

# 유도 전동기의 오프라인 편심 진단

현두수, 박종빈

고려대학교 일반대학원 전기전자전파공학과

## Off-line Monitoring of Airgap Eccentricity for Induction Machines

Doosoo Hyun, Jongbin Park

Graduate School of Electrical Engineering, Korea University

### ABSTRACT

유도 전동기의 편심 고장은 베어링 손상 등으로 발생되며, 심해질 경우 고정자와 회전자간의 접촉으로 전동기 파괴를 일으킨다. 이를 진단하는 대표적인 방법으로 온라인 전류 스펙트럼 분석법(Motor Current Signature Analysis, MCSA)이 있으나 전동기 정보의 필요, 부하에 영향을 받는 등의 문제점이 있다. 본 논문에서는 유도 전동기의 편심을 오프라인으로 진단하는 새로운 방법을 제안한다. 유도 전동기의 회전자의 위치를 변경하며 고정자 권선으로부터 관측된 임피던스 값으로 편심을 진단한다. 제안된 방법은 온라인 진단 후 정확한 편심 고장 여부를 확인하는데 사용될 수 있으며, 7.5마력 유도전동기의 정적, 동적, 복합 편심에 대한 실험을 통해 증명되었다.

### 1장 서론

편심은 전동기의 성능 및 신뢰성을 저해하기 때문에 전동기 제작업체는 이를 줄이기 위한 많은 노력을 해왔다. 하지만 제작과정상의 결함 등으로 인해 불가피하게 전동기에는 고유의 편심이 존재하며 이는 10%가 넘지 않도록 조정하고 있다<sup>[1]</sup>. 정적 편심은 타원형 고정자, 고정자와 회전자의 잘못된 결합 등으로 발생하여 한번 제작되면 이후 그 비율이 변하지 않는다<sup>[2]</sup>. 동적 편심은 휘어진 회전자, 베어링의 열화, 회전자의 비대칭적인 열적 팽창, 높은 비율의 정적 편심 등으로 인해 발생한다. 편심은 전동기의 불균일한 공극으로 인력이 한쪽 방향으로만 강하게 발생되어 불평형 상태(Unbalanced Magnetic Pull, UMP)를 일으킨다. 이는 진동 및 소음의 증가와 베어링의 손상 등으로 오래 방치할 경우 그림 1.(a)과 같이 고정자와 회전자의 접촉으로 코어 및 절연을 파괴시킨다<sup>[1-2]</sup>.

이를 온라인 상태에서 진단할 수 있는 MCSA(Motor Current Signature Analysis)는 고정자 권선의 전류를 주파수 분석하여 아래와 같이 저주파와 고주파의 고장 주파수 성분을 관측한다.

$$f_{ecc,LF} = f_s \pm kf_r = f_s \{1 \pm k(1-s)/p\} \quad (1)$$

$$f_{ecc,HF} = f_s \{(kR \pm n_d)(1-s)/p \pm v\} \quad (2)$$

식 (1)-(2)에서  $f_s$ 는 전원주파수,  $s$ 는 슬립,  $p$ 는 극수의 짝,  $R$ 은 회전자 슬롯 수,  $n_d$ 는 동적편심계수,  $v$ 는 전원주파수의 고조파 계수를 나타낸다. 하지만 이 기법은 긴 시간동안 정상 상태의 전류를 측정하여야하고, 부하의 변동에 영향을 받는다.

특히, 식 (1)은 복합편심 진단이 가능하나 정적 및 동적편심의 경우 진단이 불가능하며, 식 (2)는 특정한 극수-회전자 슬롯수의 관계에서만 진단이 가능하다<sup>[3]</sup>.

따라서 전원 및 부하의 영향을 받지 않고 온라인 진단 이후에 명확한 편심 고장의 판단을 위하여 새로운 진단 기법이 필요하다. 본 논문에서는 회전자 위치에 따른 임피던스 값을 이용하여 정지한 전동기의 편심 고장을 진단하는 방법이 제안된다.

### 2장 이론적 해석과 실험

#### 2.1 제안하는 방법

제안하는 방법의 기본 개념은 정지된 전동기의 고정자 권선 A상과 B-C상간의 임피던스 값을 회전자를 회전하며 측정하는 것이다. 이 때의 B-C상은 단락시킨다. 정지된 전동기의 등가회로는 그림 1.(b)와 같으며, 측정할 입력 임피던스는 식 (3)과 같다.

