

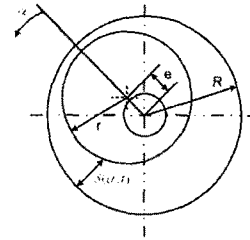
농형 유도전동기의 회전자 편심에 따른 특성분석

김미정, 김병국, 문지우, 조윤현, 황돈하\*, 강동식\*  
 동아대학교 전기공학과, \*한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

Analysis of Squirrel Cage Induction Motors with Rotor Eccentricity

Mi-Jung Kim, Byong-Kuk Kim, Ji-Woo Moon, 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 worm bearing, rotor misalignment and unbalanced rotor etc. generates an asymmetrical operation, vibration and electro-magnetic noise. 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) and experiment. The results can be useful for on-line monitoring of an induction motor.



<그림 1> 회전자 편심

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 농형 유도전동기에서 편심의 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 편심 된 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 380 [V], 7.5 [kW], 4P, 1,768 [rpm]의 정격을 가지고 있는 농형 유도전동기 회전자 편심에 따른 전자기적 특성을 유한요소 해석을 통해 시뮬레이션 하였고, 모의 고장 전동기 실험 테스트를 통한 측정치와 비교, 검토하여 해석을 통한 결과값의 신뢰성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 회전자 편심에 따른 불평형 자기력

유도전동기에 있어 회전자 편심은 진동의 가장 큰 원인으로 작용하며, 크게 정적 편심(Static Air-Gap Eccentricity)과 동적 편심(Dynamic Air-Gap Eccentricity)으로 나눌 수 있다. 정적 편심은 회전자가 회전자 축을 중심으로 회전하지만, 그 축이 고정자 축에서 이탈해 있는 경우로서, 정적 편심에서는 공극의 길이가 위치에 따라 초기에 이미 정해져 운전 시에도 변하지 않는다. 동적 편심은 회전자가 고정자 축과 동일한 축을 중심으로 회전하지만, 그 회전축이 회전자의 축과 동일하지 않은 경우이며, 운전 시 공극이 수시로 변하게 된다[5]. 그림 1은 회전자 편심을 나타내었다.

회전자의 편심은 공극에서 Unbalanced Magnetic Pull (UMP)를 발생시켜 입력 전류, 토크, 기전력, 전동에 영향을 준다. 회전자가 고정자 중심에 대해 편심 되었을 때 공극길이  $\delta(\alpha, t)$ 는 각 변위  $\alpha$ 와 시간  $t$ 의 함수이다[6].

$$\delta(\alpha, t) = \delta_0 \{1 - \cos(\alpha - \omega t - \varphi_r)\} \quad (1)$$

여기서,  $\delta_0$ 는 평균 공극의 길이,  $\omega$ 는 회전 각속도,  $\varphi_r$ 는 편심의 위상각이다.

공극 퍼미언스  $A$ 는 공극 길이와 역의 관계를 가진다.

$$A(\alpha, t) = \frac{1}{\delta(\alpha, t)} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} A_{\lambda} \cos(\lambda(\alpha - \omega t - \varphi_r)) \quad (2)$$

$A_{\lambda}$ 는 푸리에 급수이다.

기전력은 공극에서 정현적으로 분포되어있다고 가정하면 기전력의 표현은 다음과 같다.

$$F_m(\alpha, t) = \mu_0 R F_m \cos(\alpha - \omega t - \varphi_m) \quad (3)$$

자속밀도는 기전력과 공극 퍼미언스의 곱과 같다.

$$b(\alpha, t) = F_m(\alpha, t) A(\alpha, t) = \mu_0 R A(\alpha, t) [F_m \cos(\alpha - \omega t - \varphi_m)] \quad (4)$$

UMP는 Maxwell stress tensor에 의해 계산되어진다. x와 y방향의 자기력은 회전자 바깥 표면에 걸친 표면 적분에 의해 얻어진다.

$$F_x = \int_0^{2\pi} \frac{b(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \sin\alpha R d\alpha \quad (5)$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} \frac{b(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \cos\alpha R d\alpha \quad (6)$$

본 논문에서는 농형 유도전동기의 동적 편심에 대한 수학적 해석, 식 (5), (6)을 유한요소법을 통하여 얻을 수 있었다.

