

발전소 대형 입형펌프 전동기의 전류/진동신호 특성 분석[#]

Current and Vibration Characteristics Analysis of Induction Motors for Vertical Pumps in Power Plant

김 연 환[†] · 배 용 채^{*} · 이 현^{*}

Yeon-Whan Kim, Yong-Chae Bae and Hyun Lee

(2005년 12월 7일 접수 ; 2006년 3월 21일 심사완료)

Key Words : Induction Motors(유도전동기), Amplitude Modulation(진폭변조), Current Signature(전류신호), Vibration Signature(진동신호), Fault Detection(이상검출)

ABSTRACT

Induction motors are the workhorse of our industry because of their versatility and robustness. The diagnosis of mechanical load and power transmission system failures is usually carried out through mechanical signals such as vibration signatures, acoustic emissions, motor speed envelope. The motor faults including mechanical rotor imbalances, broken rotor bar, bearing failure and eccentricities problems are reflected in electric, electromagnetic and mechanical quantities. The recent research has been directed toward electrical monitoring of the motor with emphasis on inspecting the stator current of the motor. The stator current spectrum has been widely used for fault detection in induction motor systems. The motor current signature analysis is the useful technique to assess machine electrical condition. This paper describes the motor condition detected by the current signatures paralleled with vibration signatures analysis of induction motors with the roller bearing and the journal bearing type for large vertical pumps in power plant as examples to discuss for motor fault detection and diagnosis.

1. 서 론

원자로 내 설치된 전동기 구동밸브의 결함을 알아 내는 연구를 1980년대 초 미국 "Oak Ridge National Labs" 에서 수행하였으며 그 결과 전류신호가 전동기의 결함뿐 아니라 시스템 상태가 전동기의 부하에 의하여 변조되는 현상을 발견하였다.⁽¹⁾

[†] 책임저자; 정회원, 한전 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : ywkim@kepri.re.kr

Tel : (042) 865-5426, Fax : (042) 865-5444

^{*} 정회원, 한전 전력연구원 수화력발전연구소

[#] 이 논문은 2005년 추계 소음진동학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

회전기계에 대한 설비의 상태감시 및 진단방법은 여러 가지가 있으나 대표적으로 사용되는 베어링의 결함, 기초의 불량, 로터의 불 평형 등에 의해 발생하는 열적손실과 진동 신호를 기본요소로 하여 건전성 여부를 진단할 수 있고 부가적으로 압력 및 온도 등의 변화상태도 온라인으로 분석함으로써 시스템의 신뢰성을 제고해 나가고 있으나 정상 운전조건에서 접근이 어려운 원자로 건물 등에서 운전되는 전동기의 경우 센서 또는 감시시스템의 이상 유무 판단이 어려운 것이 현실이다. 진동신호를 대체 또는 보완할 수 있는 대안으로서 전동기의 부하 전류에 변조되는 시스템 동특성 정보를 사용할 수 있다. 이 기술은 전동기 원격 제어실에서 전기신호를 단순히 측정하고 변조된 시스템 특징을 추출하여 이상 유무를 검출하는 기술이다. 'EMPATH', 'PdMA', 'BAKER' 등 상용화된 전기

적 건전성 진단 장비는 전동기 시스템의 부하 변조원리를 분석하여 전동기의 상태를 오프라인으로 진단하고 있으며 온라인 진단으로 확대 적용하는 기술적 접근을 시도하고 있다. 이러한 기술적인 접근은 진동신호를 사용하고 있는 상태감시 시스템의 단점을 보완할 수 있다는 점이다. 유도전동기 시스템의 부하특성은 전기신호에 변조되므로 전동기 구동 시스템에 대한 상태감시 및 진단기술에 접목할 수 있는 현실적인 대안으로 기대된다. 부하 전기 신호에는 전동기의 결함과 더불어 시스템의 동적 특성이 변조되어 있어 진동 상태감시와 유사한 정보를 얻을 수 있다.

이 논문에서는 700MW급 발전소의 해수 순환용 대형 입형펌프의 구름 베어링 형 유도전동기 및 1000MW급 발전소의 대형 복수펌프인 저널 베어링 형 전동기의 고 소음 현상과 관련하여 부하전류의 변조현상을 시험하고 특성을 고찰하였다.

2. 대형 유도전동기의 고장 현황

펌프, 송풍기, 압축기 등을 구동시키는 유도 전동기에서 발생하는 사고 원인에 대하여 IEEE 및 EPRI에서 조사한 내용을 종합해 보면 Table 1⁽²⁾과 같이 베어링, 고정자, 회전자 순으로 사고율이 발생됨을 알 수 있다. 베어링의 사고원인별로 구성비를 살펴보면 과열 20%, 기계적 결함 70%, 전기적 결함이 5% 정도 차지하며, 고정자 권선 사고의 경우는 과열이 30%, 절연물 결함 45%, 기계적 결함 15%, 전기적 결함이 10% 였다. 따라서 전동기 사고 원인 분석 결과를 통해 베어링 진동특성, 고정자 권선, 로터의 동특성에 대한 정보를 포함하는 신호를 측정할 수 만 있다면 전동기 상태의 많은 부분에 대한 진단정보를 얻을 수 있다. 현재까지 베어링 및 로터의 경우는 진동신호를 측정하여 진단하고 있으나 고정자 권선의 고장 진단은 전기적인 실험법인 메가 시험, 성극 시험, 고전압 시험 및 서지 시험 등을 정지 시 off-line으로 시험하고 있는 실정이다. 최근에는 발전소 운전 중에 측정 가능한 부분 방전

시험과 더불어 진동신호 분석 기술과 유사한 정보를 나타내는 부하전기신호를 이용하는 분석기술이 발전 설비에서 적용될 수 있게 되었다. 부하 전기신호에는 고정자의 특성 뿐 아니라 베어링의 진동특성, 로터의 동특성 및 시스템 정보가 변조되어 나타나는 특징이 있다.

