

전류신호를 이용한 유도전동기의 회전자봉 결함검출에 관한 연구

A Study on Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Current Signature Analysis

정병훈[†] · 신대철*

Byung-Hoon Chung and Dae-Chul Shin

(2001년 9월 28일 접수 : 2002년 3월 19일 심사완료)

Key Words : Broken Rotor Bar(회전자봉 결함), Motor Current Signature Analysis(MCSA: 전동기 전류 신호분석), Mechanical Misalignment(정렬불량), Air-gap Eccentricity(공극 편심), Induction Motor(유도전동기)

ABSTRACT

The unexpected failure of the induction motor makes the downtime of production, and the cost of the process cessation enormous. To reduce the downtime and increase the reliability of the motor, the vibration measurements for the fault detection have been used previously. Recently motor current signature analysis(MCSA) has been adapted for the fault detection and diagnosis of the motors. MCSA provides a powerful analysis tool for detecting the presence of mechanical and electrical faults in both the motor and driven equipment. In this paper, the fault severity of the rotor bar has been derived in terms of the resistance change which is calculated from the equivalent circuit model. Results show that the fault of the rotor can be easily detected and the measured value of the resistance change is verified by the detected fault from on-site tests using MCSA for the induction motors in an iron foundry.

기 호 설 명

b_o	: 자화 서셉턴스(susceptance)	i_w	: 철손전류
f_1	: 전원주파수	k_1	: 회전자봉 결함계수
f_2	: 슬립주파수 ($s f_1$)	n	: 정수
g_o	: 철손에 의한 컨덕턴스(conductance)	n_r	: 회전자 속도
i_0	: 여자전류	n_s	: 회전자계 속도(동기속도)
i_1	: 1차 전류 ($i_0 + i_2'$)	p	: 극수
i_2'	: 1차로 환산한 부하전류	r_1	: 고정자 권선저항
Ih_n	: 전원주파수의 조화성분 진폭	r_b	: 회전자봉 결함에 의한 저항
Im_n	: 정렬불량에 의한 조화성분의 진폭	r_2'/s	: 1차측으로 환산한 2차 권선저항
i_μ	: 자화전류	s	: 슬립(slip)
		sw_1	: 슬립 각속도(w_2)
		v_1	: 단자 전압
		x_1	: 고정자 누설 리액턴스
		x_2'	: 1차측으로 환산한 2차 리액턴스
		Z_i	: 임피던스 합
		θ	: 위상각

[†] 책임저자, 정회원, 호서대학교 전기공학부
E-mail : mnschung@unitel.co.kr
Tel : (02) 484-6317, Fax : (02) 476-1511

* 정회원, 호서대학교 전기공학부

1. 서 론

오늘날 산업 현장의 구동 장치로서 가장 널리 사용되고 있는 전동기는 3상 유도전동기이다. 이것은 매우 신뢰할 수 있는 기계이지만 때때로 결함이 발생한다. 전동기의 교환, 또는 대체의 비용이 저렴하여 상대적으로 전동기 자체의 중요성은 낮다고 하겠으나, 전동기에 의해 구동되는 기계의 갑작스런 고장으로 생산중단에 따른 비용은 실로 막대할 수 있다.

산업체에서는 이러한 중대한 장애를 피하고, 예방정비가 이루어질 수 있는 방법으로 디지털 기술과 마이크로프로세서에 의한 계측기술을 다양하게 활용하였다. 여기에는 진동, 축(shaft) 전류, 축 전압, 회전자 전류, 부분방전, 속도변동, 온도, 누설자속, 고정자 전류 측정 및 가스분석, 오일분석 등의 방법이 있다.^(1,2)

기존에는 결함분석을 위해 대체적으로 진동측정 방법을 많이 이용하였으나^(3,4) 진동측정에 의한 신호는 자계(전기적)성분의 영향이 심해 신호분석이 어려운 단점이 있었다. 따라서 기계적 성분과 전기적 성분의 구별을 위해 울림(beat) 존재 유, 무 및 감속시험(coastdown test)등을 수행하여 전동기결함 진단을 시도하였다.⁽⁵⁾ 하지만 이것은 계측이 까다롭고 전문적인 진단기술이 필요하여, 최근에는 계측이 쉬운 전동기 전류측정에 의한 결함분석 방법이 연구되고 있다. 1980년대 누설자속 측정에 의한 유도전동기의 상태감시(condition monitoring)⁽⁶⁾를 시작으로 Kryter와 Haynes에 의한 전동기 전류 신호분석을 이용한 상태감시⁽⁷⁾가 소개되었고, James와 Berry는 실제 유도전동기의 회전자봉 결함을 검출하는데 전류측정과 진동측정 방법을 비교 분석하였다.⁽⁸⁾ 또한 1995년 Smith는 전동기 신호변조이론⁽⁹⁾에서 전동기 전류의 시간신호를 복조 처리하는 기법을 소개하였다.

