

회전자 편심을 고려한 능형 유도전동기의 특성해석

김미정·김병국·조원영·조운현·황돈하\*·강동식\*  
 동아대학교 전기공학과, \*한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

Characteristics Analysis on the Effects of Rotor Eccentricity in Squirrel-cage Induction Motor

Mi-Jung Kim, Byong-Kuk Kim, Won-Young Jo, Yun-Hyun Cho, Don-Ha Hwang\*, Dong-Sik Kang\*  
 Dong-A University, \*Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - This paper describes the effects of air gap eccentricity in induction machines. Asymmetric electro-magnetic force caused by the frictional worn bearing, rotor misalignment and unbalanced rotor etc. generates an asymmetrical operation, vibration and electro-magnetic noise. The need for detection of these rotor eccentricities has pushed the development of monitoring methods with increasing sensitivity and noise immunity. In this paper, we focus on investigating the asymmetrical operation considering of unbalanced magnetic force in squirrel-cage induction motor with 380 [V], 7.5 [kW], 4P, 1,768 [rpm]. The effects of the rotor eccentricity, magnetic force are investigated by finite element method (FEM).

1. 서 론

산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 유도전동기의 고장, 파손은 수리 및 교환 등의 많은 사후 보수비용이 요구되며, 그대로 방치할 경우 대형 사고가 발생하여 막대한 손실을 입을 수 있다. 따라서 고장이나 파손이 일어나기 전에 그 징후를 발견하여 설비의 상태를 정량적으로 파악하고 조치를 취한다면 사전에 사고를 예방할 수 있다. 때문에 최근 들어 설비의 상태와 고장 정도를 실시간으로 진단할 수 있는 감시진단 장치의 필요성이 점차 대두되고 있다.

일반적으로 유도전동기의 고장은 고정자 턴 단락, 회전자 바의 소손, 회전자 및 고정자의 정적, 동적 불평형, 베어링 고장 및 기계적 불균형 등으로 발생한다[1]. 이러한 회전기기의 고장에 대하여 Thomsom과 Thorsen 등은 능형 유도전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 소손을 진단하는 실험적인 방법을 제시하였고[2-3], Toliyat 등은 유도전동기에서 회전자 편심의 효과를 수학적 해석을 토대로 회전자 전류 또는 토크, 기전력의 변화에 미치는 영향을 연구하였다[4].

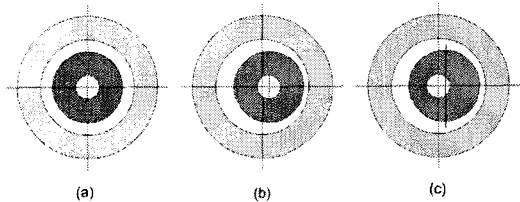
다양한 전동기의 고장 중에서 회전자에 편심이 발생한 경우, 회전자 그 자체는 중심선을 따라서 동일한 중심을 가지지 않게 된다. 따라서 편심 회전자는 편심된 축을 따라서 회전하는(편심 고정자의 경우에서 고정 공극과는 반대로) 회전자와 고정자 사이의 불규칙한 공극을 발생시키게 된다. 또한, 회전자에 국부적인 가열을 일으켜 회전자를 휘어지게 만들어 고정자와 회전자 간의 접촉을 일으키게 된다[5].

본 논문에서는 능형 유도전동기의 회전자에 편심이 발생한 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행한 결과를 제시한다. 편심에 따른 전자기적 특성을 해석함으로써 유도전동기의 편심고장이 전동기의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. FEM에 의한 불평형 자기력 특성해석

2.1 회전자 편심에 따른 불평형 자기력

유도전동기에 있어 회전자 편심은 진동의 가장 큰 원인으로 작용하며 크게 정적 편심(Static Eccentricity)과 동적 편심(Dynamic Air-Gap Eccentricity)으로 나눌 수 있다. 정적 편심이란 관성 축이 실제 축과 평행하게 이동된 상태를 말하며 회전축을 통해 한 방향으로 작용하는 불평형의 상태로 정의한다. 동적 편심이란 관성 축이 샤프트 축의 무게 중심이 아닌, 다른 곳에서 교차하는 상태를 말한다[5]. 그림 1은 회전자 편심을 나타내었다.