3. 전동기의 전류신호에 나타나는 변조특성

3.1 전류신호에 의한 진폭변조

유도전동기의 결함, 진동 등 시스템 특성은 Fig. 1과 같이 부하전류에서 전원주파수($=f_c$)가 반송파로서 작용하고 시스템 특성이 신호파 형태로 변조된다. 유도전동기의 경우 로터를 구동할 때 변압기와 같은 원리로 1차 측의 부하신호가 2차 측에서 진폭 변조되어 전류신호에 변동특성이 나타나게 된다.

발전소에서 유도전동기는 펌프, 팬, 압축기 등 회전체의 구동을 위하여 광범위하게 적용되고 있다. 부하가 변하면 전동기 전류 특성이 변한다. 회전기계의 불평형, 축 정렬불량, 베어링 특성, 왕복동 요소 등의 시스템 동특성은 전동기의 부하에 변동을 일으키므로 전류의 변동특성을 측정하는 방법은 기계의 상태진단을 위하여 매우 유용하다. 따라서 감도가 좋은 장비를 통하여 전원에 실려 있는 변조 특성을 분석함으로써 전동기의 상태를 위한 중요한 정보를 확보할 수 있다.

3.2 전원주파수 주변의 로터 바 변조특성

진동신호로 감지되는 경우는 로터의 회전주파수에 극통과 주파수가 변조되어 양측에 측대파로 나타나는 반면 전기신호에서는 로터에 결함이 있는 경우 식 (2)과 같이 전동기의 극통과 주파수(F_p , 식 (1) 참조)가 전원주파수의 측대파로 변조된다.⁽³⁾

$$F_p = p \times f_s \quad (1)$$

$$F_{rb} = F_E \pm F_p \quad (2)$$

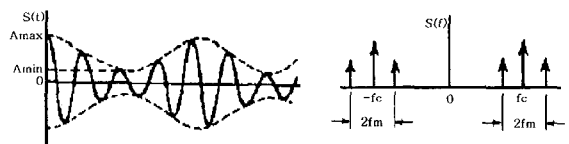


Fig. 1 Principle of amplitude modulation

Table 1 Malfunction ratio on motor part (unit : %)

Organization	Bearing	Stator	Rotor	etc
IEEE	44	26	8	22
EPRI	41	36	9	14

여기서, F_{rb} 는 로터 바의 결함주파수, F_E 는 전원 주파수, f_s 는 슬립주파수, p 는 극수를 의미한다. 2극전동기의 경우에는 이들 측대파는 f_s 의 2배 주파수가 되며 4극 전동기의 경우, f_s 의 4배 주파수가 된다. 소형 블베어링 전동기를 대상으로 정해진 기준은 Table 2⁽³⁾와 같이 7개의 범주로 분류하고 있다. 문헌에서 경험적으로 적용하는 기준은 전원주파수의 크기와 극통과 주파수의 크기 사이에 Table 2에 근거하여 60 dB 이상이 차이가 있으면 로터 바는 극히 건전한 것으로 평가한다.

상용화된 기존의 실험 결과 및 상태기준 DB를 비롯한 Table 2는 블베어링 형 소형 삼상 유도전동기의 변조현상을 근거로 구축되었다는 점이다.

3.3 고정자 및 로터의 편심현상에 의한 변조특성

로터에는 Fig. 2와 같이 정적편심(고정자 중심에 대해서는 편심이 존재 하지만 로터 측면에서는 편심 없이 회전하는 경우), 동적편심(고정자 중심에 대해서는 편심이 없으나 회전 중심에서는 편심이 존재하는 경우) 등 두 가지 형태로 편심이 나타난다. 정적 편심에서는 시간에 따라 공극의 변화가 없고 일정한 반면, 동적 편심에서는 로터의 위치에 따라 달라진다. 정적편심은 고정자 철심이 타원형 같이 원형 형태가 아닌 변형된 형태로 제작됨으로써 나타날 수 있으며 설치단계에서 로터 또는 고정자가 부정확하게 위치함으로써 나타날 수 있다. 로터 축 조립이 충분히 견고한 경우 편심이 크게 문제가 되지 않는다. 반면 동적편심은 로터의 중심이 회전중심에서 이탈되어 있어 최소 공극이 로터와 함께 회전하는 경우에 나타난다. 따라서 동적편심으로 인해 로터의 힘, 기계적 공진, 베어링 손상 등이 발생할 수

있다. 동적편심이 증가하면 로터에 과도한 불 평형 자력(UMP: unbalanced magnetic pull)을 발생시켜 회전자와 고정자 사이의 마찰 위험이 증가하므로 공극편심에 대한 추이는 중요한 정보가 된다. 유도전동기의 편심 감지관련 논문들에서는 편심 결함이 있는 경우 식(3)⁽⁴⁾과 같은 특징 주파수가 나타나는 것으로 기술하고 있다.

$$F_{sh} = F_E \left\{ (R n_{rt} \pm n_d) \frac{2(1-s)}{P} \pm n_{us} \right\} = f_r R \pm n_{us} F_E \pm n_d f_r \quad (3)$$

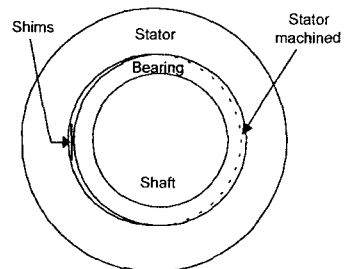
여기서 F_{sh} 는 편심주파수, R 는 로터 바 개수, n_{rt} 는 임의정수(보통 1), n_d 는 편심정수(1, 2, 3, ...), s 는 슬립, P 는 극수 n_{us} 는 고정자 조화 차수($\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$), f_r 는 로터의 회전 주파수를 의미한다. n_d 이 적절한 상수를 가지는 경우 동적 편심 주파수를 나타내며, '0'을 가지면 정적편심 주파수로 진단한다.