전류신호에 의한 결함분석 원리는 전동기 내부에 결함이 있는 경우 마찰력의 변화 즉 토크의 변화를 일으킨다. 이것은 공급전류를 변화시키므로 공급전류의 미세 변화를 측정하여 전동기 내부결함을 분석하는 것이다. 진동측정과 비교하여 전류측정은 현장에서 전동기에 센서를 직접 설치하는 번거로움 없이 전동기로부터 떨어진 제어실의 계기용 변압기(PT) 및 계기용 변류기(CT)에 전압 및 전류 프로브를 접속하여

간단히 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 유도전동기의 결함을 분석하는데 전류측정 방법을 이용하였으며, 전동기의 등가회로를 통해 회전자봉 결함 및 정렬불량(misalignment)에 대한 주파수 성분의 이론적인 규명과 실제로 운전중인 전동기에 적용하여 실험한 결과를 토대로 결론을 얻었다.

2. 이론적 해석

2.1 유도전동기의 원리와 슬립주파수

전동기의 고정자 권선이 3상 전원에 접속된 경우, 회전자 권선에는 기전력이 유도되며 이 기전력에 의하여 회전자 전류가 발생한다. 이 회전자 전류는 공극 속의 회전 자계와의 상호 작용에 의해 토크를 발생시키며, 이에 따라 회전자는 회전하기 시작한다.

회전자의 속도 n_r 은 회전자계 속도(동기 속도) n_s 보다는 약간 작은 안정된 속도에 도달하게 된다.

회전자의 슬립(slip)을 $s = (n_s - n_r)/n_s$ 로 정의하면, 회전 자계와 회전자 속도 사이의 상대속도인 슬립주파수 f_2 (slip frequency)는 식 (1)과 같이 된다.

$$f_2 = \frac{p}{120}(n_s - n_r) = \frac{p}{120}sn_s = sf_1 [\text{Hz}] \quad (1)$$

여기서 f_1 은 전원주파수로 60 Hz이다.

2.2 등가회로 모델

유도전동기의 회로변수는 고정자의 여자회로와 회전자 회로에 각각 권선저항, 누설리액턴스가 있고, Fig. 1과 같이 회전자봉에 결함이 있는 경우, 회전에 따른 저항 변화가 있다.

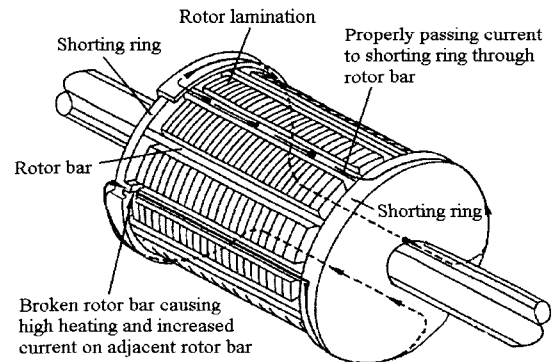


Fig. 1 View of a rotor and current flow through proper rotor bar and broken rotor bar

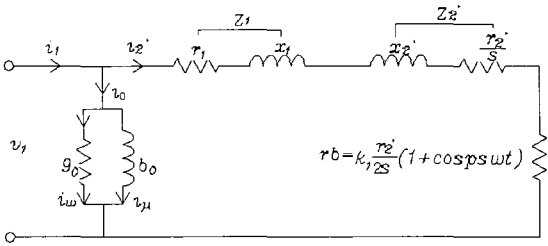


Fig. 2 Equivalent circuit model of the induction motor

그 변화는 부러진 회전자봉이 N극 및 S극을 통과할 때마다 저항이 증가하므로 슬립 주파수 f_2 에 극수 p 를 곱한 값이 된다. 따라서 회전과 함께 변화하는 저항성분은 $rb = k_1 \frac{r_2'}{2s} (1 + \cos pswt) \Omega$ 이므로 유도전동기의 간이 등가회로는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