2.2 FEM 의한 해석

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

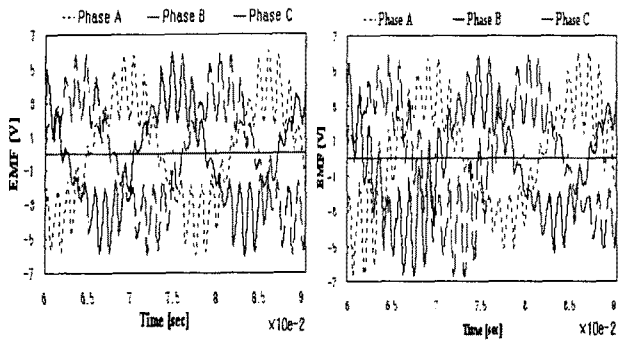
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{z,1} + \sigma \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{v} \times \vec{B} - \nabla \phi \right) \quad (7)$$

여기서,  $A_z$ 는 z축 방향 자기 벡터 포텐셜,  $J_{z,1}$ 는 입력전류 밀도,  $\vec{v}$ 는 회전자 속도,  $\phi$ 는 전기 스칼라 포텐셜,  $\sigma$ 는 회전자 바의 전도율을 나타낸다. 표 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 유도전동기의 제원을 나타낸다.

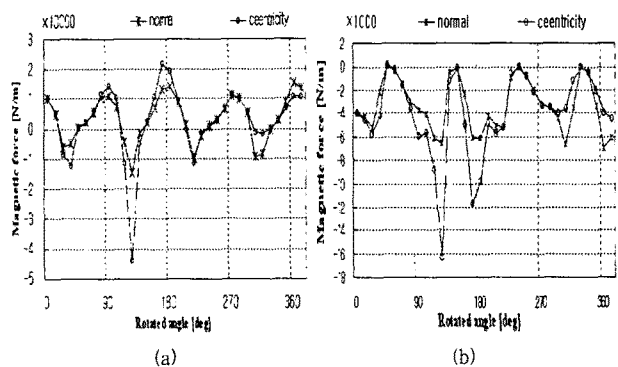
2.3 특성해석 및 실험 고찰

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 유도전동기를 삼각형 요소, 시간 스텝으로 모델링 하였으며 회전자 편심을 고려하기 위하여 공극은 3개의 층으로 분할하였다. 0.3mm 편심을 가진 유도전동기의 3개의 공극 층(회전자 공극, 고정자 공극, 회전 공극) 중 회전 공극의 중심을 회전자의 중심축과 같게 두고 해석하면, 회전축이 시간에 따라 일정한 정적 편심이 된다. 회전 공극의 중심을 고정자의 중심축과 같게 두고 해석하면, 회전축이 시간에 따라 변하는 동적 편심이 된다. 편심에 따른 자속 변화를 알기 위해 고정자의 저 부분에 세치 코일을 설치하였으며, 동적 편심의 경우에는 자속이 주기성을 가지고 계속 변화하게 되므로 각 상의 1개의 지점에서만 자속을 검출 하였다[5].

