

## 이상진동에 의한 유도전동기의 진단 Diagnosis of Induction Motor from Abnormal Vibration

양 보석\*, 김 남철\*\*, 장우교\*\*, 신광재\*\*

Bo-Suk Yang, Nam-Sul Kim, Woo-Kyo Jang, Kwang-Jae Shin

### 1. 서론

전기회전기계중 유도전동기는 구조가 간단하고 보수가 용이하며 또한 가격이 비교적 저렴하므로 회전기계의 구동기로서 널리 사용되고 있다. 산업플랜트에서 많이 이용되고 있는 회전기계의 경우, 원가절감을 위한 경량화와 성능향상을 위한 고속화 추세에 따라 설비의 안정적인 보수, 유지에 위해 회전기계의 고장예측은 매우 중요하다.<sup>1)</sup>

유도전동기에 전기 및 기계적 결함이 발생하였을 경우 전동기의 진동을 발생시키는 원인이 되고, 이는 기계의 수명, 제품의 품질과 성능을 저하시키게되며 생산원가의 상승을 초래하게된다. 그러므로 진동신호를 통해 회전기계의 고장을 분석, 진단 및 예측하는 것은 매우 중요하다. 이는 진동신호가 회전기계의 건전성을 나타내는 중요한 지표가 되고 이상이나 고장의 초기검지에 적합할뿐만 아니라 이상이나 고장이 발생하였을 때의 그 원인을 추정하는데에 유익한 자료가 되기 때문이다.

유도전동기와 관련된 진동문제는 일반회전기계와 유사한 기계적 문제와 전동기 특유의 전자적 문제의 조합으로 나타난다.<sup>2)</sup> 특히 종래에는 고려할 필요가 없었던 전자력의 진동에 대한 영향을 무시할 수 없게되어가고 있고, 따라서 기계적인 진동뿐만 아니라 전자적인 진동문제도 충분히 검토하여야 한다. 즉 전동기의 이상에는 고정자의 철심이나 권선이 느슨해지거나 열화되어 단락사고의 원인이 되고 회전자의 도체가 절손된다든지 단락되어 기동이 되지 않게된다. 베어링 손상이나 축의 굽힘은 고정자와 회전자의 접촉사고의 요인이 되며, 회전자의 경년변화와 오손에 의한 중량불평형은 이상진동을 발생하고 회전자의 접촉이나 베어링손상의 사고요인이 된다.

본 논문에서는 산업용으로서 널리 이용되고 있는 3상 유도전동기의 전기적결함에 의해 발생하는 전자진동문제를 제

계적으로 검토하고, 이를 이용하여 전동기 진동의 진단법을 신경회로망을 이용하여 구축한다. 그리고 그중에서 비교적 자주 발생하는 공극(air-gap)의 정적편심에 대해 실험을 수행하고, 그 결과를 신경회로망을 이용한 진단법에 적용하여 본 진단법의 유용성을 확인한다. 또한 현장에서 발생된 전기적인 결함에 대한 진동측정 data를 이용하여 진단이 정상적으로 수행되는가를 조사하여 본 진단법의 가능성을 조사한다.

### 2. 전동기의 전자적 진동특성

#### 2. 1 고정자 이상의 경우

고정자와 회전자 사이에는 자극(p)에 의한 전자력(흡인력)이 있고, 고정자를 변형시키도록 작용하므로 진동을 발생하게 한다(Fig. 1). 일반적으로는 전동기의 기초나 공통베드와 케이싱 사이의 볼트가 느슨해져 전동기의 공진주파수가 낮아지고 2f<sub>0</sub>에 10%이내로 접근하여 공진을 일으키는 경우가 많으며, 고정자권선의 각 상사이(단상, 삼상권선)에 전기적 불평형이 있어도 전자 진동을 발생한다. 철심이나 고정자권선이 느슨해져 고정자의 진동이 증대할 때는 일반적으로 거더진동을 수반하므로, 기본성분(2f<sub>0</sub>)외에 정수배(m=2,3,4 ... )성분도 포함하며, 전자진동의 공진에 의한 진동분포는 특징이 있는 형태를 보인다.