따라서 전동기의 전류는 식 (2)와 같이 유도⁽¹⁰⁾ 된다.

$$i_1 = \left(g_0 + \frac{r_1 + r_2'/s}{Z_1^2} \right) v_1 + \frac{k_1 \frac{r_2'}{2s} (1 + \cos psw_1 t)}{Z_1^2} v_1 - j \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2'}{Z_1^2} \right) v_1 \quad (2)$$

여기서 Z_1 는 임피던스 총합으로 다음과 같다.

$$Z_1 = \sqrt{(r_1 + r_2'/s + rb)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

(1) 회전자 봉 결함

전압 $v_1 = V_1 \sin \omega_1 t$ 가 인가된 경우 회전자봉 결함이 없으면 $k_1 = 0$ 이므로 식 (2)의 2항은 0이 되어 고정자 전류는 식 (3)과 같이 정상적인 전류가 흐른다.

$$i_1 = I_1 (\sin \omega_1 t - \theta) \quad (3)$$

여기서

$$I_1 = \sqrt{\left(\left(g_0 + \frac{r_1 + r_2'/s}{Z^2} \right) V_1 \right)^2 + \left(\left(b_0 + \frac{x_1 + x_2'}{Z^2} \right) V_1 \right)^2}$$

회전자봉 결함이 있는 경우 $k_1 \neq 0$ 이므로 식 (2)는 식 (4)와 같이 된다.

$$i_1 = I_1 (\sin \omega_1 t - \theta) + I_{f2} \sin(\omega_1 \pm psw_1) t \quad (4)$$

여기서 $I_{f2} = \frac{k_1 \frac{r_2'}{2s}}{2Z_1^2} V_1$ 이다.

식 (4)의 1항은 전원주파수 성분을 나타내고 결함이 없는 경우와 비슷하다. 2항은 결함을 나타내는 성분으로 전원주파수를 중심으로 $\pm psw_1 (= \pm pf_2)$ 만큼 떨어진 좌우 측대역과 성분이다.

유도전동기의 누설리액턴스에 의한 전류는 무부하 시와 비교하여 변화하지 않는 무효전류이므로 무시하고, 여자전류 i_0 는 공극으로 인한 큰 자기저항 때문에 보통 전 부하전류(full load)의 33%가 흐르는 것으로 가정하여 전동기의 전류를 계산한 뒤 20 log를 취하면 식 (5)와 같이 된다.

$$L_d = 20 \log \frac{I_{f2}}{I_1} \approx 20 \log \frac{k_1}{6} \quad (5)$$

무부하 조건에서는 슬립이 매우 작게되어 $I_{f2} = 0$ 이므로 전류는 대부분 여자회로에만 흐르므로 L_d 는 항상 마이너스의 매우 큰 값을 갖게된다. 특히, 회전자봉에 결함이 있어도 부하에 따라 I_{f2} 의 크기가 다르게 되므로 결함의 정도가 다르게 분석된다. 그러므로 정확한 결함을 발견하기 위해서는 75% 이상의 부하에서 운전되어야 한다.

식 (5)의 L_d 값은 I_1 레벨 L_{f1} ($20 \log I_1$)과 I_{f2} 레벨 L_{f2} ($20 \log I_{f2}$)의 차이와 같으므로 k_1 값은 식 (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$k_1 = 6 \times 10^{\frac{L_d}{20}} = 6 \times 10^{\frac{L_{f1} - L_{f2}}{20}} \quad (6)$$

따라서 계측으로부터 전원주파수 성분 과 측대역과 성분과의 레벨차를 구하여 쉽게 k_1 값을 환산할 수 있으며 이 값이 회전자봉 결함(저항 결함률)을 나타낸다. 실제로 회전자의 저항 변화는 정확한 정현파가 아니고 조화성분을 동반하므로 여기서 구한 저항 결함율과 회전자봉의 결함 수와는 다소 오차가 생긴다.

