주파수 패턴은 Fig. 2에서 설명한 바와 같이 두 피크가 120 Hz의 간격을 갖는 주파수 쌍으로서 Table 4와 같이 BPFO의 12차 하모닉  $\pm 60$  Hz와 16차 하모닉  $\pm 60$  Hz 주파수와 일치하였다. 이것은 전동기 베어링의 외륜에 결함을 삽입한 것으로 고장부위와 주파수가 일치한다. 120 Hz 간격으로 떨어져있는 두 성분의 식(7)과 같이 중심 주파수(CF)를 회전주파수( $f_{rpm}$ )로 나누어도 정수배가 안 된다는 것이 베어링 고장 주파수 성분의 특징이다.

$$\frac{CF(1078.05)}{f_{rpm}(29.8166)} = 36.166 : \text{None integer (7)}$$

베어링 고장 주파수는 편심 성분과 부분적으로 주파수를 공유하고 있다. 즉 베어링 고장 전동기에서 나타나는 주파수는 축 편심 주파수와 일부 일치한다. 이는 베어링 고장과 축의 편심이 모두 공극의 불균형 현상을 초래하기 때문에 베어링에서 나타나는 주파수가 회전자 회전 주파수의 배수로 기술될 수 있기 때문이다.

#### 4.4 고정자 권선 결함

전동기에 공급되는 전원라인에서 각 상의 전압과 전류를 측정하여 각각의 합성 임피던스 값을 비교하면 고정자 권선의 결함을 감지할 수 있다.<sup>(8)</sup> Fig. 9와 같이 델타 권선 전동기의 상 B에 2턴을 단락시켰다. 권선 단락 전후를 시험한 결과, 단락 전에 각 상의 임피던스 불 평형은 3% 미만으로 양호하였다. 2턴을 단락시킨 후에 시험한 전압, 전류 및 인덕턴스 측정 값은 Table 5와 같이 전류와 임피던스 편차가 15% 이상으로 허용 기준치(5%)보다 매우 높게 나타났다. 이것을 이용하면 고정자 권선의 상간 또는 권선간 단락을 검출해 낼 수 있다는 것을 알았다.

### 5. 고장 전동기의 진단 알고리즘 개발

결함을 검출하는 계산식은 모두 회전주파수로부터 계산되므로 진단 알고리즘의 신뢰도에 가장 큰 영향을 주는 변수는 회전수임을 알았다. 정확한 회전수를

알지 못하는 경우, 회전자 봉 결합 주파수, 정적 및 동적 편심 주파수에 더 큰 오차가 발생하므로 고장 분석의 정확도가 떨어진다. 전류측정에 의한 결합 검출 방법에서는 타코 센서로 회전수를 직접 측정하는 것이 아니라 전류 신호만을 분석한 스펙트럼에서 회전주파수를 찾아내기 때문에 회전수를 찾아내지 못할 경우도 있고, 또 주파수 해상도에 따라 큰 오차를 동반한다. 이 한계를 극복하기 위해 본 실험에서는 주파수 분석을 고해상도로 하고, 주파수 분석 시 사용한 창 함수(window function)에 따른 보간(interpolation)을 적용하여 정확한 회전수를 계산하여 결합검출의 신뢰도를 높였다. 본 알고리즘에서 계산한 회전수는 스트로보스코프로 직접 측정한 회전수와 정확히 일치함을 확인하였다. 이상의 실험 데이터를 바탕으로 다음과 같이 결합 전동기의 특징 주파수를 추출하

여 고장을 자동으로 진단할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

(1) 회전자봉결합 검출 알고리즘 : 0~200 Hz까지 4086라인으로 주파수 분석하여 60 Hz와 측대파 사이의 레벨차를 구한다. 결합의 심각 도는 경험적 실험 수치인 참고문헌 (5)에 따라 severity 7단계로 구별하도록 구성하였다. 60 Hz ± PPF가 측대파인 것을 확인하기 위해 정확한  $f_{rpm}$  으로부터 슬립 주파수를 구하고 극수를 곱하여 PPF를 확인하도록 하였다.

(2) 정적 편심 검출 알고리즘 : 0~5000 Hz, 4086라인의 스펙트럼으로부터 전원 주파수의 정수 배되는 하모닉 성분을 제외하고 Table 2에 나타난 주파수와 일치하는 성분을 찾아 정적편심을 검출하도록 구성하였다.

(3) 동적 편심 검출 알고리즘 : 0~5000 Hz, 4086라인의 스펙트럼으로부터 전원 주파수의 정수 배되는 하모닉 성분을 제외하고 Table 3에 나타난 주파수와 일치하는 성분을 찾아 동적편심을 검출하도록 구성하였다.

(4) 베어링 결합 검출 알고리즘 : 0~5000 Hz, 4086라인의 스펙트럼으로부터 전원 주파수의 정수 배되는 하모닉 성분, 정적 편심 및 동적 편심의 주파수 성분을 제외하고 Table 4에 나타난 리스트와 같이 각 베어링의 BPFI, BPFO, FTF, BSF에 대한 1-30차까지의 하모닉 주파수와 일치하는 성분을 찾아 베어링 결합을 검출하도록 구성하였다.

(5) 고정자 결합 검출 알고리즘 : 각 상의 임피던스 불 평형을 측정하여 5% 이상이면 고정자결함으로 판단하도록 하였다.

