

3상 능형 유도전동기 회전자 바의 고장진단에 관한 연구

김근용, 권중록, 이갑재, 김완기
현대중공업(주)

A Study on The Diagnosis of Broken Rotor Bars in Three Phase Squirrel-Cage Induction Motor

K.W. Kim, J.L. Kwon, K.J. Lee, W.G. Kim

Abstract - The faults of the squirrel cage induction motor is grew increasingly complex as the faults resulting in the shorting of a stator winding and the broken rotor bar or cracked rotor end ring, bearing faults, and so on. The users of electrical machines initially relied on simple protections such as over-current, over-voltage, earth-fault, etc. to ensure safe and reliable operation. but this method cause heavy financial losses and the threat of safety. therefore it has now become very important to diagnose faults at there very inception. in this paper, we are going to discuss the detection method of broken rotor bar of squirrel cage induction motor by the motor current signal analysis(MCSA) and the opening terminal voltage signal analysis .

1. 서 론

지금까지 3상유도전동기의 고장은 상당히 복잡한 양상을 나타내고 있으며, 주요 고장을 크게 분류하면 절연과 피로 인한 단락사고, 코아적층 및 결합부분의 이완 등의 고정자 고장과 동심도의 불일치 및 과중한 부하에 의한 피로증가 등에 의해 발생하는 베어링 고장, 열응력, 전자기력 및 그에 따른 진동 등에 의한 회전자 바와 엔드링의 고장 등으로 나타난다.

[1][2][3]에 의하면 전체 고장 중 30-40%가 고정자, 40-50%가 베어링, 5-10%가 회전자 바와 엔드링에서 나타난다. 그러나, 최근에는 절연재료의 개선과 취급공정의 개발 등으로 인해 고정자의 고장은 현저히 줄어들고 있으나 회전자에서는 설계 및 제작에 있어서 크게 개선된 사항이 없어 고장현상이 전체비율에서 증가되고 있다.

이러한 고장에 대해 대부분 과부하, 과전류 등 간단한 보호장치에 의존해 왔으나 이는 복잡한 현상으로 인한 기기의 고장이 한계상황에서 대부분 발생하므로 신규제작 등의 막중한 경제적 손실과 안정성에 심각한 위협을 초래할수 있다. 그러므로 기기상태에 대한 조기 진단을 통하여 초기에 고장현상을 분석, 대처하기 위한 방법이 여러 문헌에서 발표되고 있다.

본 논문에서는 전동기 전류신호분석(MCSA)[2]과 개방단자전압신호분석[4] 등의 검출방법에 의해 유도전동기 회전자 바의 이상유무를 진단하는 방법에 대해 논하고자 한다.

2. 회전자 바의 고장 분석 방법

2.1 전동기 전류신호 분석법(MCSA)

이방법은 유도기 회전자바의 이상유무를 진단하는 가장 잘알려진 접근 방법으로 선전류에 존재하는 기본파와 공간고조파에 이웃하는 사이드밴드(sideband)를 검출하는 방법이다.

바의 고장과 관련하여 선전류스펙트럼의 기본파에 이웃하는 사이드밴드 성분 f_b 는 (1)식에 의해 대개 검출된다.

$$f_b = (1 \pm 2s)f \tag{1}$$

여기서, $f_b = (1-2s)f$ 는 바의 고장을 나타내는 주파수의 사이드밴드이고, $f_b = (1+2s)f$ 의 주파수밴드는 그 결과에 따라 발생하는 속도 리플(speed ripple)을 나타낸다. 실제적으로 고조파를 포함한 고장바에 대한 사이드밴드는 다음 수식에 의한다.

$$f_b = (1 \pm 2ks)f, k=1, 2, 3, \dots \tag{2}$$

또한 전동기 부하의 관성은 이러한 사이드밴드 크기에 영향을 끼친다. 또 다른 스펙트럼, 즉 공극자속에서 검출할 수 있는 고장바의 스펙트럼 성분은 (3)식에 의한다.

$$f_b = [(-\frac{k}{p})(1-s) \pm s]f, (k=1, 2, 3, \dots)$$

p: 쌍극수, s: 슬립 [p.u.]

여기서 고정자 권선의 전류신호에서 검출가능한 주파수는 $(\frac{k}{p} = 1, 5, 7, \dots)$ 일 때이다.