(2) 정렬불량에 의한 전류

정렬불량에 의한 토크변화는 회전자가 1회전할 때마다 회전주파수 정수배에서 변화가 발생되므로 그 성분은 회전자 주파수 및 조화성분에서 나타나게 된다. 따라서 토크변화가 있을 때 전류는 식 (7)과 같다.

$$i_2' = \sum_{n=1}^{\infty} I h_n \sin(n\omega_1 - \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} I m_n \sin((n \pm 1)\omega_1 - n s \omega_1) t \quad (7)$$

그러므로 정렬불량이 존재할 때 발생하는 주파수는 $f_1 - 2sf_1, 2f_1 - 3sf_1, 3f_1 - 2sf_1, 4f_1 - 3sf_1$ 성분을 갖는다. 이들 성분중 $2f_1 - 3sf_1$ 성분이 가장 크게 나타나므로 정렬불량을 알아내는데 편리하다.

정렬불량 성분중 $f_1 - 2sf_1$ 은 회전자봉 결함에 의한 주파수 성분 ($p=2$ 인 경우)과 겹치므로 회전자봉 결함 성분이 약간 다르게 나타날 수 있다. 또 회전자봉 결함이 심한 경우 $2f_1 \pm psf_1$ 의 조화성분이 발생하여 정렬불량 성분에 영향을 주게되나 주파수가 다르므로 정렬불량과 확실히 구별할 수 있다.

정렬불량과 회전자봉 결함에 의해 발생하는 주파수 성분을 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1 Frequency component for a motor having broken rotor bars and misalignment

Frequency	f_1	$2f_1$	$3f_1$	$4f_1$	$5f_1$
Rotor fault	$\pm psf_1$	$\pm psf_1$	-	-	-
Misalignment	$\pm psf_1$	$-sf_1$ $-3sf_1$	$-2sf_1$ $-4sf_1$	$-3sf_1$ $-5sf_1$	$-4sf_1$ $-6sf_1$

2.3 실험장치 및 적용 예

실험은 실제 현장에서 운전 중인 설비에 대하여 적용하였으며, 계측장비로는 FFT분석 기능을 갖고있는 Framatome사의 전류분석시스템을 사용하였다.

Fig. 3은 측정장치를 나타낸 것으로, 전동기의 인입선에 전류 프로브를 접속하고 FFT 기능이 있는 데이터 수집기에 연결한다. 전류 프로브는 10 mV/A의 전압감도를 선택하면 0~600 A의 전류 범위에서 0~6 V의 전압이 얻어진다.

전동기에 유입되는 전류량은 회로 전체 연결선의 어디서나 같으므로 현장의 전동기에서 계측할 필요 없이, 전동기 제어실 내 제어판넬의 인입선을 사용하면 쉽게 데이터를 취득할 수 있다. 또한 고압 전동기라 하더라도 전동기의 인입선은 절연이 양호하여 프로브를 직접 접속할 수 있고, 대 전류의 경우 제어판넬의 계기용 변류기에 접속하여 측정된 값에 변환 비율을 곱하고, 600 V 이상의 고전압에서도 제어판넬

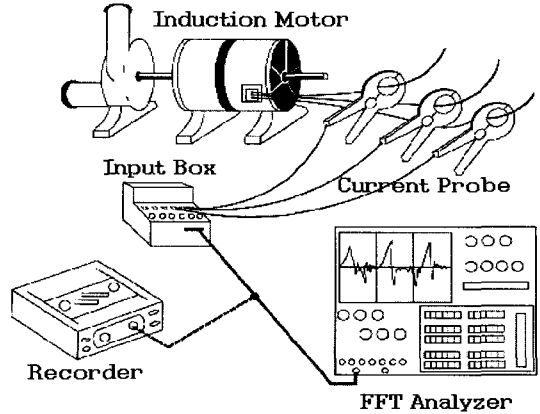


Fig. 3 Configuration of measuring equipment

의 계기용 변압기에서 전압을 측정하고 변압비를 곱하면 실제 값을 환산할 수 있다.

수집된 데이터는 분석기에서 0 ~ 200 Hz범위에서 3200라인의 고해상도로 주파수 변환한다. 전동기 회로에 회전자봉에 결함이 있는 경우와 기계적인 정렬불량이 있는 경우, 스펙트럼에서 전원주파수의 측대역파로서 나타나게 된다. 주파수 분석된 전동기 전류신호는 전원주파수 진폭과 슬립주파수 진폭의 차이가 크므로 대수축으로 표시해야 한다. 저항값의 변화량은 전원 주파수 레벨과 슬립주파수 레벨의 차이로부터 구하면 식 (6)과 같이 회전자봉 결함을 나타내는 k_1 을 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 회전자 봉 결함

유도전동기의 회전자봉에 결함이 있는 경우 전원주파수 성분과 극 통과 주파수 성분과의 레벨차에 대하여 Berry는 경험적 수치를 제시하였다.⁽⁸⁾ 진폭차가 45 dB 이상이면 전동기 회전자봉이 정상이고, 40 dB 이하인 경우 확실하게 문제가 있고, 레벨 값이 작아짐에 따라 회전자에 문제가 심각해짐을 나타내었다.