Fig. 1에서 회전자계가 p/2f<sub>0</sub>의 주기로 1회전하면, 회전자계의 자극(p)이 통과할 때마다 자기흡인력(전자력)은 p회 변동하고, 전자진동의 주파수는 회전자계의 동기주파수(2f<sub>0</sub>/p)와 전동기극수(p)의 곱(2f<sub>0</sub>)으로 되어 진원주파수(f<sub>0</sub>)의 2배로 전자진동을 일으키게된다. 이 진동은 전동기의 전원을 차단하면, 일순간에 소멸한다.

#### 2. 2 공극(air-gap) 불평형의 경우

고정자와 회전자사이에 편심이 되면 공극이 불평형으로 되고 전자진동을 발생한다. 이 불평형에는 회전자가 고정자의 일방향으로 벗어나는 정적 불평형(static unbalance)과 윤진

\* 부산수산대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 부산수산대학교 기계공학과 대학원

중에 회전자가 휘뒹며 생기는 동적 불평형(dynamic unbalance)이 있고, 서로 다른 진동특성을 발생한다. 공극이 넓으면 기계적으로 안전하지만 공극의 자기 저항이 크므로 여자 전류가 커지고 전동기의 역율이 떨어지게 된다. 그러나 공극이 너무 작으면 기계적으로 약간의 불평형이 생겨도 진동과 소음의 원인이 되고, 누설 리액턴스가 증가하여 전동기의 순간 최대출력이 감소하고 철손이 증가하게 된다.

### (1) 정적 불평형에 의한 전자진동

고정자와 회전자사이의 축심이 일치하지 않고 편심  $e$ 가 발생하게 될때 발생하는 현상으로 회전자계( $2f_0/p$ )가 최소공극의 위치인 A점을 통과할 때 공극이 작은 A점에서는 자기흡인력이 크게 작용하고 반대로 최대 틈새인 B점에서는 자기흡인력이 최소로 되어 A점과 B점사이에 불평형 전자력을 발생하고, 자극의 수( $p$ )만큼 변동한다(Fig. 2). 이 때문에 진동수에는  $2f_0$ 의 주파수를 갖는 전자진동을 발생한다. 진동수는 전원주파수의 2배로, 고정자의 이상시에 발생하는 진동수와 같은 전자진동이므로 판별이 일반적으로 어렵다. 진동진폭은 공극의 불평형이 크게 될수록 증대하고, 전동기 부하에도 관계한다. 통상 불평형량, 즉 편심( $e$ )이 공극의 10% 이내에서는 큰 문제는 없다.

### (2) 동적불평형에 의한 전자진동

경년변화나 외력에 의해 발생하는 축굽힘(shaft bent)이나 회전자의 중량불평형 등에 의한 휘뒹림이 원인으로, 회전자가 고정자내에서 최소공극점(Fig. 3의 A점)이 편심으로 휘도는 것에 의해 기계적인 진동이 불평형전자력을 조장하게 되어 불평형전자력( $2f_0/p$ )과 불평형력( $f_r$ )을 발생하게 되고, 자극( $p$ )이 A점을 추월하므로 불평형전자력은 Fig. 3 b)와 같이 진동수  $2sf_0$ 로서 맥동한다. 양자에 의한 진동을 발생할 수 있으나, 일반적으로는  $2sf_0$ 의 맥동을 갖는 불평형진동이 크게 발생한다. 진동수는 회전자의 회전속도  $f_r=(2(1-s)f_0/p)$  또는 회전자계의 동기회전속도( $2f_0/p$ )중의 어느 하나가 된다. 전동기부하를 증가하면 슬립( $s$ )이 크게되기 때문에 주기는 짧게되며, 전동기는 진동의 맥동에 의해 일정한 맥놀이음을 발생한다.