3.4 베어링 결함 특성의 전류신호 변조

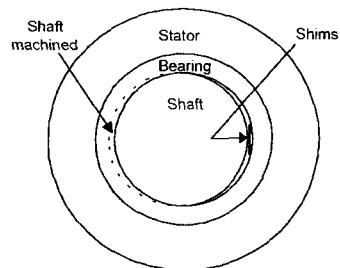
Table 1에서처럼 전동기 결함의 많은 부분을 차지하고 있는 베어링 결함의 진단연구를 위하여 전류 감시진단기술을 적용하는 연구가 주로 블베어링을

Table 2 Severity level chart for rotor bar health⁽⁴⁾

Cat. No	Basis	Rotor condition assessment	Recommended corrective action
1	>60 dB	Excellent	None
2	54~60 dB	Good	None
3	48~54 dB	Moderate	Trend survey
4	42~48 dB	Bar crack may be developing	Short intervals survey
5	36~42 dB	Two bars cracked	Confirm
6	30~36 dB	Multiple cracked	Overhaul
7	<30 dB	Severe problems	Replace



(a) Static eccentricity



(b) Dynamic eccentricity

Fig. 2 Eccentricities in motor

중심으로 최근까지 진행되어왔다. 베어링 결함도 공극의 동적편심과 유사하게 공극 자속밀도에 불 균일을 주어 고정자 전류에 변화로 나타난다. 구름베어링의 경우는 결함 특성이 진동신호에서 뿐 아니라 전류 스펙트럼의 저주파영역과 고주파 영역에서 쉽게 구분되는 특성이 있는 반면 저널베어링의 경우는 볼베어링과 같은 특성주파수들이 명확하게 존재하지 않으며 주로 로터와 베어링의 틈새비와 연관된 특성주파수 들이 발생될 수 있으나 시스템 정보가 빈약한 현장조건에서 구분하기 어렵다는 문제가 있다. 그럼에도 불구하고 고주파영역에서는 상기의 식 (3)에 의하여 분석되는 이외의 주파수들을 분석함으로써 특성을 구분할 수 있다. 구름 베어링에서는 결함 위치에 따라 4가지 형태의 결함 주파수가 나타난다. 결함 위치는 내륜, 외륜, 볼 또는 롤러, 케이지 또는 트레인 등으로 분류된다. 내륜 결함주파수는 'BPMI (ball pass frequency of inner race)', 외륜은 'BPFO (ball pass frequency of outer race)', 볼 결함주파수는 'BSF(ball spin frequency)' 그리고 케이지 결함주파수는 'FTF(fundamental train frequency)' 로 정의하며 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다.

내륜이 회전하고 외륜이 정지된 경우에 4가지 주파수에 대한 계산공식은 다음과 같다.

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right] \quad (4)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} (f_r) \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2 \phi \right] \quad (5)$$

$$BPFO = N (e \times FTF) \quad (6)$$

$$BPMI = N (f_r - FTF) \quad (7)$$

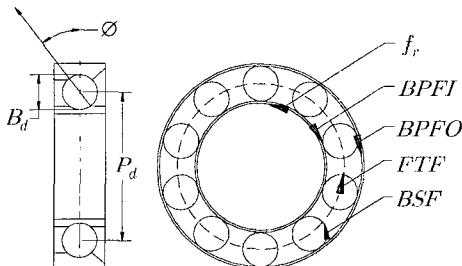


Fig. 3 Shapes of ball bearing

여기서 f_r 은 내륜의 회전주파수, B_d 는 볼 지름, P_d 는 베어링 피치지름, N 은 볼의 수 e 는 구름운동 및 미끄러짐의 정도로서 0.96~0.98을 적용하며 ϕ 는 접촉각을 의미한다.

식(4) ~ (7)는 f_r 의 함수이므로 f_r 에 의하여 정규화 시킬 수 있다. 특징 결함 주파수는 회전기계가 운전시 발생하는 진동 스펙트럼에서 나타난다. 단, 고정자와 회전자의 상대운동에 의한 공극의 변화 및 로터의 편심은 고정자 전류에 그 영향을 준다. 만약 베어링에 결함이 발생된다면 그 특성이 전류에 다음과 같이 변조된다.

$$F_{BNG} = |F_{E \pm m \times F}| \quad (8)$$

이 식에서 F_{BNG} 는 고정자 전류에 나타나는 결함주파수를 의미하며 F_E 는 전원주파수, m 은 1, 2, 3... 등의 정수, F_V 는 구름베어링의 경우는 식 (4) ~ (7) 중의 한 특성주파수이고 저널베어링의 경우는 베어링의 틈새와 연관된 특성을 의미한다. 식 (8)의 의미는 베어링 결함이 발생하는 경우 전원주파수를 중심으로 측대파가 나타난다.⁽⁵⁾ 즉, 베어링 결함성분은 전류스펙트럼에서 베어링주파수의 정수배와 전원주파수의 ±성분으로 나타나는 특성을 결함진단에 이용할 수 있다.