본 논문에서 유도한 등가회로에서 회전자봉 결함은 식 (6)과 같으므로 L_d 에 따른 결함을 k_1 과 결함상대를 Table 2에 표시하였다.

진폭차가 50 dB이면 저항 변화는 2%미만으로 전동기 회전자봉이 정상이고, 40 dB 와 50 dB 사이인 경우, 회전자봉에 4%정도의 저항이 증가하여 불결함이 발생하는 초기상태임을 나타낸다. 그리고 40 dB 이면

8 %의 저항이 증가하여 1, 2개의 봉결함이 발생하고, 35 dB 이하이면 10 %이상의 저항이 증가하여 회전자에 문제가 심각해짐을 나타낸다. 회전자 문제는 회전자봉(rotor bar)이 단선된 경우와 때때로 헐거운 연결, 단선된 단락환, 조인트의 납땜 불량등의 문제를 포함한다. 실제 현장에서 적용해 본 결과 결함률 k_1 값은 회전자 결함과 상당히 일치함을 발견할 수 있었다.

P제철에서 회전자봉 결함 검출에 적용하였다. Table 3과 같은 사양을 가진 선강 배수종말 처리시설의 필터펌프 전동기로서 2대(M₁, M₂)가 수위 레벨에 따라 자동적으로 작동과 정지를 반복하는 설비이다.

현장에서 M₂의 전동기에 문제가 있을 것으로 의심하고 있었으므로 전동기 M₁과 비교 측정하였다. Fig. 4, Fig. 5는 각각 필터펌프 전동기 M₁과 M₂에서 측정된 스펙트럼이다.

Table 2 Rotor bar severity and condition table

Category	$L_d = L_{\beta} - L_{\beta}$	k_1 [%]	Condition
1	> 60 dB	< 0.6	Excellent
2	54 - 60 dB	1.2 ~ 0.6	Good
3	48 - 54 dB	2.4 ~ 1.2	Normal
4	42 - 48 dB	4.8 ~ 2.4	Rotor bar fault developing
5	36 - 42 dB	9.6 ~ 4.8	1 or 2 Rotor bar broken
6	30 - 36 dB	19.2 ~ 9.6	Multiple rotor bar broken
7	< 30 dB	> 19.2	Severe rotor bar problem Replace as soon as possible

Table 3 Motor specification under test

Power	201 [HP]
Speed	1773 [rpm]
Rated Voltage	3300 [V]
Rated Current	30 [A]
Phase	3
Poles	4
Rotor Bars	60
Stator Slots	48

Fig. 4는 스펙트럼에서 극 통과주파수 성분이 거의 없어 스펙트럼상에서 성분을 찾을 수 없다. Fig. 5는 스펙트럼에서 슬립 주파수 성분이 명확하게 보여지고 있으며 전동기가 회로상의 높은 저항과 함께 작동되

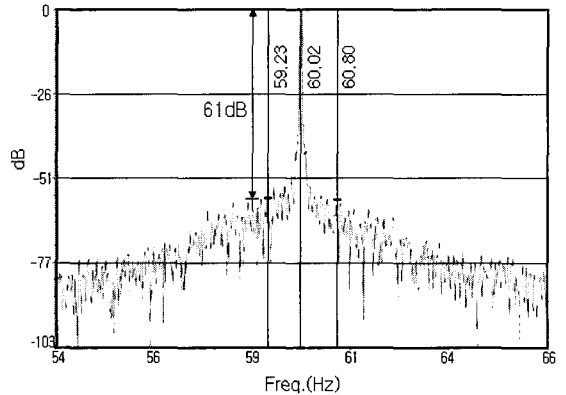


Fig. 4 Frequency spectrum for a normal motor (M₁)