## 2. 3 회전자도체 이상의 경우

농형 유도전동기에서는 회전자도체의 철손이, 권선형 유도전동기에서는 회전자 권선회로의 전기적 불평형이 원인으로 발생한다. 회전자 도체의 A점에 2차전류가 흐르지 않으므로 불평형전자력을 발생하고 자극( $p$ )가 A점을 추월하므로  $2sf_0$ 의 맥동을 일으킨다(Fig. 4). 한편 A점의 도체에 2차 전류가 흐르지 않으므로 고정자의 1차전류는 역상(逆相)기전력에 의한  $2sf_0$ 의 맥동을 발생한다.

공극의 동적 불평형과 같은 진동현상이기 때문에 판별이 어려우며, 전동기의 부하전류도 진동의 맥동주파수로 맥동하므로, 부하전류의 확대(zooming)스펙트럼상에서 전원주파수

의 주위에  $\pm 2sf_0$ 의 sideband가 발생한다. 공극의 동적불평형의 경우는 이 sideband가 발생하지 않으므로 부하전류를 분석하므로써 이 두 원인을 구별할 수 있다.

## 3. 실험

### 3. 1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내고 있다. 본 실험장치는 공극의 정적편심에 의한 전자진동특성을 조사하기 위해 상용전동기의 베어링 하우징 부분을 제거하고, 대신에 상하로 미세조정이 가능하도록, 즉 편심양을 조절할 수가 있도록 베어링하우징을 Fig. 5과 같이 제작하였다. 실험에 사용된 전동기는 5IIP 3상유도전동기(국내 II사 제품)로 전동기 사양은 Table 1과 같다.

진동계측은 본 실험의 경우 자기장의 발생으로 인한 영향으로 와전류형 비접촉식 변위계를 사용하지 않고 Laser식 비접촉 변위계를 사용하였고, 변위센서로부터의 진동신호를 FFT분석기에서 주파수분석과 파형분석을 하였으며, X-Y기록기에서 기록하였다. 공극(air-gap)은 thickness gage로 측정하였다. 실험은 미세조정너트를 이용하여 Table 2의 실험 조건으로 무부하상태에서 수행하였다.

Table 1 Motor specification

|              |          |
|--------------|----------|
| Output       | 5 IIP    |
| Pole No.     | 4        |
| No. of slots | 36       |
| Bearing No.  | # 6205   |
| Rated speed  | 1730 rpm |
| Slip         | 3.89%    |

Table 2 Experiment conditions

| n          | 1     | 2   | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| T(mm)      | 0.875 | 0.7 | 0.6   | 0.5   | 0.4   | 0.3   |
| $\epsilon$ | 0     | 0.2 | 0.314 | 0.429 | 0.543 | 0.657 |

### 3. 2 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 편심율( $\epsilon$ ) 0인 경우와 양 지지베어링에서 하우징을 수직으로 편심율을 0.314까지 상승하였을 경우의 수직방향에서 측정된 진동변위진폭을 나타내고 있다. 편심율이 0인 경우는 회전자의 잔류불평형과 공극조정의 미세한 오차에 의해 1X성분이 발생하고 있다. 4극전동기는 2극전동기와 달리 회전자가 1/4회전시 극이 역전되므로 불평형 전자력은 4번 변동하게 되고 진동수는 전원주파수가 된다. 그림 b)의 편심율 0.314의 경우, 1X성분이 크게 증가되고 이의 배수성분도 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 1800rpm에서 각 편심율의 변화에 대한 1X성분의 특성을 보여주고 있다. 편심율의 증가에 따라 진동진폭이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 정적 불평형에 따른 자기흡인력의 불평형전자력이

크게 되기 때문이다.