또한 회전자바의 고장시 속도와 토오크 신호는 $2sf$ 와 $4sf$ 의 주파수 성분을 가지고 변동을 일으킨다.

2.2 개방단자전압 신호 분석법

지금까지 공급전원이 인가된 상태에서 입력전류, 전압, 전력을 분석하여 바의 고장유무를 검출하였으나, 이는 전동기가 시간고조파를 포함 또는 3상 불평형 전원일 경우 에러를 유발할 수도 있다.

이방법은 3상 고정자 전원을 개방하여 순수 회전자 전류에 의한 고정자에 유기되는 전압을 측정, 분석하는 방법으로 상기의 에러를 유발하지 않는 장점이 있다.

운전중에 공급전원이 차단된다면 고정자 전류는 회전자 시정수 만큼의 시간을 가지고 빠르게 영으로 되므로 측정시간이 짧다는 단점이 있다.

정상적인 전동기일 경우는 고정자에 유기되는 전압은 기본파와 회전자의 불연속 전류 분포 이외에 다른 고조파 성분을 포함하지 않는다. 회전자바가 파손되었을 경우는 회전자 기자력은 정상적인 정현파 파형으로부터 이탈되며, 이러한 현상은 고정자 선간 전압상에서 FFT분석을 수행하므로 인해 검출될수 있다.

2.2.1 개방단자전압의 유기된 주파수 성분

전원이 차단된후 전동기의 회전자 전류에 의한 기자력 분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_x \cos(npx) \tag{4}$$

p: 쌍극수, n: 고조파차수, x: 회전자 각변위

정상적인 전동기의 경우에 회전자 바의 불연속 전류 분포에 의한 기본파와 고조파 성분이 존재한다. 우세한 고조파 차수는 다음식에 의해 주어진다.

$$n = k(R/p) \pm 1 (k=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

R : 회전자바 수

수식 (1)에 의한 기자력은 고정자와 관계된 자속을 발생하고, 자속과 동일 극수의 고정자 전압을 유지 한다.

$$\phi \cos(np(x+w_r, t) + \varphi) \quad (6)$$

w_r : 회전자 속도

정수슬롯, 3상 평형 권선에 대한 고조파차수는 lp 에 의해 주어진다.

$$l = 6m \pm 1, \quad m=0, 1, 2, 3, \dots$$

정상적인 전동기의 경우는 (5)식의 고조파 차수와 (7)식의 고조파 차수가 일치한 차수가 선간전압 스펙트럼에서 우세하게 나타나지만, 회전자바의 고장시는 (7)식에 의한 고조파 차수가 우세하게 나타나므로 고장진단이 가능하다

3. 시험 결과

3.1 시험모델

전류신호분석(MCSA)법을 통하여 회전자바의 이상유무를 진단하기 위한 시험모델의 사양은 3상-6극-75kW-380V이고, 회전자 슬롯은 스류없이 38개이다. 그림 1.은 측정을 하기위한 시스템 구성도를 도시하였다. 시험전동기는 380V전원의 토오크모드의 인버터 제어를 하고, 20kW 부하가 되도록 구동된다.

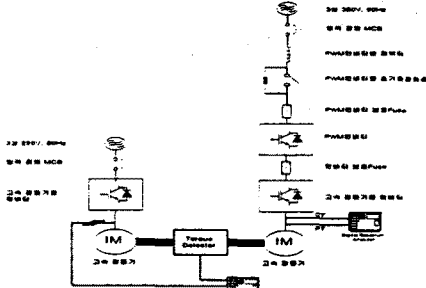


그림 1. 측정 시스템 구성도

3.2 시험결과

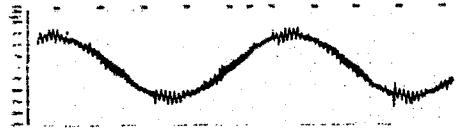
3.2.1 전류신호분석결과

그림 2는 토오크 모드로 제어하는 인버터의 출력 전류파형이고, 그림 3-6은 기본파와 5,7차 고조파에 이웃하는 주파수에 대한 선전류 스펙트럼을 도시하였다.

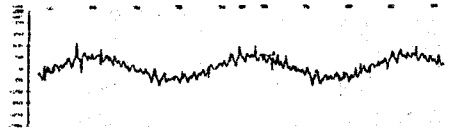
그림 3에서는 기본주파수 89.3Hz, slip 0.0375(p.u.)에 대해 수식 (1)에 의한 사이드밴드 주파수는 82.6Hz와 96Hz이고, 82.6Hz에서 대략 4dBV정도가 바가 손상된 전동기에서 더 크다.

