

농형 유도전동기의 회전자 바 파손에 따른 전자기적 특성 해석

이성형, 김미정, 조운현
 동아대학교 전기공학과

Analysis of Electromagnetic Characteristics according to Bar broken
 in Squirrel-cage Induction Motor

Sung-Hyung Lee, Mi-Jung Kim, Yun-Hyun Cho
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - This Paper presents the effects according to broken rotor bar of squirrel cage induction motor. The rotor faults of induction motors may cause bad effects on the performance of the motor. An accurate modeling and analysis of characteristics of damaged rotor bar in the induction motor are developed using FEM(Finite Element Method). The results can be useful for real-time on-line monitoring system of an induction motor.

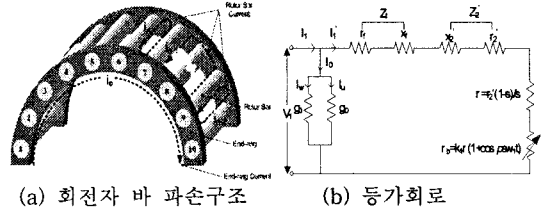


그림 1. 회전자 바 파손구조 및 등가회로

1. 서 론

유도전동기는 오늘날 많은 산업현장에서 사용하고 있으며 그 용도가 다양할 뿐 아니라 산업공정에서의 중요성에 있어서도 많은 비중을 차지하고 있다. 그러므로 유도전동기의 고장이나 파손은 기기 자체의 손실뿐만 아니라 전체 공정에 있어서도 막대한 손실을 가져다 줄 수 있다. 그리고 고장을 방지할 경우에는 대형 사고로 이어질 우려도 있다. 따라서 이러한 우려를 미연에 방지하기 위해서는 고장이나 파손의 징후를 미리 발견하여 적절한 조치를 취하는 것이 매우 중요하다. 그러한 이유로 최근에 실시간 고장 진단 시스템과 같은 기술들이 많이 개발되고 있다.

대부분의 회전자 고장은 바와 엔드링 사이의 결합이 원인이 되며, 그 영향으로 파손된 바와 인접한 바들의 전류가 증가하게 된다. 이는 토크 파동, 속도 불안정, 진동, 주파수 요소의 변화를 일으키며 그에 따른 음향 노이즈, 과열 등의 현상을 수반한다.

이에 본 논문에서는 농형 유도 전동기의 회전자 바에 파손이 발생한 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 제시한다. 회전자 바 파손에 따른 전자기적 특성을 해석함으로써 전체 유도전동기 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석한다.

2. 본 론

2.1 바 파손에 따른 수학적 모델링

유도전동기의 회전자 바 손상은 과부하 및 불평형 등으로 인해 발생하는 손실로 발생하는 열적 스트레스, 불균일한 자력에 의한 자기 스트레스, 샤프트의 부하 토크와 원심력에 의해 발생하는 잔류 스트레스, 화학적 작용 및 회전자 재질의 마모, 느슨한 적층구조, 국부적 피로, 배어링의 소손으로 발생하는 기계적 스트레스로 인하여 발생하게 된다.

그림 1은 회전자 바 파손 구조와 그에 따른 등가회로를 나타내고 있다.

회전자 바 파손으로 인한 전류 방해는 회전자 저항을 증가시켜 주위 회전자 바의 전류상승 및 온도상승을 가져온다. 파손된 바는 고정자 극이 통과할 때마다 저항이 증가하므로 회전자가 1회전 할 때마다 주파수는 슬립 주파수 f_2 에 극수 p 를 곱한 값이 된다. 따라서 회전에 따라 저항성분은 식 (1)과 같다.

$$r'_b = k_1 r' (1 + \cos p s w_1 t) \tag{1}$$

p :극수, s :슬립, w_1 :전원의 각속도, $r' = r_2' \frac{1-s}{s}$ 로서 부저항을 1차적으로 환산한 것이다. r'_b 는 바에 결합이 있는 경우 증가된 저항값으로 파손된 바가 극을 통과할 때마다 증가한다. 파손된 바 성분을 추가한 입력전류는,

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= I_0 + I'_0 = V_1 \left(Y_0 + \frac{1}{Z_1 + Z_2 + r_r} \right) \tag{2} \\ &= V_1 \left\{ (g_0 + \frac{r_1 + r'_2 + r'_r}{Z^2}) - j \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2}{Z^2} \right) \right\} \end{aligned}$$