#### 4. 신경회로망을 이용한 진동진단

##### 4.1 신경회로망<sup>4)</sup>

실현으로 부터 진동기의 결합에 따른 진동주파수를 입력 데이터로 하고, 출력은 진단에 대응하여 학습을 수행한다. 신경회로망을 구성하는 각 유니트의 결합계수를 변경하는 학습에는 일반적으로 널리 사용되는 오차역전파(error back propagation)법을 이용하였다. 이 방법은 출력층의 출력치와 교사신호의 제공오차를 감소시키기 위해 감도해석의 신호를 출력층, 중간층의 순으로 계산하여 결합계수를 수정하는 방법이다. 여기서 제공오차 E는 다음 식과 같이 정의된다.

$$E = \sum_{p=1}^p \sum_{j=1}^q (T_{ij} - o_{ij})^2 / 2 \quad (1)$$

여기서  $T_{ij}$ 는  $i$ 번째 입력 패턴에 대한  $j$ 번째 유니트의 교사신호,  $o_{ij}$ 는  $i$ 번째 입력에 대한  $j$ 번째 유니트의 출력신호,  $p$ 는 입력패턴,  $q$ 는 출력층의 유니트수이다.

오차역전파법의 최대 장점은 계층형 회로망의 중간층 유니트의 학습을 가능하게 함으로써 학습능력을 크게 증가시키는 것이다. 한편 문제점으로는 적절한 초기치가 주어지지 않으면 학습에 시간이 많이 걸리게되며, 해 곡면상에 다수 존재할 수 있는 국소최소치(local minimum)에 해가 수렴하여 대국적 최소치(global minimum)에 도달하지 않게 될 수 있다는 점이다.

각 유니트의 입출력관계에 비선형성을 제공하기 위해 활성화함수(activation function)로 1계 미분이 본래의 함수로 표현될 수 있고, 출력이 연속치가 되는 것으로 부터 [0, 1]에서 연속적으로 변하는 시그모이드 함수를 사용하였다. 이 함수  $f(u_j, u_0)$ 는 각 유니트의 내부 포텐셜 에너지( $u_j$ )와 온 온도( $u_0$ )의 함수로 다음식과 같이 표현된다.

$$H_j = f(u_j, u_0) = 1 / \{1 + \exp(-2u_j/u_0)\} \quad (2)$$

여기서  $H_j$  :  $j$ 번째 유니트의 출력

$u_j$  :  $j$ 번째 유니트의 내부 포텐셜 에너지

$u_0$  : 시그모이드 계수의 온도

식 (2)에서 시그모이드 함수의 기울기는 온도의 역수에 상 당하고, 이 함수의 형상은 학습에 큰 영향을 미치게된다. 즉 기울기가 너무 작게되면 시그모이드 함수의 비선형성이 강하게되어 신경회로망이 갖는 비선형 매핑능력을 손상시키게 되고, 결합계수의 변화에 대한 출력치의 감도가 적게되므로 수정량이 적게되어 수렴시간이 증대된다. 역으로 경사가 너무 크게되면, 함수가 계단형 함수(step function)에 가깝게되

어 각 유니트의 출력이 0과 1의 두 값만을 취하게되고, 따라서 학습정도가 매우 나쁘게되거나 학습불능이 되는 경우가 발생하게된다.

##### 4.2 학습과 결합진단의 결과

진동기의 주요가능결함으로 기계적 진동과 전자적 진동의 결합모드를 나타내기 위해 학습패턴으로는 기계적인 진동으로 8종류(F1~F8), 그리고 전자진동에 대해 2장에서 설명한 4종류(F9~F12)를 Table 3과 같이 선정하였고 이들에 대한 증상주파수를 함께 나타내었다.

Table 3 Learning patterns for diagnosis of failure modes

| Failure modes                                                                                                   |     | Symptomatic frequencies                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------|
| Mechanical unbalance                                                                                            | F1  | $f_r$                                                                     |
| Shaft bent, Misalignment                                                                                        | F2  | $f_r, 2f_r$                                                               |
| Mechanical looseness                                                                                            | F3  | $nf_r (n = 1, 2, \dots), f_r/2, 1.5f_r$                                   |
| Outer race defect of ball bearing                                                                               | F4  | $\frac{Z}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$                |
| Inner race defect of ball bearing                                                                               | F5  | $\frac{Z}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$                |
| Ball defect of ball bearing                                                                                     | F6  | $f_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right]$ |
| Cage defect of ball bearing                                                                                     | F7  | $\frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$                |
| Oil whip, oil whirl in sleeve bearing                                                                           | F8  | $0.43 \sim 0.48 f_r (f_n)$                                                |
| Static eccentricity of Rotor                                                                                    | F9  | $2f_0, f_0 [nR_s(1-s)/p \pm k_1]$                                         |
| Weakness/Looseness of stator support, Shorted stator laminations                                                | F10 | $2f_0$                                                                    |
| Looseness stator laminations                                                                                    | F11 | $n(2f_0) (n = 1, 2, 3, \dots)$                                            |
| Dynamic eccentricity, Broken/Cracked rotor bar, Loose rotor bar, Shorted rotor laminations, Poor end ring joint | F12 | $f_r - 2sf_0, f_r, f_r + 2sf_0$                                           |