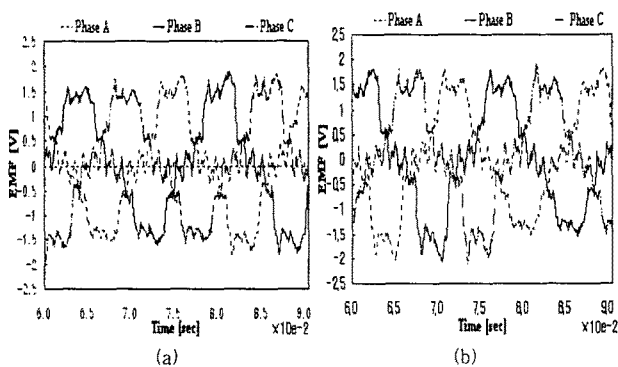
실제 테스트에 사용된 유도전동기는 샤프트의 굽힘 현상에 의한 동적 편심을 가지고 있다. 외부에서 프레스 압력을 가해 샤프트에 0.3mm의 굽힘을 주었다.



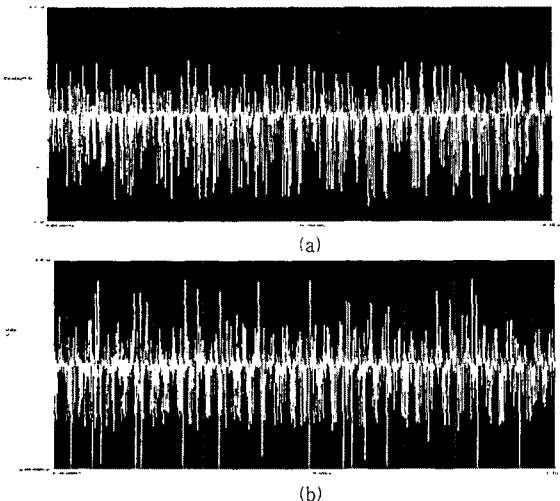
〈그림 2〉 써치코일 유기전압 (a)정상모델, (b)편심모델



〈그림 3〉 공극의 한 점에서의 자기력 (a)x 방향, (b)y 방향



〈그림 4〉 써치코일 유기전압 측정파형 (a)정상모델, (b)편심모델



〈그림 5〉 진동 측정파형 (a)정상모델, (b)편심모델

〈표 1〉 유도전동기 제원

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

회전자의 편심으로 인해 공극의 자속밀도는 비대칭 구조를 가지게 된다. 그림 2는 자속의 변화량을 써치코일을 이용해 역기전력 파형으로 검출하였다. 정상모델에서 최대 6[V]의 전압이 유기되지만, 편심모델에서는 최소 공극 시 -7[V], 최대 공극시 -5[V]의 전압이 유기됨을 볼 수 있다.

그림 3은 정격 정상상태일 때, 공극 중 한 점(52.9, 73.45)에서의 자기력을 나타내었다. 정상 모델에서는 회전자가 1주기 동안 x축 방향에서 최대 6 [kN/m], y축 방향에서 최대 10[kN/m]의 일정한 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 4는 실제 유도전동기의 정상모델과 편심모델의 써치코일에 유기된 전압을 나타내고 있다. 정상모델의 경우 최대 1.5[V]의 전압이 유기되지만, 편심모델에서는 -2[V]의 유기전압이 발생함을 볼 수 있다.

그림 5는 비대칭 자속밀도에 의해 생긴 불평등 기자력의 영향으로 편심모델이 정상모델보다 진동이 더 심화됨을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 3상 농형 유도전동기에 있어서 회전자의 동적 편심으로 인한 전자기적 현상 특성변화를 연구하였고, 이를 모의 고장 전동기 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 편심으로 인한 비대칭 공극 자속밀도는 써치 코일을 이용해 검출하였고, 비대칭 공극 자속밀도로 인해 불평등 기자력의 발생을 확인 할 수 있었다. 또한 불평등 기자력으로 인해 진동이 심화됨을 모의 고장 전동기의 실험을 통해 확인 하였다. 본 논문에서 제시한 연구 결과를 통하여 회전자 고장감시 알고리즘 개발의 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

본 논문은 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-271) 주관으로 수행된 연구결과임.

### 참고 문헌

- [1] 황돈하 외, "유도전동기의 회전자 진동에 따른 공극의 자속변화 해석", 2004 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부분회 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] 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.