데이터 취득 하드웨어를 구성한 뒤 전류와 전압 프로브로부터 측정된 전류신호는 A/D 및 FFT처리를 하여, Fig. 10과 같은 각각의 결합 진단 알고리즘으로부터 결합을 검출하도록 하였다. 기계 결합 시뮬레이션 실험키트에서 실험해 본 결과, 고장이 발생한 경우 Fig. 11에 보인 것처럼 즉시 고장이 발생했음을 나타내어 현장 적용 가능성을 입증하였다.

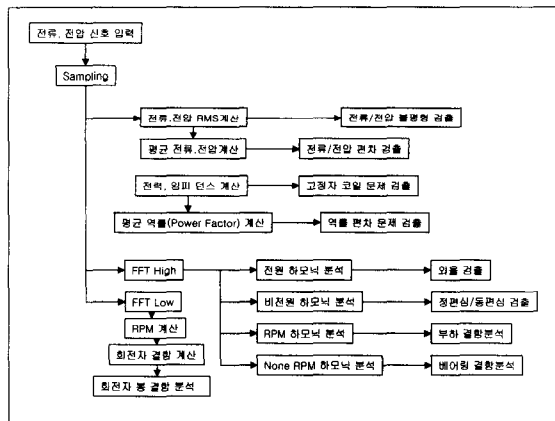


Fig. 10 Fault diagnostic algorithm for the current monitoring system

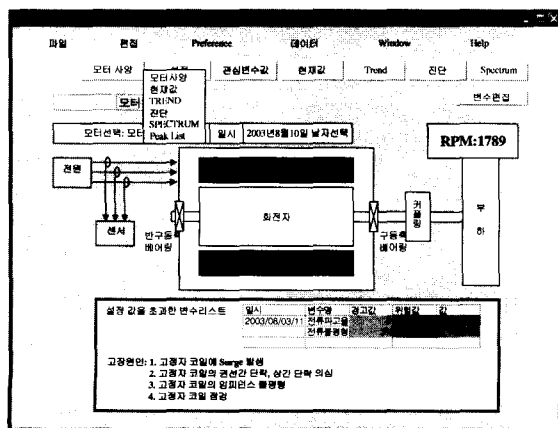


Fig. 11 Diagnostic result display of the algorithm

## 6. 결론

본 연구에서는 유도 전동기의 전류측정에 의해 전동기의 결합을 효율적으로 검출할 수 있다는 것을 확인하였으며, 각 결합에 따라 특정한 주파수 성분이 나타남을 증명하였다. 실험실 계측과 현장 측정에서



업은 전동기의 결함 데이터로부터 전동기의 결함을 자동으로 검출하는 알고리즘을 개발하였다. 기존의 전류측정에 의한 결함 분석방법에서는 수동으로 스펙트럼을 분석하여 결함을 검출해야 하고, 회전수를 계산하는데 오차를 동반하며, 회전자봉 수를 정확히 알아야 분석이 가능하였다. 본 연구에서는 주파수 스펙트럼의 회전 주파수 성분을 보간(interpolation)하여 정확한 회전수를 계산해 내 회전수 오차문제를 해결하였고, 회전자봉 수는 모든 하모닉 성분을 계산식과 비교하여 최적의 회전자봉 수를 결정하는 방법을 고안함으로써 결함 검출의 신뢰성을 높였다. 완성된 알고리즘을 현장의 다른 전동기에 적용하여 결함검출의 신뢰성을 확인하였다. 향후 알고리즘을 상용 프로그램을 개발하여 산업현장에 적용할 수 있는 상품으로 개발을 추진할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- (1) Bowers, S. V., 1996, "Integrated Strategy for Predictive Maintenance of AC Induction Motors," P/PM technology Magazine, pp. 34~40.
- (2) Taver, P. J., Gaydon, B. G. and Ward, D. M., 1986, "Monitoring Generators & Large Motors," IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B. No. 3.
- (3) Kryter, R. C. and Haynes, H. D., 1989, "Condition Monitoring of Machinery Using of Motor Current Signature," Journal of Sound and Vibration, pp. 14~21.
- (4) 정병훈, 신대철, 2002, "전류신호를 이용한 유도전동기의 회전자봉 결함검출에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 4 호, pp. 287~293.
- (5) Berry, J. E., 1999, Comparison of Motor Current Analysis and Vibration Analysis in Detecting Rotor Bar and Air Gap Eccentricity Problems in Induction Motors, Chap. 4, Technical Associates of Charlotte, P. C.
- (6) Cameron, J. R. and Thomson, B., 1986, "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors," IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No 3, pp. 155~163.
- (7) Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F. and Bartheld, R. G., 1995, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring," IEEE Trns. Ind. Application vol. 31, pp. 1274~1279.
- (8) Bethel, N., 1999, "Improving Motor Reliability through Static and Dynamic Testing," P/PM Technology Journal, August, pp. 32~33.
- (9) 안경룡, 한천, 양보석, 전재진, 김원철, 2002, "ART-kohonen 신경망을 이용한 회전기계의 결함진단 알고리즘," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 10 호, pp. 799~807.
- (10) Campbell, W. R., 1985, "Diagnosing Alternating Current Electric Motor Problems, Part 2: Electromagnetic Problems," Vibrations Journal, Vol. 1 No. 3, pp. 12~15.