단,  $f_0$  : 동기 회전주파수 (= 30 Hz)

$s$  : 슬립율 (=  $(f_0 - f_r)/f_0 = 0.0389$ )

$f_r$  : 회전자 회전주파수 (=  $f_0(1-s) = 28.833$  Hz)

$R_s$  : 회전자 슬롯수 (= 36개)

$p$  : 전동기 극수 (= 4)

$d$  : 베어링 볼직경 (= 7.938 mm)

$D$  : 베어링 피치직경 (= 38.5 mm)

$\alpha$  : 전동체(볼 또는 롤러)의 접촉각 (=  $0^\circ$ )

$Z$  : 전동체(볼 또는 롤러)의 갯수 (= 9)

측정한 데이터에서 입력패턴을 결합주파수 F1~F12별로 각 주파수에 대응하는 unit에는 1, 대응하지 않는 unit에는 0을 기록하고, 이와 대응하는 목표출력 패턴은 1, 0의 두개의 값으로 배열한다. 출력패턴에서 1은 결합이 있음을 표시하고 0은 결합이 없음을 표시한다.

본 논문에서는 12가지 결합패턴을 입력패턴으로 하여 NeuralWorks Professional II 프로그램으로 학습을 수행하였다. 학습시 사용된 학습 파라메터의 값은 Table 4와 같다. Fig. 8은 학습을 수행할 따라 감소하는 RMS 출력오차값을 표시한다.

Table 4 Learning parameter

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| Hidden layer No.           | 1         |
| Input layer neuron No.     | 18        |
| Hidden layer neuron No.    | 30        |
| Output layer neuron No.    | 12        |
| RMS output error threshold | 0.01      |
| Initial low, high          | -0.1, 0.1 |

Fig. 9는 12개의 패턴에 대해 오차수렴한 값을 0.01까지 하였을 때의 학습을 완료한 후의 각 학습패턴에 대한 결과중 전자적 진동에 관련된 F9~F12의 결과를 나타낸 것이다. F1~F12는 앞에서 정의한 결합으로 결과출력값이 정확한 1과 0의 값은 아니나 대단히 근접하는 값을 보여준다.

Fig. 10은 본 실험에 의해서 얻어진 회전자와 정적 편심에 대한 실험데이터에 의한 시험패턴에 대해서 네트워크로 진단한 결과중  $\epsilon=0.2$ 와  $\epsilon=0.543$ 의 경우에 대해 나타낸 것으로 비교적 잘 진단되고 있음을 알 수 있다. Fig. 11~13은 실제현장에서 발생한 사례자료에 대한 네트워크 출력결과를 표시하고 있다.

Fig. 11은 펄스구동용 2극 전동기(110kW, 50Hz)의 회전자 봉절손의 경우이다.<sup>3)</sup> 전원주파수( $f_0$ ) 50.01562Hz, 회전주파수( $f_r$ ) 49.6875Hz이고, 회전수의 양측에 맥동성분  $2sf_0$ 의 sideband 주파수가 발생하고 있다.

Fig. 12는 미끄럼베어링지지의 원심압축기 구동용 2극 전동기(3400kW, 50Hz, 2970rpm)의 경우로<sup>3)</sup>, 진동의 주성분주파수는 전원주파수( $f_0$ )의 2배수인 100Hz이고 전원차단시 1초만에 소멸되었다. 이는 공률베드가 느슨하여져 베어링스탠드가 공진을 일으킨 사례로서 고정자 지지부의 느슨함이 원인이었다.