여기서

$$Z = \sqrt{(r_1 + r'_2 + r'_r)^2 + (x_1 + x_2)^2}$$

바 결합에 의한 전류변화를 계산하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= g_0 V_1 + \frac{r_1 + r'_2 + r'_r}{Z^2} V_1 + \frac{k_1 r' (1 + \cos p s w_1 t)}{Z^2} V_1 \tag{3} \\ &\quad - j \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2}{Z^2} \right) V_1 \end{aligned}$$

회전자 바 결합이 없을 경우 $r'_b = 0$ 이고 순시전압 $v_1 = \sqrt{2} V_1 \sin w_1 t$ 이면 순시전류 i_1 은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= (g_0 + \frac{r_1 + r'_2 + r'_r}{Z^2}) v_1 - j \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2}{Z^2} \right) v_1 \tag{4} \\ &= \sqrt{2} I_1 \sin(w_1 t - \theta) \end{aligned}$$

여기서

$$|I_1| = \sqrt{\left(g_0 + \frac{r_1 + r_2 + r_r}{Z^2}\right) + \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2}{Z^2}\right) V_1^2} \quad (5)$$

회전자 바 결합이 있을 경우 $k_1 r' (1 + \cos p s w_1 t) \neq 0$ 이 아니므로 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} I_1 \sin(w_1 t - \theta) + \frac{k_1 r' (1 + \cos p s w_1 t)}{Z^2} \sqrt{2} V_1 \sin w_1 t \\ &= \sqrt{2} I_1 \sin(w_1 t - \theta) + \frac{k_1 r'}{Z^2} \sqrt{2} V_1 \sin w_1 t \\ &\quad + \frac{k_1 r'}{Z^2} \sqrt{2} V_1 \sin w_1 t \cos p w_1 t \end{aligned} \quad (6)$$

첫 번째 항은 결합이 없을 때의 전류와 같고, 두 번째 항은 결합에 의해 전류가 약간 증가한 성분이며 크기가 매우 작으므로 무시할 수 있고, 세 번째 항은 회전자 바 결합에 의해 회전자와 함께 변화하는 성분으로 식 (7)과 같이 두 성분으로 분해되어 측대파 성분이 된다.

$$\frac{k_1 r'}{Z^2} \sqrt{2} V_1 \{ \sin(w_1 - p w_2) t + \sin(w_1 + p w_2) t \} \quad (7)$$

$s w_1 = w_2$ 로서 슬립 각속도이다. 결합이 있을 경우 전원 주파수의 측대파 성분으로 나타나며 그 진폭은 결합에 비례하게 된다. 만일, 회전자 회로에 불균형이 발생하면 고정자 전류 스펙트럼의 전류 성분 중 $(1 - 2s)f_e$ 에서 특징적인 주파수를 생성하는데, 이러한 현상은 회전자 전류에 의해 발생하는 자계의 비대칭을 초래하여 공극 이상을 유발한다. 회전자 바의 고장은 고정자측 공급전류에 서로 다른 주파수 성분들을 발생시킬 것이다. ω_1 은 기본 공급 각주파수이다. 일단 회전자 바가 손상되고 회전자 불균형이 일어나면 고정자 전류에서 식 (8)과 같은 주파수 성분들을 발생시킨다.

$$(2s - 1)\omega_1, (4s - 1)\omega_1, (2s + 1)\omega_1, (6s - 1)\omega_1, (4s + 1)\omega_1 \quad (8)$$

이들은 공급주파수 f_e 주변의 측대파(Sidebands) $\pm 2s f_e, \pm 4s f_e, \pm 6s f_e, \dots$ 이다. 측대파 성분의 크기는 주요 공급 주파수 성분에 비하여 매우 작으며 고조파 차수와 함께 감소하므로 검출하는데 어려움이 있다. 특히 부하가 적거나 무부하에서 측대파 주파수 요소들은 기본주파수에 근접해 있지만 이러한 복잡한 상태를 전류 모니터링으로 측정할 수 있다. 회전자 고장 검출을 위해 모터 선전류 스펙트럼 해석을 사용하였으며 파손된 바 고장을 검출하기 위해 식 (9)와 같은 공급주파수 주변의 측대파를 사용하여 고장을 검출하였다.

$$f_b = (1 \pm 2s) f_e \quad (9)$$

f_e 는 공급주파수이고, $f_e(1 - 2s)$ 성분은 운전 중의 토크 맥동으로 인한 것이며, $f_e(1 + 2s)$ 성분은 회전자 진동으로부터 유도된다. 파손된 회전자 바 고장의 측대파는 식 (10)의 특성주파수에서 순차적으로 발생한다.

$$f_b = (1 \pm 2ks) f_e, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

전동기의 부하는 이러한 측대파의 크기에 영향을 준다.