(a) centric motor (b) static eccentricity (c) dynamic eccentricity  
 그림 1. 회전자 편심

회전자의 편심은 공극에서 Unbalanced Magnetic Pull (UMP)를 발생시켜 입력 전류, 토크, 기전력, 진동에 영향을 준다. 회전자가 고정자 중심에 대해서 편심 되었을 때 공극길이는 각 변위  $x$ 와 시간  $t$ 의 함수이다.

$$\delta(x,t) = \delta_0 [1 - \epsilon \cos(x - \omega_w t - \varphi_w)] \quad (1)$$

여기서,  $\delta_0$ 는 평균 공극길이,  $\varphi_w$ 는 상의 각이다. 공극 퍼미언스  $A$ 는 공극 길이와 역의 관계를 가진다.

$$A(x,t) = \frac{\mu_0}{\delta(x,t)} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \lambda_{\lambda} \cos[(x - \omega_w t - \varphi_w)] \quad (2)$$

$\lambda_{\lambda}$ 는 푸리에 급수이다.

기전력은 공극에서 정형적으로 분포 되어있다고 가정하면 기전력의 표현은 다음과 같다.

$$F_m(x,y) = \overline{F_m} \cos(px - \omega t - \varphi_m) \quad (3)$$

자속밀도는 기전력과 공극 퍼미언스의 곱과 같다.

$$b(x,y) = F_m(x,t)A(x,t) \quad (4)$$

우리가 고려하는 모터는 극쌍의 수가 하나 이상이고, 회전자 주변의 자속 밀도의 적분이 0이라는 가정에 의해

동극의 자속을 무시할 수 있다. 따라서 공극 퍼미언스의 1차 고조파만을 고려하면, 식 (5)의 결과는 공극에서의 자속밀도 분포를 나타낸다.

$$b(x,t) = B_p \cos(px - \omega t - \varphi_m) + b_{p-1} \cos((p-1)x - (\omega - \omega_w)t - (\varphi_m - \varphi_w)) + b_{p+1} \cos((p+1)x - (\omega + \omega_w)t - (\varphi_m + \varphi_w)) \quad (5)$$

여기서 자속밀도 고조파의 크기는  $B_p = F\Lambda_0$ 와  $B_{p\pm 1} = F\Lambda_{p\pm 1}$ 이다.

회전자와 고정자 사이에서 z와 y방향의 자기력은 회전자 바깥 표면에 걸친 표면 적분에 의해 얻어진다.

$$F_z = \int_0^{2\pi} \frac{b(x,t)^2}{2\mu_0} \cos(x) R l dx \quad (6)$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} \frac{b(x,t)^2}{2\mu_0} \sin(x) R l dx \quad (7)$$

여기서 R은 회전자의 외경, l은 공극의 길이이다[6].

본 논문에서는 농형 유도전동기의 동적 편심에 대한 수학적 해석, 식 (6), (7)을 유한요소법을 통하여 얻을 수 있었다.

## 2.2 유한요소법에 의한 해석

표 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 유도전동기의 제원을 나타낸다.

표 1. 유도전동기 제원

구분	항목	치수
사양	정격 출력 [kW]	7.5
	정격 전압 [V]	220/380
	정격 속도 [rpm]	1760
	정격 토크 [Nm]	40
고정자	슬롯 수	36
	외경 [mm]	220
	내경 [mm]	150
	극 수	4
회전자	공극 [mm]	0.5
	외경 [mm]	149
	적층길이 [mm]	110
	회전자 바	Al

유한요소 해석에 사용되는 자계 방적식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{ez} + \sigma \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{v} \times \vec{B} - \nabla \phi \right) \quad (8)$$

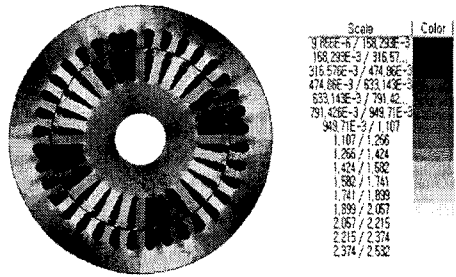
여기서,  $A_z$ 는 z축 방향 자기 벡터 포텐셜,  $J_{ez}$ 는 입력 전류 밀도,  $\vec{v}$ 는 회전자 속도,  $\phi$ 는 전기 스칼라 포텐셜,  $\sigma$ 는 회전자 바의 전도율을 나타낸다.