Fig. 13은 국내 D사의 원심식 냉동기 구동용 2극전동기(6.6kV, 60Hz, 3567rpm)에서 발생한 회전자도체(봉)절손과 고정자 이상이 복합적으로 발생한 경우이다. 주된 진동주파수는 전원주파수성분(60.0156Hz), 회전주파수성분(59.6094Hz)과  $2sf_0$ 의 sideband 성분 그리고  $2f_0$ 와 그배수성분( $4f_0, 6f_0, \dots$ )이다. 그림에서 보듯이 비교적 잘 진동원인을 진단하고 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 산업용으로 널리 사용되는 3상유도전동기에서 발생하는 전자적 진동의 특성을 조사하였고, 회전자와 정적 편심시에 발생하는 진동특성을 실험적으로 조사하여, 전동기의 결합진단의 검증자료로 사용토록 하였다. 그리고 현장사례자료들을 이용하여 본 신경회로망을 이용한 진동기 이상진동진단법의 효용성을 검증하였다.

## 참고문헌

- 1) 豊田, 回轉機械診断の進め方, 日本 Plant Maintenance 協會, 1991
- 2) Glenn H. Bate, Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives, Brüel & Kjaer, Application Notes.
- 3) Simogo, T., Intelligent Facilities Diagnosis, Ohm사, 1990
- 4) 최성필, 최원호, 양보석, 신경회로망을 이용한 볼베어링의 결합진단에 관한 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 469-473, 1993

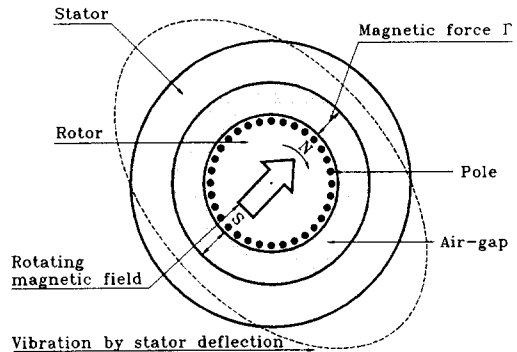


Fig. 1 Magnetic vibration by stator defect

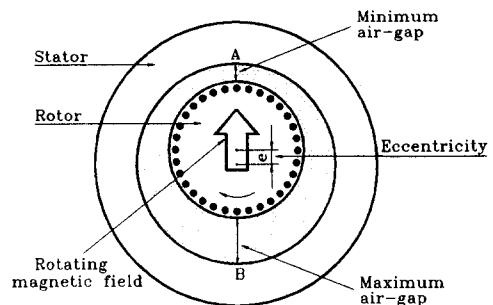
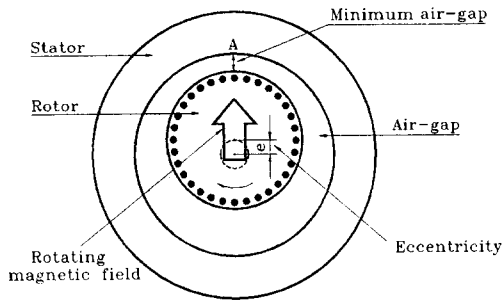
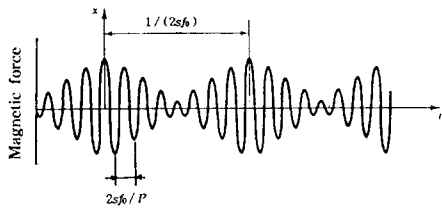