4. 유도전동기의 전류신호 측정 원리

전동기의 전기신호는 Fig. 4와 같이 전동기 제어반의 공급측 각 상에 'CT(current transformer)' 를 설치하여 측정한다. 전류 신호는 시간영역 및 주파수

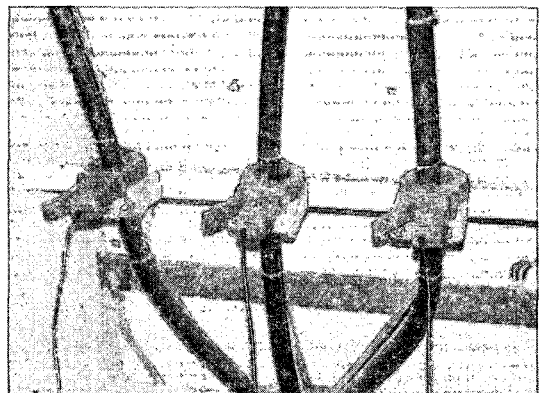


Fig. 4 CT installed in motor control box

영역으로 나타내어 전동기의 부하 특성을 분석한다. 측정시 전원주파수에 의하여 주요 주파수 성분을 구분할 수 있도록 충분한 분해능을 확보해야한다. 로터 바 결함, 결함부에 고 저항 발생 등의 로터 결함이 발생하면 조화성분의 전자속에 의하여 고정자에 유도 전류가 발생한다. 이 유도전류는 60 Hz 근처에서 슬립 측대파 진폭의 증가 원인이 된다. 발전소 대형 전동기의 전기신호분석을 위하여 주파수 분해능이 1,600라인인 경우와 16,385라인으로 변조특성을 분석하였다.

5. 발전소의 현장 적용 시험 및 고찰

5.1 구름베어링 지지 대형 입형 유도 전동기

Fig. 5는 구름베어링으로 지지하는 대형 전동기로서 상업운전 후 4년 가동된 상태이다. 펌프는 지하 3층에 설치되어 있고 전동기는 지상에 설치된 구조이며 정격 회전수는 594 rpm, 고정자 슬롯(slots)은 108개, 로터 바는 132개, pole수는 12개인 전동기이며, 상부베어링 형식은 7328B이고 하부베어링은 NU234이다. 전류측정은 Fig. 4와 같이 제어실의 단자함에서 DI2200 주파수 분석기를 사용하여 운전 중에 나타나는 부하전류신호를 1600라인 분해능으로 측정하였다.

(1) 저주파 영역에서 로터 바의 변조 특성

Fig. 6(a)은 Fig. 5의 전동기에서 진동이 증가할 때의 전원주파수 근처의 스펙트럼을 보여준다.

로터 바에 결함이 존재하는 경우 전원주파수(60

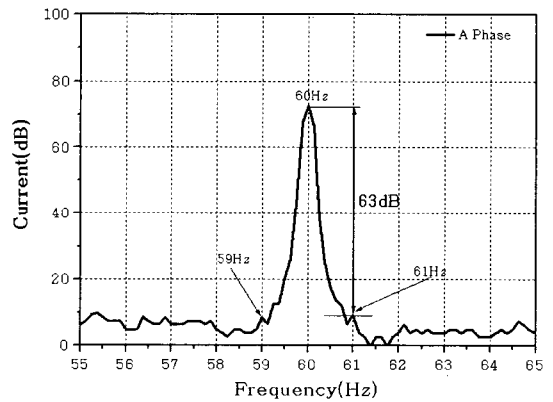
Hz)를 중심으로 \pm 극통과 주파수의 측대파가 나타난다. 스펙트럼에서 분석한 측대파를 사용하여 다음 식과 같이 슬립주파수를 구할 수 있다.

$$f_s = \frac{F_E - 59(\text{sideband})}{p} = 5 \text{ rpm} \quad (9)$$

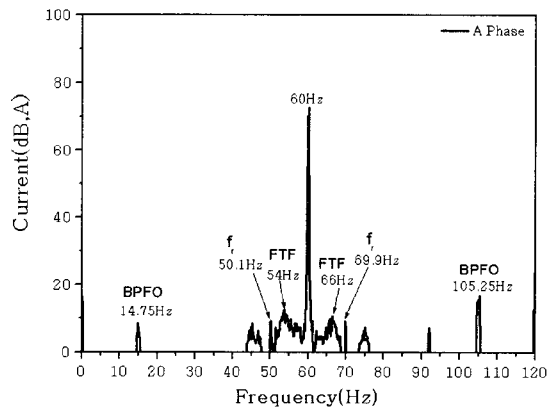
Fig. 6(a)의 경우 왼쪽 측대파 59 Hz, 오른쪽 측대파 61 Hz의 레벨이 60 Hz 진폭크기와 레벨차이가 63 dB 이상으로 Table 2에 의하여 로터에 결함이 없는 상태로 추정할 수 있다. 실제 값은 6 rpm이나 분석기의 분해능이 1600라인이어서 식 (9)에서는 1 rpm의 오차를 나타내었다. 즉 전류신호분석에서 중요시되는 것은 충분한 분해능이다.