고정자 선전류에서 관측될 수 있는 다른 스펙트럼 성분은 식 (11)과 같다.

$$f_b = \left[\frac{k}{p} (1 - s) \pm s \right] f_e \quad (11)$$

여기서, f_b 는 검출할 수 있는 파손된 바의 주파수들이며, $k/p = 1, 3, 5 \dots$ 이다.

회전자 고장은 회전 주파수의 진동의 증가에 따라 검출될 수 있으며, 부정합은 두 배의 축회전 주파수 진동의 증가에 의해 발견될 수 있다. 자기력은 자속 밀도의 제곱에 비례하므로 $2f_e$ 와 슬롯 고조파를 갖는 정상 운전 중에도 진동은 나타난다. 바 파손 시 운전 주파수 주위에 극수와 슬립 주파수를 곱한 것과 같은 간격의 측대역 성분들이 나타나고, 결과적으로 운전 속도의 진동이 발생한다. 진동 신호에서 발생하는 결합 주파수는 운전 주파수(1X) 및 조화 성분(2X, 3X 등) 부근에서 극수와 슬립 주파수를 곱한 극 통과 주파수 f_p 와 같은 간격의 측대역 성분이 발생한다.

$$f_b = f_p, 1X \pm f_p, 2X \pm f_p, 3X \pm f_p, \dots \quad (12)$$

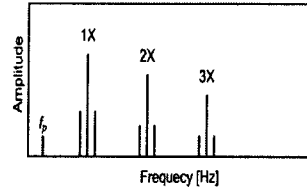


그림 2. 회전자 바 파손 진동 주파수

그러나 회전자 바 파손과 같이 전기적 결합이 발생하면 진동 신호 분석으로 특성 파악이 어려우며 주로 전류 신호 특성으로 파악한다.

2.2 바 파손에 따른 전자계 특성 해석

전자계 특성 해석을 위해 유한요소해석 상용프로그램인 Flux 2D를 사용하였다. 표 1은 해석에 사용된 유도전동기 제원을 나타낸다. 정격 출력은 7.5 [kW]이며, 정격 속도 1768 [rpm]에서 40 [Nm]의 정격 토크를 가진다.

본 논문에서 사용된 유도전동기는 정상 전동기와 2개의 회전자 바가 파손된 전동기로서 고장에 따른 전자계 특성을 해석 및 분석하였다. 회전자 바의 파손은 외부회로 연결 시 이웃되는 두 개의 바의 저항을 무한대로 두고 유한요소해석을 수행하였다. 2D자계 해석 특성상 회전자 바의 스큐에 대한 영향은 고려하지 않았다.

표 1. 유도전동기 제원

구분	항목	치수
사양	정격 출력 [kW]	7.5
	정격 전압 [V]	220/380
	정격 속도 [rpm]	1768
	정격 토크 [Nm]	40
	주파수 [Hz]	60
고정자	슬롯 수/극 수	36 / 4
	외경/내경 [mm]	220/150
	회전자 바 (수)	Al (28)
회전자	공극 [mm]	0.5
	외경 [mm]	149
	적층길이 [mm]	110

2.3 특성해석 고찰

2.3.1 자속 밀도

그림 3은 고장에 따른 자속밀도를 나타내고 있다. 그림 3(a) 정상 모델의 경우 4개의 극에서 모두 비슷한 값의 자속밀도 분포도를 보이고 있지만 그림 3(b)의 바 파손 모델의 경우에는 파손된 2개의 바 부분에서 자속밀도의 변화를 확인할 수 있다.

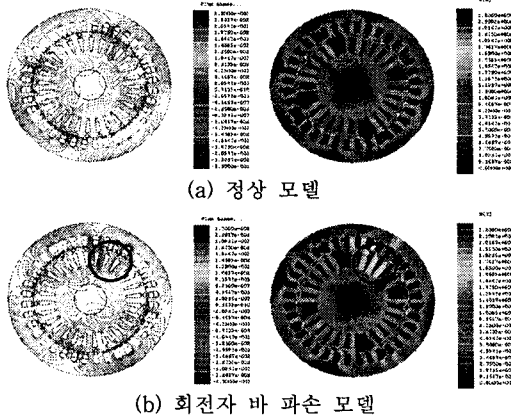


그림 3. 고장에 따른 자속 밀도 분포도

2.3.2 공극 자속 밀도

그림 4은 공극 자속 밀도를 나타낸다. 그림 4(a) 정상 모델의 공극 최대 자속밀도는 1.2 [T]로 1주기 동안 일정한 값을 가지게 되지만, 그림 4(b)의 2개 회전자 바 파손이 고려된 경우 파손 부분의 공극에서 자속밀도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 비대칭 공극 자속밀도는 회전자와 고정자에 비대칭 자기력을 발생시켜 진동을 발생시키거나 고장 심화 및 2차 결함을 야기시킬 수 있다.