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \approx (R_s + R_r) + j(X_{ls} + X_{lr}) \quad (3)$$

이 때의 저항  $R_s, R_r$ 은 공극에는 무관하며, 누설 인덕턴스  $X_{ls}, X_{lr}$ 은 공극의 역함수와 비례한다<sup>[4]</sup>. 따라서 측정할 리액턴스  $X_{eq}$ 은 공극의 영향을 받아 정상 경우와 상이한 결과값을 보여주므로 편심 고장을 진단할 수 있다.

#### 2.2 공극의 해석적 표현 및 예측 결과

정적, 동적, 복합편심이 존재할 때의 공극  $g$ 을 공간적인 고정자의 각  $\theta$  및 회전자의 위치  $\phi$ 에 따라 수학적으로 표현하면 각각 식(4)-(6)과 같다.

$$g_s(\theta) = g_0(1 - a_s \cos \theta) \quad (4)$$

$$g_d(\theta, \phi) = g_0 \{1 - a_d \cos(\theta - \phi)\} \quad (5)$$

$$g_m(\theta, \phi) = g_0 \{1 - a_s \cos \theta - a_d \cos(\theta - \phi)\} \quad (6)$$

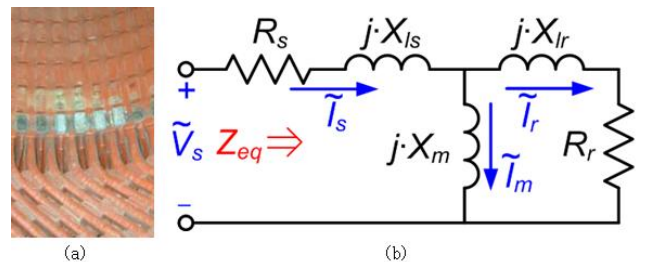


그림 1. (a) 고정자-회전자 접촉 (b) 정지된 전동기의 등가회로  
Fig. 1 (a) Stator-rotor contact (b) equivalent circuit at standstill

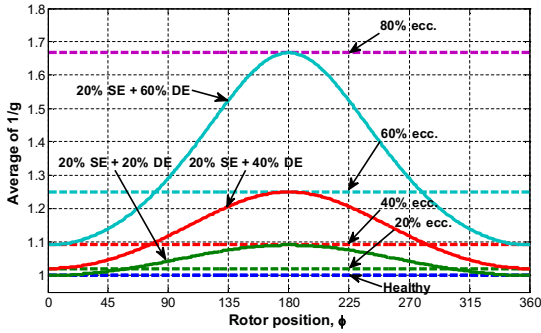


그림 2. 정적, 동적, 복합편심에 따른 공극의 역함수의 평균값  
Fig. 2 Average of  $1/g$  for static, dynamic, mixed eccentricity

수식 (4)-(6)에서  $g_0$ 는 정상전동기의 공극,  $a_s$ ,  $a_d$ 는 각각 정적, 동적편심의 정도를 나타낸다( $0 \leq a_s, a_d < 1$ ).

그림 2는 공극의 역함수  $g^{-1}$ 의 평균값과 편심의 정도를 나타낸 것이다. 이는 편심이 증가할수록  $g^{-1}$ 의 평균값이 증가하며, 정적 및 동적편심이 홀로 존재할 때에는 회전자 위치를 변화시켜도 공극의 역함수  $g^{-1}$ 의 평균값은 변화하지 않는다. 하지만 20% 정적편심과 20-40% 동적편심이 같이 있는 복합편심은 회전자 위치를 따라 전동기 전체의 편심의 정도가 바뀌게 되어  $g^{-1}$ 의 평균값이 변화한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 방법으로  $X_{eq}$ 를 측정하면 그림 2와 같을 것으로 예상된다.

### 2.3 실험과정 및 결과

제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 4극, 380V, 7.5마력의 유도 전동기와 측정을 위한 LCR미터를 사용하였다. LCR미터의 입력은 1V의 전압과 100Hz의 주파수로 인가하였으며 회전자를 기계적으로 5°간격으로 회전시켰다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 전동기의 A상과 B-C상의 입력 임피던스를 측정하였다.