(2) 저주파 영역에서 구름베어링의 변조 특성

Fig. 6(b)는 대상 전동기의 특성신호가 전류신호



(a) Sidebands for rotor bar



(b) Sidebands for bearings

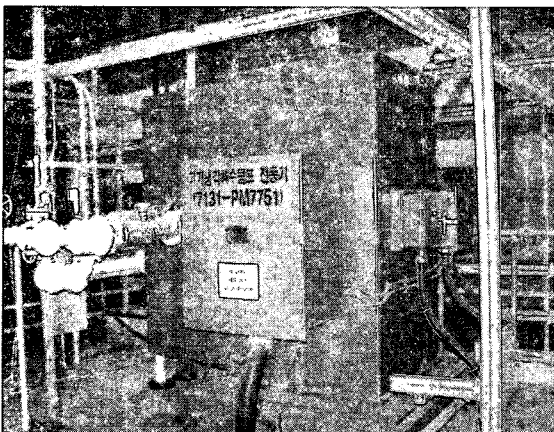


Fig. 5 View of Vertical pump induction motor for seawater recirculation in 700 MW Plant

Fig. 6 Stator current spectra in low frequency range

에 변조되어 나타난 결과를 보여준다. Table 3은 대상 전동기에 설치된 베어링의 제원에 따른 발생가능 주파수를 계산한 결과이다.

대상펌프는 정상상태임에도 베어링의 외륜관련 FTF 및 BPFO 등의 정보와 회전수($f_r=9.9$ Hz)의 정보가 전류스펙트럼에서 구분되었다. 비록 내륜 관련 정보는 분명한 주파수 특성으로는 나타나지 않았으나 정상 베어링의 특성을 기준으로 움직이는 부분에 대한 정보를 통하여 베어링의 상태를 추정할 수 있었다. 여기서 식 (8)의 m 은 1이다. 반면 베어링이 손상된 상태가 아니므로 BPFO는 조화 성분으로 나타나지는 않았다.

(3) 고주파수 영역에서의 전류 스펙트럼

Fig. 7은 정적편심을 가지는 대형 전동기에서 정상운전조건에서 나타나는 진동신호와 전류신호의 스펙트럼 패턴이다. Fig. 7(a)는 전동기 상부 베어링부에서 가속도센서를 사용하여 측정된 진동 가속도신호이다. 진동 스펙트럼에서 슬롯주파수 및 로터 바 주파수를 중심주파수로 좌우에 60 Hz씩 이동되어 나타나는 현상을 보인다. Table 4는 정상운전조건에서의 전동기 전류스펙트럼과 식(3)의 결과를 정리함으로써 정적편심 상태로 판정된다. 즉 전류스펙트럼을 정밀 분석함으로써 고정자와 로터의 운전상태에 대한 감시정보를 얻을 수 있다. Fig. 7은 정적편심이 큰 현장사례로서 로터 바의 특성주파수의 진폭에 비하여 고정자의 슬롯주파수 진폭이 큰 값을 나타내었다.

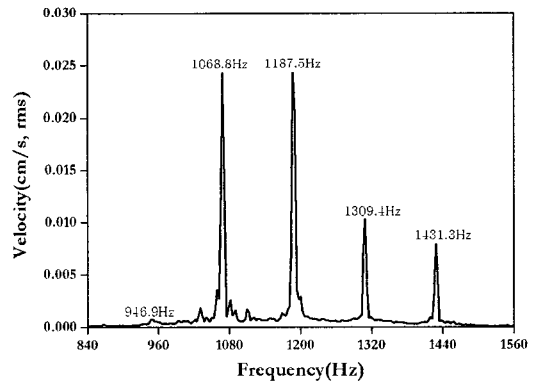
고정자 권선에 대한 특성을 나타내는 전류스펙트럼은 대형 전동기의 로터의 바의 수는 제작자에 의하여 제공되나 정밀형 소형 전동기의 경우는 대외비

Table 3 Defect frequencies for Fig. 5 motor

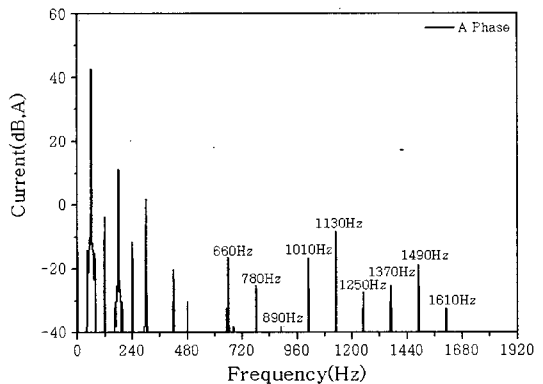
Bearing type	7328B	NU234
N	12	18
B_d (mm)	47.625	31.979
P_d (mm)	220.116	239.979
ϕ	30	0
BPFO (Hz)	48.27	77.23
BPFI (Hz)	70.53	100.97
BSF (Hz)	22.075	36.48
Outer race FTF (Hz)	5.878	5.61
Inner race FTF (Hz)	4.022	4.29

로서 알 수 없다. 이런 경우에는 스펙트럼상의 성분을 분석하고 로터 바의 수를 추정하거나 정지하여 분해 조립한 후 개수를 확인할 수 있다. 진동스펙트럼에서는 1000 Hz이후에 진폭이 높은 성분들이 120 Hz 간격으로 나타나며 일반적으로 가장 큰 진폭이 로터 바의 개수와 연관이 있고 그 앞의 120 Hz 이격주파수(Fig. 7(a)에서 1068.8 Hz)가 고정자의 슬롯 개수에 대한 정보를 제공한다. 마찬가지로 전류신호에서도 Table 4에서 나타난 것처럼 변조되어 특성이 나타나되 전원주파수에 의하여 60 Hz만큼 이격되어 나타나므로 식 (10)에서 구한 중심주파수(진동스펙트럼에서의 슬롯주파수와 일치)를 사용하여 식 (11)과 같이 얻을 수 있으며 이 수치들은 분해점검을 통하여 확인한 결과와 잘 일치한다.

$$\text{Center Frequency} = \frac{1,010 + 1,130}{2} = 1,070 \text{ Hz} \quad (10)$$