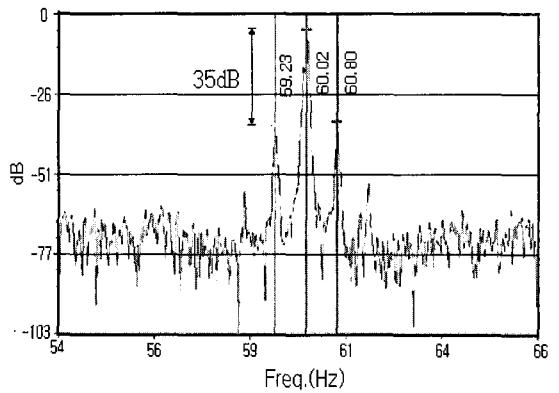


Fig. 5 Frequency spectrum for a motor (M₂) having broken rotor bar

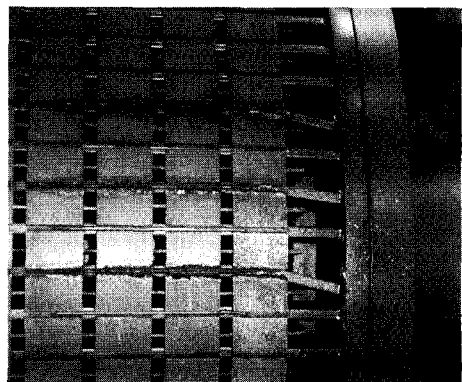


Fig. 6 Broken rotor bar

고 있음을 알 수 있다. 이들 두 스펙트럼에서 dB차이는 Fig. 4의 M₁ 전동기는 60 dB이상이고, Fig. 5의 M₂ 전동기는 35 dB이다. 35 dB를 식 (6)으로 계산하면 회전자봉 결함률이 10.7 %임을 나타내는 것으로 M₂ 전동기의 회전자에 문제가 심각함을 나타낸다. 전동기를 정지시켜 분해하였더니 Fig. 6과 같이 60개중 3개의 회전자봉 결함이 검출되었다.

P제철의 제선공장, 제강공장, 압연라인 및 스테인레스 공장에서 운전되는 유도전동기 500대를 검사한 결과 회전자봉 결함이 있거나 발생되고 있는 것을 29대 발견하였다.

이들 전동기를 분해하여 정밀 조사하였더니 회전자봉 단선 또는 단락환 불량에 Table 2의 조건과 근사함을 확인하였다.

3.2 정렬불량 분석

정렬불량에 의한 전류 성분은 식 (7)과 같이 전원 주파수 조화성분 $2f_1$ 과 측대역과 $2f_1 - sf_1$ 와 $2f_1 - 3sf_1$ 임을 계산하였다.

회전자봉 결함에서는 $2f_1 \pm npsf_1$ 의 주파수 성분이 나타나고 정렬불량은 $2f_1 - \frac{sf_1}{3sf_1}$ 의 성분이 나타나므로 회전자 결함과 정렬불량이 동시에 존재할 경우, 이 두 성분이 중첩되어 나타나지만 회전자 불량은 짝수의 측대역과 성분이고, 정렬불량은 홀수의 측대역과가 되므로 어떠한 경우에도 정렬불량 성분과 중복됨이 없이 확실하게 구분된다.

Fig. 7은 현장에서 측정된 데이터로 스펙트럼에서 $2f_1$ (120 Hz) 성분과 $2f_1 - sf_1$ (119 Hz)에서 큰 성분이 나타나므로 정렬불량에 의한 것으로 진단할 수 있다.

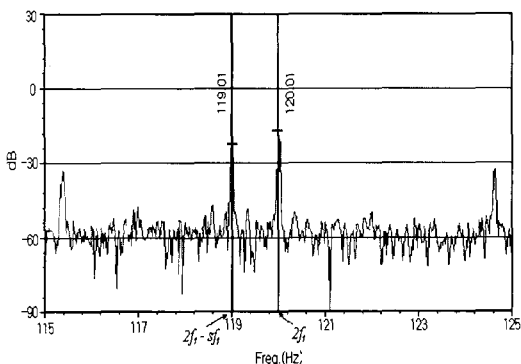


Fig. 7 Frequency spectrum for a motor having mechanical misalignment

Table 4 Current and voltage value between each phase

Phase	Current[A]	Voltage[V]
R	24.65	3313.59
S	24.96	3381.31
T	26.23	3301.89
Average	25.28	3332.27
Deviation	3.7[%]	1.47[%]

P제철에서 500대의 전동기에 실험한 결과 정렬불량 증상을 다수 발견하였다. 그러나, 제철소내의 사정으로 진동측정 데이터와 그 결과를 비교할 수는 없었다.