그림 4에서는 5,7차 고조파 446.5Hz와 625.1Hz에 대해 사이드밴드 주파수는 426.433Hz와 598.3, 605Hz이나 7차 고조파의 605Hz이외의 다른 사이드밴드 주파수에서는 구별하기가 어렵다.

그림 5와 6은 269Hz(기본파)와 1345, 1883Hz(5,7차 고조파)에서의 스펙트럼으로 바손상에 대해 구별하기가 어렵다. 이는 측정합의 발란성이 정확하지 않아 진동에 의한 사이드밴드 주파수 성분이 두드러지지 않았나 판단된다. 그림 7은 3000rpm, 15kW부하에서의 인버터의 단자전압 및 전류의 q축 성분을 나타낸다. b)에서는 바손상에 의해 q축 단자전압이 2배의 슬립주파수인 2*378.8mHz로 리플이 발생하는 것을 알수 있는데, 이것은 강제적으로 q축 전류를 일정하게 유지시켜주므로 인해 q축전압에서 발생하는 것으로 판단된다



a) 89.3Hz(x:1ms/300div, y: 0.2V/200A)



b) 269Hz(x:500 μs/300div, y: 0.2V/200A)
그림 2. 'a'상 전류(인버터출력파형)

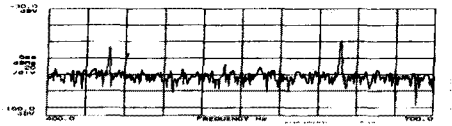


a) 정상

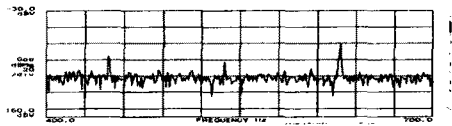


b) 바 손상

그림 3. 기본파에 이웃하는 선전류 스펙트럼 (89.3Hz)

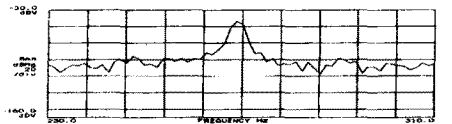


a) 정상

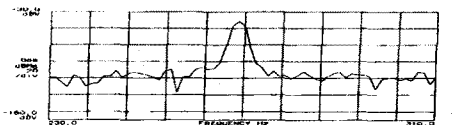


b) 바 고장

그림 4. 5,7차 고조파에 이웃하는 선전류 스펙트럼 (89.3Hz)

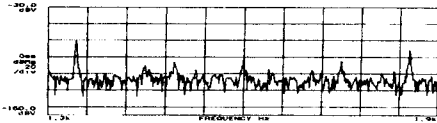


a) 정상

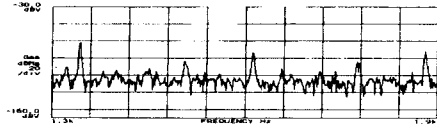


b) 바 손상

그림 5. 기본파에 이웃하는 선전류 스펙트럼 (269Hz)

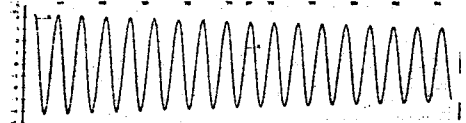


a) 정상

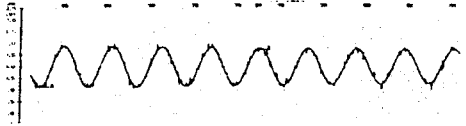


b) 바손상

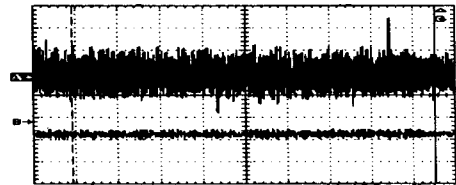
그림 6. 5,7차 고조파에 이웃하는 선전류 스펙트럼 (269Hz)



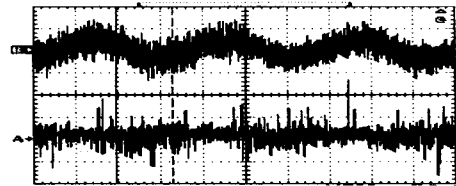
a) 정상(x:10ms/300div, y:10V/400V)



b) 바손상(x:5ms/300div, y:10V/400V)
그림 9. 전원차단 직후 단자전압 파형



a) 정상



b) 바손상

그림 7. 토오크 파형 (15kW부하-3000rpm)

3.2.2 개방단자전압 신호 분석결과

본 시험은 무부하상태에서 인버터로 운전하였으며, 전압 인가파형을 그림 8에 도시하였다.