(a) Vibration spectrum



(b) Current spectrum

Fig. 7 Frequency patterns of spectra with static eccentricity

$$\begin{aligned} \text{Stator slot No} &= \frac{\text{Center Frequency}}{f_r} \\ &= \frac{1,070}{9.9} \approx 108 \text{ ea} \end{aligned} \quad (11)$$

5.2 저널형 입형복수펌프 전동기의 전류변조 특성

Fig. 8의 전동기는 웨스팅하우스의 ‘VVCSM’ 모델로서 정격전압 1.32 kV, 정격전류 114 A, 정격회전수가 1,188 rpm이고, 상부베어링이 ‘Kinsbury Type(kV10.5)’, 하부는 ‘8.00 split sleeve’ 인 저널베어링으로 지지하는 6극 농형 유도전동기이며 고소음이 발생하는 상태이다. 전류측정은 Fig. 4와 같이 제어 룸에 위치한 단자함에서 운전 중인 전류신호를 ‘LMS Test Lab’ 을 사용하여 16,385라인의 분해능으로 분석하였다.

(1) 저주파수 영역에서 로터 바의 변조 특성

Fig. 9(a)는 Fig. 8의 전동기 상부의 진동 속도스

Table 4 Static eccentricity harmonics in induction motor

n_{vis}	Calculation (Hz)	Measurement (Hz)	dB
-7	886.8	-	-
-5	1006.8	1010	-16.7
-3	1126.8	1130	-8.3
-1	1246.8	1250	-27.4
1	1366.8	1370	-25.2
3	1486.8	1490	-18.7
5	1606.8	1610	-32.2
7	1726.8	-	-

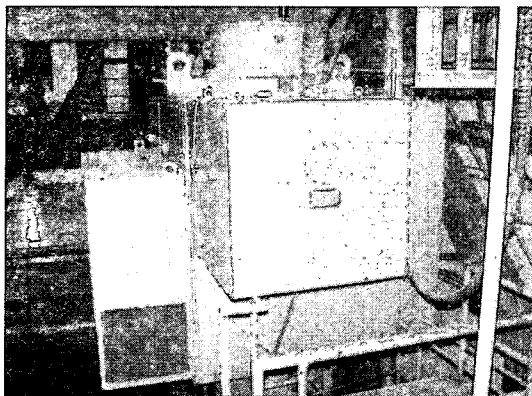
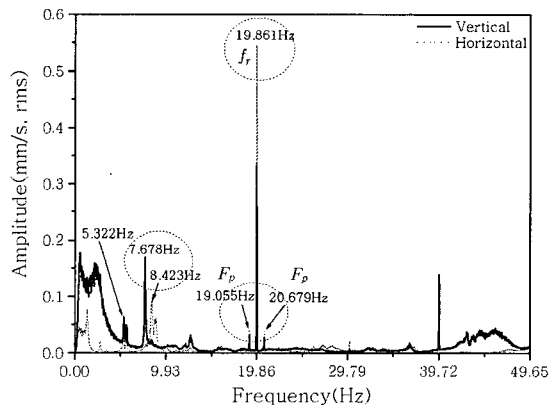
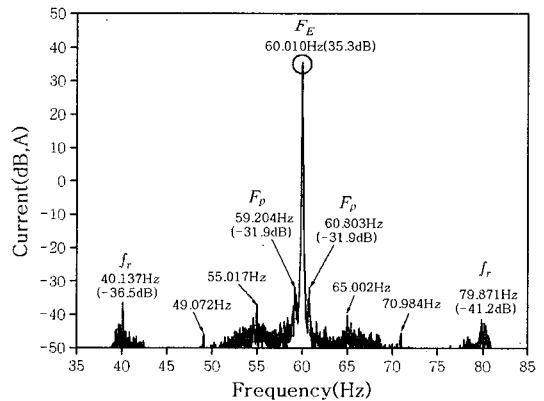


Fig. 8 View of condensate pump induction motor with journal Bearing in 1000 MW power plant

펙트럼으로서 $1X(=f_r)$ 성분이 19.861 Hz이고 0.55 mm/s,rms 이었으나 $1X$ 주위에 0.806~0.818 Hz의 극통과 주파수가 변조되어 상하 측대파로 나타났다. 진동주파수에서 나타나는 극 통과주파수는 로터의 이상 징후와 연관된 특성으로 분석한다. Fig. 9(b)는 Fig. 4(b)와 같은 방법으로 측정된 저주파수 영역에서의 전류스펙트럼이다. 원전주파수인 60.01 Hz가 전송과의 역할을 하여 극통과 주파수인 F_p 가 상하 측대파로 나타났고 극통과 주파수가 0.800~0.806 Hz인 진동에서 나타난 Fig. 9(a)의 결과와 동일한 형태를 나타내어 종래에 사용되어온 진동측정기술과 더불어 대형 입형 농형 유도전동기의 상태 진단에 적용할 수 있는 측정기술임을 알 수 있다. 단, 고소음을 나타내는 복수펌프 전동기의 전류스펙트럼은 15년 이상 운전되었고 소음 및 진동속도 스펙트럼에서 극통과 주파수에 해당하는 측대파가 존재하며