## 2.3 특성해석 고찰

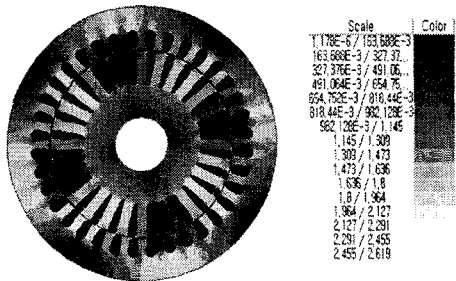
본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 유도전동기를 삼각형 요소, 시간 스텝으로 모델링 하였다. 해석모델의 Node는 39184개, Line element는 6444개, Surface element는 19650개이며 공극은 회전자 편심을 고려하기 위하여 3개의 층으로 분할하였다.

그림 2는 해석결과에 따른 자속밀도 분포를 나타낸다.

해석결과 그림 2의 (a)에서 정상모델의 경우 공극에서의 자속밀도분포가 균일하게 나타나고 있으나, (b)와 같이 편심이 발생한 경우는 공극 자속밀도의 불평형이 크게 보임을 알 수 있다.



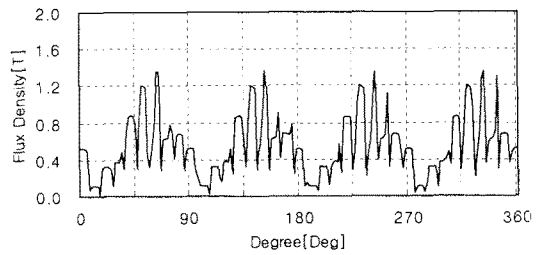
(a) 정상모델



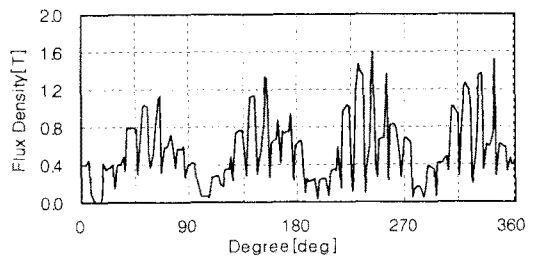
(b) 편심모델

그림 2. 정격부하시 자속밀도 분포

회전자의 편심으로 인해 공극의 자속밀도는 비대칭 구조를 가지게 된다. 그림 3은 정격속도 1,768 [rpm], 0.24 [s]에서의 공극 자속밀도를 나타낸다. 정상모델 (a)의 공극 최대 자속 밀도는 1.4 [T]로 1주기 동안에 일정한 최대값을 가지게 되지만, (b)와 같이 편심되었을 경우는 공극 자속밀도가 편심된 공극(210°)에서 1.6 [T], 그 반대쪽(30°) 공극에서는 1.2 [T]로 양쪽 공극에서 0.4 [T]의 차이를 보이고 있다.



(a) 정상모델



(b) 편심모델

그림 3. 1,786 [rpm], 0.24 [s]일 때 공극 자속밀도

회전자 바에 유기되는 전압은 공극의 자속에 의해 발생하므로 그림 4에서 비대칭 자속으로 인해 유기 전압 리플이 심하게 나타남을 볼 수 있다.

그림 5는 정격부하시 정상 전동기 고정자 전류와 편심된 부분의 고정자 전류를 비교하고 있다. 편심된 회전자 부근의 자속밀도는 권선의 역기전력에 영향을 주고, 이는 다시 권선 전류에 영향을 미치게 된다. 회전자 편심을 가진 전동기의 전류 피크치가 약 3 [A] 정도 큼을 볼 수 있다.

그림 6은 1,768 [rpm] 일 때 공극 중 한 점(74.9에서의 자기력을 나타내었다. 정상 모델에서는 회전자가 1주기 동안 6 [N/m]의 일정한 최대값의 자기력을 가지지만, 편심이 발생한 경우는 비대칭 공극 자속분포로 인해 자기력의 불평등이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 이러한 자속밀도의 비대칭이 자기력에 영향을 미치게 되고 기계적 진동과 소음, 더 나아가 고장을 야기하게 된다.