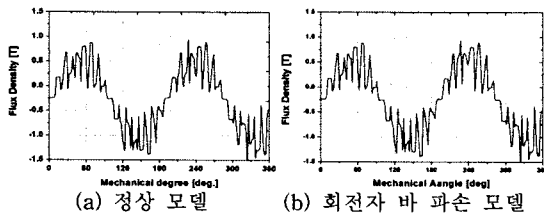


그림 4. 고장에 따른 공극 자속 밀도

2.3.3 전류 신호 특성

고정자 전류 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 고장 신호를 분석하였다. 그림 5는 0~210Hz 영역에서의 고정자 전류 스펙트럼을 보여준다. 그림 5(a)의 정상 모델에서는 기본 주파수 성분 60Hz만이 검출되었지만 바 파손시 주파수 스펙트럼에서는 주위에 노이즈 성분이 검출됨을 확인할 수 있다.

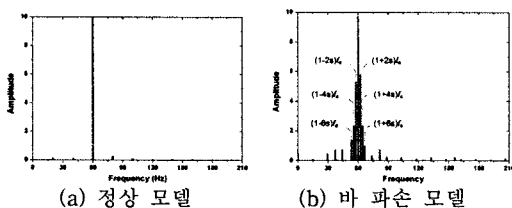


그림 5. 고정자 전류 스펙트럼 (0~210Hz)

2.3.4 유기기전력 분석

유도전동기 운전시 공극 자속밀도의 변화로 인하여 각 고정자 슬롯에서 쇄교 자속이 변하게 된다. 실제로 산업체에서는 공극의 자속밀도 변화를 알아내기에 어려움이 따르기 때문에 전동기의 슬롯에 써치 코일을 삽입하여 유기 기전력의 변화를 통해 자속 변화를 측정하였다. 회전자 바 파손의 경우 A상 쇄교 슬롯과 180° 떨어진 곳에 위치한 슬롯에 써치 코일을 삽입하여 유기 기전력을 검출하여 특성을 분석하였다.

그림 6은 써치 코일에서의 유기 기전력 파형을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 정상 모델의 유기 기전력을 나타내며, 외부 회로도를 연결하여 유한요소법으로 해석한 써치 코일에서의 유기 기전력과 공극에서 시간에 따른 자속의 변화량을 검출하여 패러데이 법칙을 사용하여 유기 기전력을 계산한 결과 값을 비교하였을 때 거의 일치함을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 회전자 바 파손 모델의 유기 기전력을 나타낸다. 회전자 바 파손 시 공극 자속 밀도의 변화에 의해 정상 전동기와 비교하여 파형의 모양이 변형됨을 확인할 수 있다. 이 결과 값들을 비교기를 거쳐 정상 전동기의 파형과 비교하여 상이함 정도에 따라 회전자 바 파손을 감지 할 수 있다.

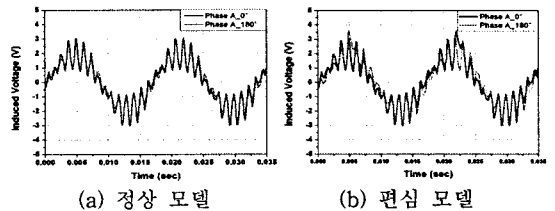


그림 6. 써치 코일에서의 유기 기전력

3. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 고장진단을 위하여 전기적 결합인 회전자 바 파손에 대하여 유한요소법을 이용한 현상을 분석하였다. 회전자 바의 인위적 파손을 통한 결과값의 고찰이 있었으며 써치 코일을 이용한 공극 자속의 변화를 검출하였다.

본 논문에서 제시한 연구결과는 고장진단 모니터링 시스템의 고장 진단 알고리즘 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 일환으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford: Clarendon Press, 1993, pp. 307-323.
- [2] A.H. Bonnett, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 28, No. 4, pp. 921-936, 1992.
- [3] 황돈하 외, "유도전동기 고장모의 시뮬레이터 개발", 2006년도 대한전기학회 EMECS부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 182-184, 2006. 4. 20-22.[1]
- [4] 양보석, "진동신호분석기술을 이용한 유도전동기의 결함분석 및 진단". 인터비전, 2007