(a) Vibration spectrum

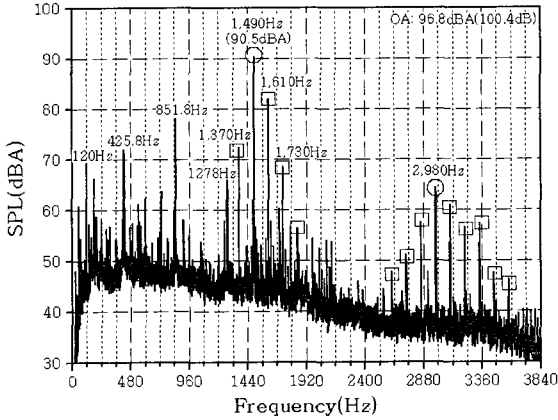


(b) Current spectrum

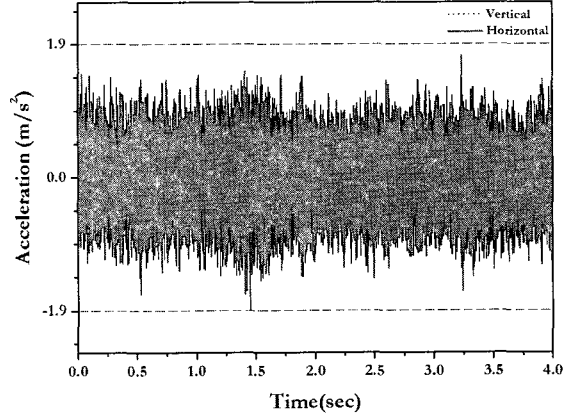
Fig. 9 Frequency pattern of spectra in induction large motor with journal bearings

전원주파수와 측대파의 레벨편차가 67 dB로서 6년 운전한 Fig. 5의 진단 결과보다 로터 바의 상태가 건전한 것으로 진단되었다. 따라서 Table 2의 로터 바 상태 기준 표는 대형전동기의 상태감시에 적용하

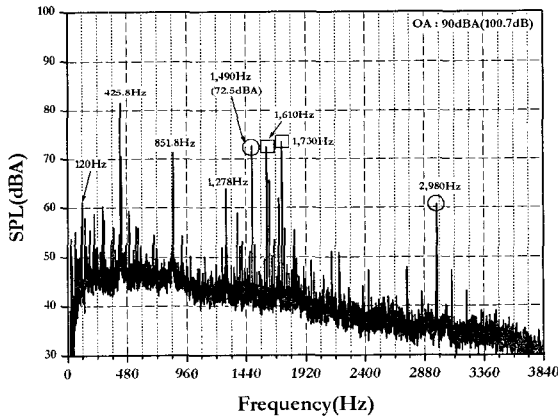
기 위하여 적용 기준을 세분화하거나 유사 전동기별로 추이를 비교하는 방법 등의 보완 연구가 필요하며 이미 진단 및 상태감시등에서 검증된 진동신호에 의하여 전류신호의 변조 특징을 추출하여 기준으로



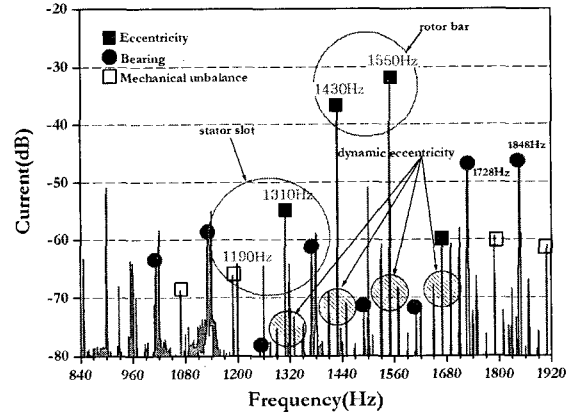
(a) Fault sound spectrum



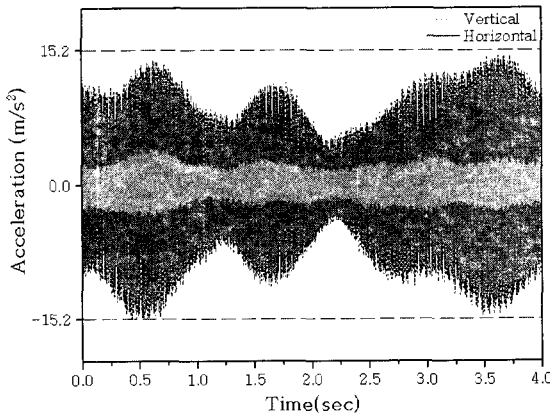
(d) Normal vibration waves



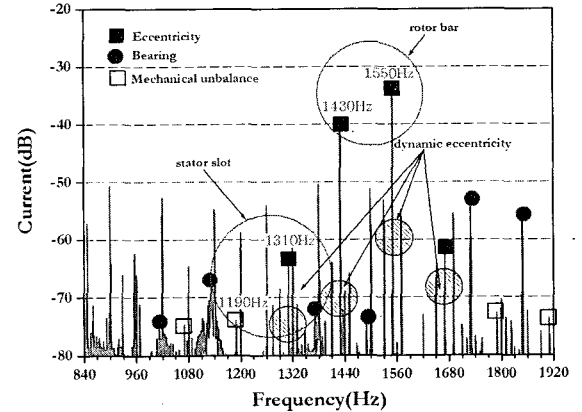
(b) Normal sound spectrum



(e) Fault current



(c) Fault vibration waves



(f) Normal current

Fig. 10 Load modulation of induction large motor system with journal bearings

사용할 수 있다. 보통 Fig. 8의 전동기는 고정자에 대한 재 권선만으로도 약 3 dB 이상 진전해지는 결과를 나타냈다.