Fig. 2 Magnetic vibration by static eccentricity



a) Mechanism



b) Magnetic force

Fig. 3 Magnetic vibration by dynamic eccentricity

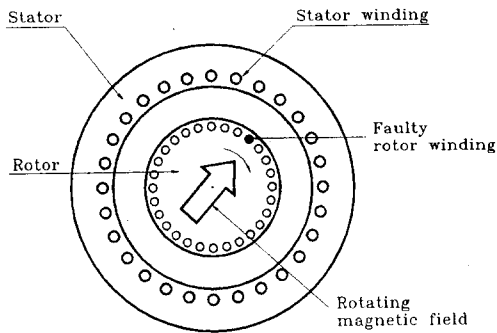


Fig. 4 Magnetic vibration by magnetic unbalance of rotor conductors

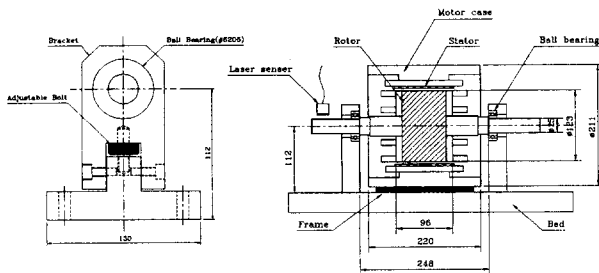
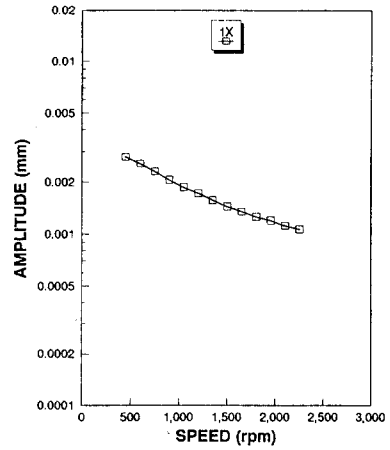
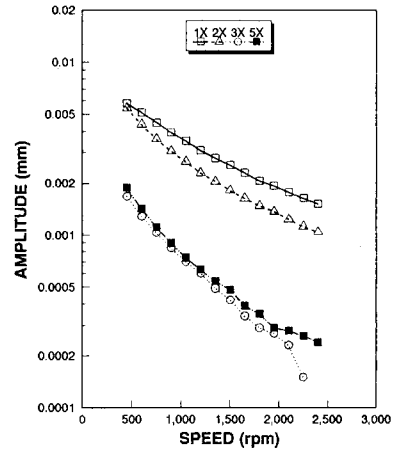