그림 9는 전원차단직후 단자전압파형을 측정 한 것으로 a)는 정상전동기로서 기본주파수가 87Hz, b)는 79.2Hz일 때 측정 한 데이터이다. 회전자 기가력에 의한 고정자에 유기되는 전압이 회전자 시정수만큼 감소되고, 회전자 바가 손상된 전동기의 파형에서 고조파가 섞여있는 현상이 잘 나타나고 있다.

그림 10에서는 그림 9의 전압파형의 스펙트럼을 나타내고 있으며, 정상전동기 a)에서는 수식 (5)와 (7)에서 산정된 일치하는 고조파 37차에 해당하는 3.21kHz의 성분이 두드러지고 (7)식에 의한 고조파 성분이 잠재되어 있는 반면 바손상 전동기 b)에서는 잠재되어 있던 (7)식에 의한 고조파 성분이 두드러져 (5)식과 일치하는 고조파 37차에 해당되는 주파수 2.93kHz와 크기가 거의 유사해지는 현상을 볼수 있다. 결국 이 방법은 회전자 바의 손상진단을 명확히 알수 있을뿐 아니라 간단한 시험절차와 계측기로도 가능하기 때문에 최근에 이방법을 많이 사용한다.

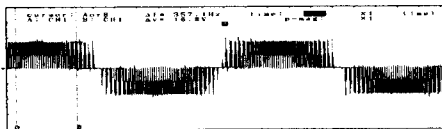
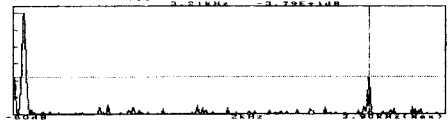
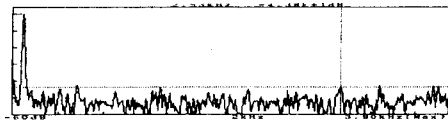


그림 8. 단자개방직전 인버터 PWM 전압인가파형



a) 정상(기본주파수: 87Hz)



b)바손상(기본주파수: 79.2Hz)

그림 10. 전원차단직후 V_{ab} 의 스펙트럼

3. 결 론

지금까지 인버터 구동 농형유도전동기의 회전자바가 손상시 속도변화에 대한 선전류에 존재하는 기본파와 공간고조파에 이웃하는 사이드밴드(sideband)를 검출, 분석하는 전류신호분석법과 3상 고정자 전원을 개방하여 순수 회전자 전류에 의한 고정자에 유기되는 전압을 측정, 분석하는 개방단자신호분석법을 이용하여 그타당성을 시험을 통하여 검증하였다. 전류신호분석법에서는 시험 중 축결합의 인발란스 영향에 의해 고속에서의 정확한 측정이 어려운 면은 있었으나, 전체적으로 회전자 바의 손상에 대한 현상을 명확히 규명하였다. 개방단자시험법에서는 간단한 시험절차와 계측기로 바손상에 의한 현상을 명확히 규명하였다. 단 전류신호분석법은 운행중 인 차량의 초기진단에 유리하며, 개방단자시험은 운행중의 진단이 아니라 별도의 시험을 해야하는 단점이 있다. 향후 이 분야에 대해 검출기술, 해석기술 등을 더 연구하여 진보된 결과를 발표하도록 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Blattner, "Sensorless Detection of Rotor-cage-defects for Inverter Fed Induction Motors," *IEEE Trans.*, pp. 2311-2315, 1998, July.
- [2] S.Nandi, H.A. Toliyat, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machine - A Review," *IEEE Trans.*, pp. 1-8, 1999.
- [3] R.S.Wieser, "The Integration of Machine Fault Detection into an Indirect Field Oriented Induction Machine Drive Control Scheme The Vienna Monitoring Method," *IEEE Trans.*, pp. 278-285, 1998.
- [4] H.A. Toliyat, "A Novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction Motors," *IEEE Trans.*, Vol. 35 No. 5, pp. 1000-1006, 1999, September.