(2) 고주파수 영역에서의 전류스펙트럼

Fig. 10(a)은 대상 전동기의 소음 스펙트럼으로서 로터 바의 통과 주파수(RBPF=rotor bar pass frequency)로 추정되는 1,490 Hz 및 측대파가 전체소음 레벨을 주도하였으며 1,490 Hz성분의 경우 96.8 dBA로서 Fig. 10(b)의 정상전동기에서보다 18 dBA 정도 증폭되었다. 그 원인을 규명코자 진동을 측정하였다. Fig. 10(c)은 고 소음 발생조건에서 전동기 상부의 진동으로서 수직방향 진동이 Fig. 10(d)의 정상전동기에 대비 10배 정도 증폭되는 결과를 나타내었다. 즉 한쪽방향으로 힘이 불균형 되고 공극에 영향을 주어 동적편심이 커진 상태로 추정되었으며 이상 고 소음 현상은 편심이 증가에 의한 과도한 불 평형 자력에 의한 영향인 것으로 진단할 수 있다. Fig. 10(c) 및 Fig. 10(d)의 결과와 유사한 특성이 부하전류 분석을 통하여 진단할 수 있는지를 검증하고자 정상 소음을 나타내는 전동기의 전류스펙트럼 Fig. 10(f)와 이상 고소음이 발생하는 전동기의 전류 스펙트럼 Fig. 10(e)를 비교하였다.

고소음현상의 주원인은 RBPF진동성분 진동에서와는 다르게 큰 차이를 보이지 않는 반면 불 평형 특성의 진폭과 저널베어링특성으로 판단되는 주파수들의 최고 크기가 정상전동기에 대하여 6 dB 이상 증폭되어 나타났다. Fig. 10(e)는 부하전류에 변조된 RBPF 등의 진동주파수가 Fig. 10(a)에서와 유사하지만 60 Hz가 이격되어 분포하는 형태로 변조되어 고정자 슬롯 수는 64개이고 로터 바수는 75개의 특성이 나타났으며, 식 (3)과 식 (8)의 계산결과 및 Fig. 10(e)에서 로터바 통과 중심 주파수를 중심으로 양측으로 60 Hz 및 180 Hz 이격 주파수 좌우에서 회전 주파수의 측대파가 나타나는 패턴은 전형적인 동적편심을 의미하나 Fig. 10(f)의 정상전동기보다 양호한 편이었고 편심 이외의 특징인 기계적인 불 평형 및 저널베어링의 이상 특징으로 분석되는 조화 주파수 성분이 공극에 영향을 주어 Fig. 10(e)에서 나타난 것처럼 고소음의 원인으로 분석되었다.

5. 결 론

전동기에서 발생하는 고장의 대부분은 베어링, 고정자, 로터에서 발생하고 있으며 이들 정보가 변조된 부하전류신호는 진동신호와 유사한 방법으로 접근이 어려운 지역에 설치된 대형 회전체 시스템의 진전성을 진단 또는 감시위한 상태감시 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있다.

이 논문에서는 이러한 변조특성을 발전소의 대형 입형펌프 전동기의 상태진단에 적용하고 변조특성을 고찰하였다.

(1) 부하전류에는 로터 바의 열화, 편심상태, 베어링의 이상상태, 힘의 불균형 등 시스템의 기계적인 특성이 부하전류에 변조되었으며 진동신호에 대하여 전원주파수 만큼 이격되는 형태로써 충분한 정보를 나타내었다.

(2) 극통과주파수가 전원주파수의 측대파로 변조되는 특성을 사용하여 로터 바의 열화상태를 추정하는 기존의 상태 기준표로는 손상의 초기단계에서 진행되는 로터 바 열화를 구분하기 어려웠으며 고정자 권선의 상태에 영향을 받는 것으로 나타나 로터 바의 상태감시를 위해서는 보완된 기준 정렬이 필요한 것으로 판단되었다. 현재로서는 정상전동기와 비교하여 상태를 진단하는 방법을 추천할 수 있다.

(3) 이상 고소음현상은 전동기 진동에서 한쪽 방향으로의 불평형력이 공극에 영향을 주어 RBPF성분들이 증폭되어진 것으로 분석할 수 있으며 부하전류신호는 저널베어링에서의 이상특성과 기계적인 불 평형이 고소음의 원인으로 규명되었다. 따라서 전동기의 부하전류 신호를 회전체의 상태진단을 위하여 적용할 수 있는 진단정보로서 의미가 있다.

후 기

이 논문은 2002년도 산업자원부의 전력기금지원 연구인 “발전소용 온라인 회전기기 상태감시 및 진단시스템 국산화 개발” 과제의 수행결과이다.

참 고 문 헌

(1) Kryter, R. V. and Haynes, H. D., 1989,

“Condition Monitoring of Machinery Using of Motor Current Signature,” pp. 14~21.

(2) KEPRI, 2004, “Development of Localization for On-line Condition Monitoring and Diagnostic System in Power Plant—the 2nd midterm report,” pp. 70~96.

(3) Song, M.-H. Kang, E.-S. Jeong, C.-H. Chow, M.-Y. and Ayhan, B. 2004, “Mean Absolute Difference Approach for Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection,” Symposium on Diagnostics for Electric Machines, pp. 4~18.

(4) James E. Berry, P.E., 1996, “Comparison of Motor Current Analysis and Vibration Analysis in Detecting Rotor Bar and Air Gap Eccentricity Problems in Induction Motors,” Technical Associates Of Charlotte, Inc..

(5) Jason R. Stack, 2004, “Fault Classification

and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines,” Symposium on Diagnostics for Electric Machines, pp. 172~176.

(6) Chung, B.-H. and Shin, D.-C., 2002, “A Study on Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Current Signature Analysis,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 4, ISSN1598-2785, pp. 287~293.

(7) Ayhan, B., Chow, M.-Y., Trussell, H. J. Song, M.-H., 2003, “Statistical Analysis on a Case Study of Load Effect on PSD Technique for Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection,” SDEMPED (symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives), pp. 119~123.