Fig. 5 Experimental apparatus



a)  $\epsilon = 0$



b)  $\epsilon = 0.314$

Fig. 6 Vibration amplitude against rotating speed

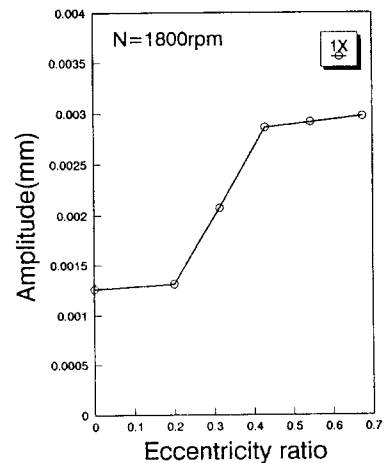


Fig. 7 Vibration amplitude against static eccentricity

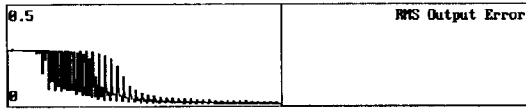


Fig. 8 RMS output error curve by learning

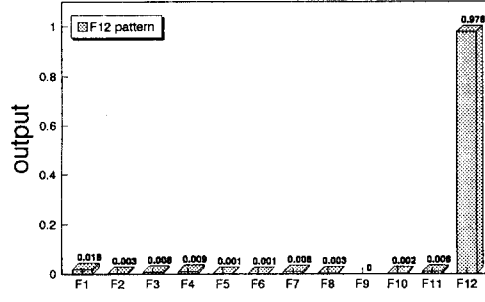
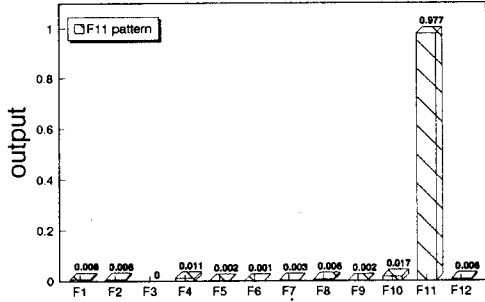
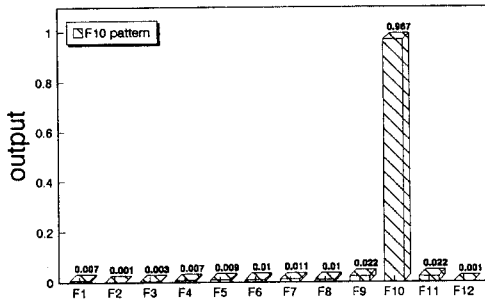
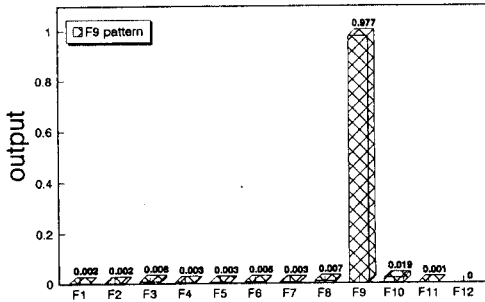


Fig. 9 Learning results of magnetic defects

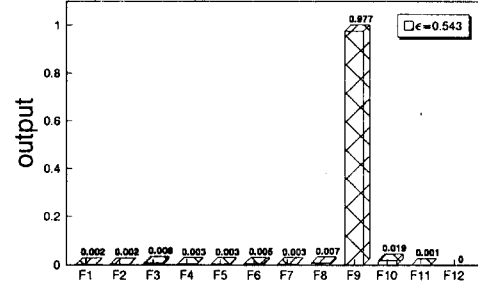
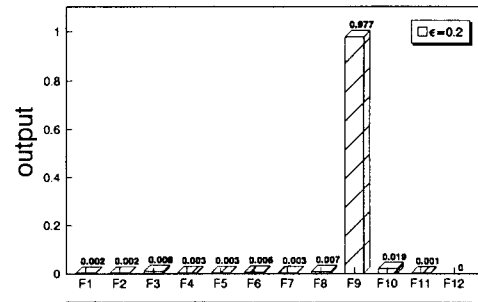


Fig. 10 Diagnosis results of static eccentricity

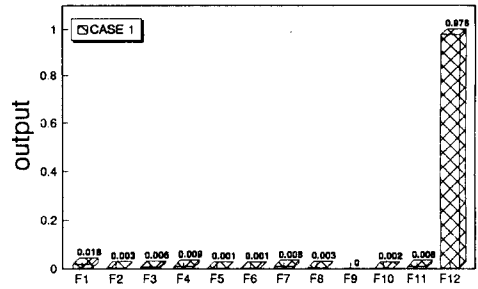


Fig. 11 Diagnosis results of rotor bar defects

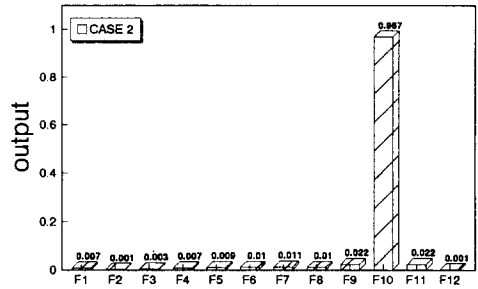


Fig. 12 Diagnosis results of stator support defects

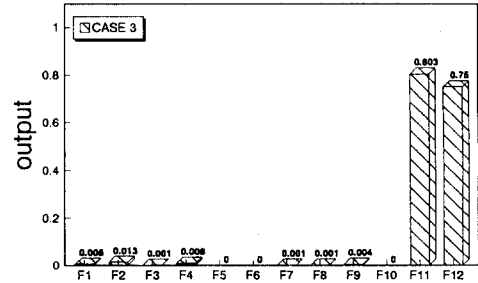


Fig. 13 Diagnosis results of multiple defects