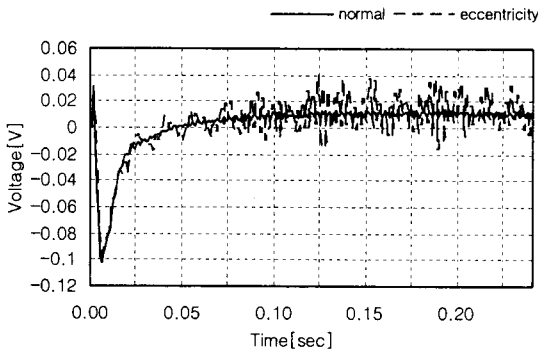


그림 4. 정격부하 가동시 회전자 바의 유기전압

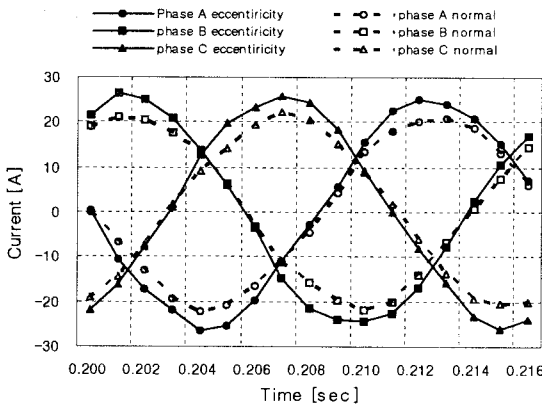
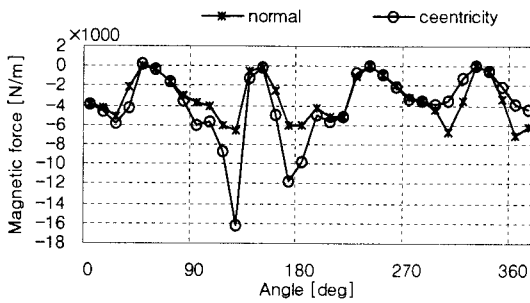
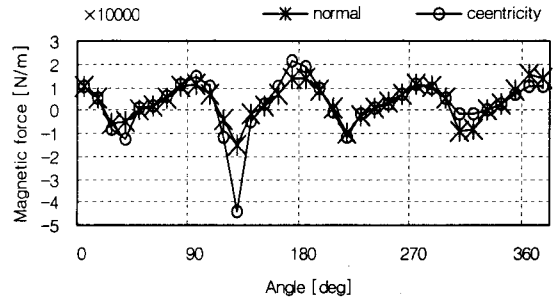


그림 5. 정격부하 정상상태 고정자 전류 비교



(a) x축 방향



(b) y축 방향

그림 6. 1,768 [rpm]일 때 공극의 한 점에서의 자기력

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 3상 농형 유도전동기에 있어서 회전자의 동적 편심으로 인한 전자기적 현상에 따른 특성변화를 연구하였다. 편심으로 인하여 공극 자속밀도의 분포 차이로 인하여 자기력과 입력 전류의 변화, 회전자 바 유기전압의 변화가 발생함을 확인하였고, 이로 인해 유도전동기의 회전자 진동을 유발함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 해석결과와 추후 실제 유도전동기에서의 실험 데이터와의 비교를 통하여 회전자 고장감시 알고리즘 개발에 기초자료가 될 것으로 기대된다.

본 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-271) 주관 및 한국전기연구원 기본연구사업의 위탁연구로 수행된 연구결과임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 황돈하 외, "유도전동기의 회전자 진동에 따른 공극의 자속변화 해석", 2004 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환 시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 62~64, 2004.
- [2] W.T. Thosom and M. Fenger, "Industrial Application of Current Signature Analysis to Diagnose Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motors", Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 205-211, 2000.
- [3] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Method of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors", ETEP, Vol. 8, No. 5, pp. 383-395, 1998.
- [4] H.A. Toliyat, et al., "A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, Jul./Aug. 1996.
- [5] D.H. Hwang, et al., "Analysis of a Three Phase Induction Motor under Eccentricity Condition", IEEE IECON 2005, North Carolina, USA, pp. 2609~2613, Nov. 6-10, 2005.
- [6] J.F. Watson, N.C. Paterson, and D.G. Dorrell, "The Use of Finite Element Methods to Improve Techniques for the Early Detection of Faults in 3-phase Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 655-660, Sep. 1999.
- [7] A. Tenhunen, et al., "Spatial Linearity of Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motors during Eccentric Rotor Motions", 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002), Bruges, Belgium, Vol. 1, pp. 330-335, Aug. 25-28, 2002.