실험은 유도 전동기를 표 1과 같은 편심 조건의 경우에 이루어졌으며 그 결과는 그림 3-4와 같다. 그림 3은 표 1의 경우 6-8을 나타낸 것으로 알기 쉽게 경우 1-5와 같이 표현되었고, 그림 4에서도 경우 9-10 조건의 결과를 나타내었다. 이것은 명백하게 편심이 증가하면  $X_{eq}$ 값이 증가하여 고장 여부를 확인할 수 있으며, 2.2절에서 예상했던 바와 같이 동적편심만이 존재할 경우에 회전자 위치가 변화하여도  $X_{eq}$ 값은 일정한 반면, 복합편심의 경우에는 회전자 위치를 따라 그 값이 달라짐을 알 수 있다.

표 1 유도 전동기 편심 실험 조건  
Table 1 Experimental conditions for eccentricity

경우(case)	정적(static)	동적(dynamic)	편심종류
1	0	0	정상
2	0	20	동적편심
3	0	40	동적편심
4	0	60	동적편심
5	0	80	동적편심
6	20	20	복합편심
7	20	40	복합편심
8	20	60	복합편심
9	40	20	복합편심
10	40	40	복합편심

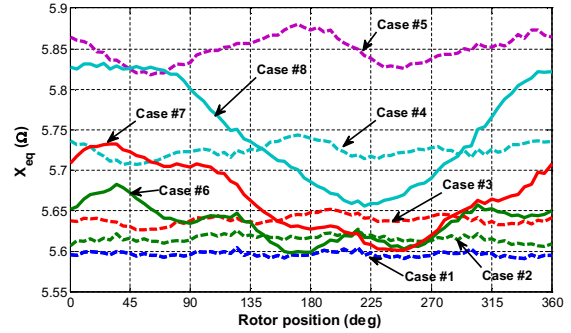


그림 3. 동적 및 복합편심에 따른 측정된  $X_{eq}$  값 (20% 정적편심)  
Fig. 3 Values of  $X_{eq}$  for dynamic, mixed eccentricity (20% static)

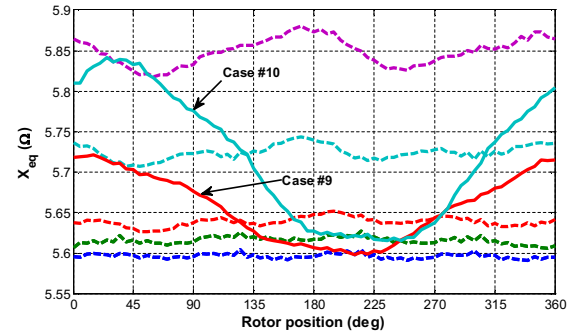


그림 4. 동적 및 복합편심에 따른 측정된  $X_{eq}$  값 (40% 정적편심)  
Fig. 4 Values of  $X_{eq}$  for dynamic, mixed eccentricity (40% static)

### 3장 결론

본 논문에서 유도 전동기의 편심을 오프라인으로 진단할 수 있는 방법이 제안되었다. 이 기법은 전동기 편심의 상태를 알 수 있을 뿐만 아니라 정적, 동적, 복합편심의 구분이 가능하다. 또한 정지시험으로 부하나 전원의 영향을 받지 않는다. 특히 온라인 진단 이후 수리를 위한 분해 전에 사용되면 명확한 편심 고장 진단을 할 수 있다. 또한 저전력을 사용하기 때문에 간단한 오프라인 시험 장비로도 개발이 가능하여 효용가치가 매우 높을 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] W.T. Thomson, and A. Barbour, "On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three phase induction motors", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 13, no. 4, pp. 347-357, Dec., 1998.
- [2] J.R. Cameron, W.T. Thomson, and A.B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors", *Proc. of IEE-Pt. B*, vol. 133, no. 3, pp. 155-163, May 1986.
- [3] S. Nandi, S. Ahmed, and H.A. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 16, no. 3, pp.253-260, Sept. 2001.
- [4] P. Cochran, *Polyphase induction motors*, Marcel Dekker, New York, NY 1989.