3.3 고정자 권선 결함

3상 전류측정과 함께 전압을 추가로 측정하면 고정자권선 결함과 부수적으로 전기적 특성을 알 수 있다.

Table 4는 어떤 전동기의 상간에 불균형 전류 진폭을 측정된 것이다. 불균형 전류는 전동기의 수명을 단축시키며, 성능을 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 전류 진폭 변화가 상간 3 % 이내이면 수명에 영향이 없다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾

이 전동기는 R상=24.65 A, S상=24.96 A, T상=26.23 A를 갖는 3상 전류와 전압을 표시하고 있다. 전류진폭 차이가 3.7 %로서 계속 사용하는 경우 고정자 권선에 열을 증가시켜 큰 문제를 일으킬 수 있다. 전동기를 분해하여 원인을 조사하였더니, 고정자 권선의 절연불량이 발견되어 수리 개선하였다.

4. 결론

종래에는 전동기의 결함을 알아내는 방법으로 주로 진동측정이 사용되어 왔으나, 전동기의 진동측정은 계측이 까다롭고 전자기적인 영향으로 신호에 잡음이거나 전원주파수(60 Hz)의 성분이 많아 전동기 내부의 결함 진단에 어려움이 많았다. 본 연구의 전동기 전류 신호분석 방법은 제어실에서 전류 프로브를 전동기 인입선 어느 곳이나 접속하여 전동기 내부 결함을 정확하게 찾을 수 있음을 실험으로 확인하였다. 그리고 결함의 정도를 정량화 할 수 있는 장점을 가진 방법으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

회전자봉 결함은 등가회로에서 얻어낸 값과 일치하고 현장에서 적용해 본 결과 상당한 정확도로 결함을

검출할 수 있었다.

정렬불량에 의한 결함도 토크 변화에 따른 전류를 측정 후 주파수를 분석하면 결함을 알아낼 수 있음을 밝혔다.

전류 및 전압측정에 의해 상간 불평형의 비율을 계산하면 고정자 결함을 부수적으로 찾을 수 있었다.

또 전류신호 분석 기법은 직류전동기, 발전기 등에 또 이론과 실험을 통한 체계적인 연구가 진행되면 유도 전동기 외의 모든 전동기에 폭넓게 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

그리고 다음 연구에서는 전동기의 편심 (정북 및 동북), 베어링 결함, 부하 결함 등의 문제를 전류신호 분석을 통해 계속 밝혀낼 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) Bate, G. H., 1990, "Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives," Bruel & Kjaer Application Note BO 0269-12, pp. 3~12.
 (4) Lang, G. F., 1994, "Of Cages, Induction, Deduction, Bars, Vars and Squirrels," Journal of Sound and Vibration.
 (5) Maxwell, J. H., 1981, "Diagnosing Induction Motor Vibration," Hydrocarbon Processing Maga-

zine, pp. 117~120.

(6) Penman, J., Dey, M. N., Tait, A. J. and Bryan, W. E., 1986, "Condition Monitoring of Electrical Drives," IEE Proc. Vol. 133, Pt. B, No. 3, pp. 142~148.

(7) Haynes, H. D., and Kryter, R. C., 1989, "Condition Monitoring of Machinery Using of Motor Current Signature," Journal of Sound and Vibration, pp. 14~21.

(8) Berry, P. E., and James, E., 1999, "Comparison of Motor Current Analysis and Vibration Analysis in Detecting Rotor Bar and Air-gap Eccentricity Problems in Induction Motors," Technical Associates of Charlotte, Charlotte, NC.

(9) Smith, S., 1995, "Summary of the Modulation Theory from a Report Written for the Navy," Oak Ridge National Laboratory.

(10) Sen, P. C., 1997, Principles of Electric Machines and Power Electronics, John Wiley & Sons, Inc.

(11) Burstein, N., and Bellarmy, J., 1996, "Reactor Coolant Pump Testing Using Motor Current Signature Analysis," Framatome Technologies Inc.

(12) 김태중, 황상문, 박노길, 2000, "BLDC 전동기의 동적편심 및 전자기적 불평형력을 고려한 편심 회전자의 과도 동적해석," 한국소음진동학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 401~409.