

2 MW급 경사 회전자 슬롯을 갖는 유도전동기의 특성해석

이병준, 김미정, 조원영, 조운현  
 동아대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of 2 [MW] class Induction Motor with Slanted Rotor Slots

Byung-Jun Lee, Mi-Jung Kim, Won-Young Cho, Yun-Hyun Cho  
 Electrical engineering, Dong-a University

**Abstract** - It is well known that the characteristics of the induction machine depend on a great degree on the leakage reactance. And the leakage reactance is different according to a level of slant. So in this paper, we calculated the inductance per coil side. And the torque and speed characteristics are analyzed using a method base on the two-dimensional (2-D) finite element method (FEM) and on the circuits theory to model the rotor bar in a induction machine. The variable values of bar angle of slant are considered.

1. 서 론

유도전동기는 전자기적 유도 현상을 이용하여 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 시스템으로, 우리나라의 최근 총 전력 소비량 중에서 전동기류가 전체 소비량 중에서 60% 차지하고 있다. 전동기류 중에서도 약 80%가 유도전동기에서 소비되고 있으며, 그 중 산업용 3상 유도전동기가 소비하는 전력은 총 소비전력량 중 38%를 점하고 있어 단일 전력 소비 품목으로는 가장 크다.

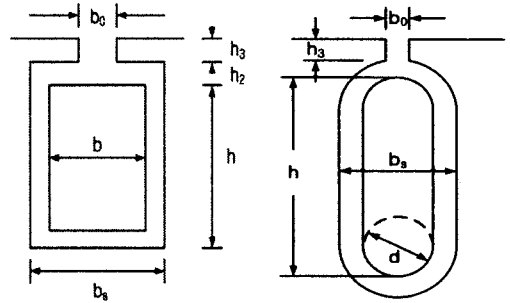
최근 전 세계적으로 시스템의 고 효율화가 진행됨에 따라 전동기의 손실을 줄이고 효율을 높일 수 있는 최적 설계 기술이 요구된다. 최적 설계는 크게 제어기와 전동기 구조 및 형상 부분으로 나눌 수 있으며, 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 전동기의 고정자 슬롯 및 회전자 바 형상에 대한 최적설계 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 시간 고조파 손실을 고려한 슬롯 형상이나 전체 슬롯 형상에 적용할 수 있는 정확하고 신속한 해석법과 최적화 설계 방법에 대한 연구가 절실하게 요구되나 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 유도전동기의 성능 향상을 위하여 6,600[V], 1,865[kW], 2극, 3,590[rpm]의 정격을 가지고 있는 농형 유도전동기의 회전자 바 비틀림 각도에 따른 전자기적 특성을 2차원 유한요소 해석하였고, 이를 통해 전동기의 전부하 특성 및 기동 특성 해석, 토크 및 출력 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 회전자 바 비틀림 각에 따른 특성

일반적으로 유도전동기는 누설 리액턴스의 값에 따라 특성이 달리 나타난다는 것은 잘 알려져 있다. 그러므로 슬롯당 누설리액턴스의 값을 구하여 전체 회전자에 대한 누설리액턴스 값을 구하는 일은 중요하다. 본 논문에서는 대표적인 두 가지 형상의 슬롯에 대해 누설리액턴스를 계산하여보고 최종적으로 비틀림 각을 가지는 슬롯에 대하여 누설리액턴스를 구해보았다.



(a) 사각형 (b) 원형  
 그림 1. 회전자 바의 대표적인 두 가지 형상

그림1 (a)형상의 회전자바의 경우에 회전자 바의 누설 인덕턴스는 식(1)로 구할 수 있다.

$$L = \mu l_c \lambda_B \tag{1}$$

$$\lambda_B = \frac{h}{3b_s} K_f + \frac{h_2}{b_s} + \frac{h_3}{b_0} + \lambda_0 \tag{2}$$

여기서,  $\lambda_0$ 가 프렌징 영향 때문에  $b_s/b_0 = 1, 2, 3$ 일 때 대응하는 각각의  $\lambda_0 = 0, 0.12, 0.23$ 가 되고  $K_f$ 는 deep bar effect,  $l_c$ 는 바의 축방향 길이 이다. 다음으로 (b)원형 형상의 경우에  $\lambda_B$ 는 식(3)과 같다.

$$\lambda_B = \left( \frac{H-d}{3b_s} + 0.66 \right) K_f + \frac{h_4}{b_0} \tag{3}$$

이제 비틀림 각  $\theta$ 를 고려하여 보면

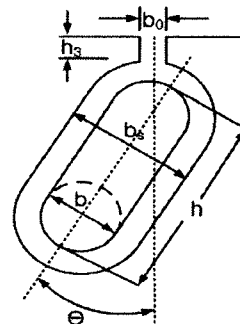


그림 2. 비틀림 각  $\theta$ 를 가지는 회전자 바의 형상

여기서  $\lambda_B$ 은 원형 형상과 같으나  $K_f$ 의 값은 비틀림 각  $\theta$ 를 고려한 식(4)와 같다.

$$K_f = \frac{3}{2\xi} \left( \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \right) \quad (4)$$

$$\theta(\xi) = \xi \left( \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \right) \quad (5)$$

$$\xi = ah \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\pi f \mu n a}{\rho b}} \quad (7)$$

여기서  $f$ 는 회전자 주파수[Hz],  $\rho$ 는 고유저항,  $a$ 는 도체의 지름[m],  $b$ 는 슬롯 단면의 너비[m] 그리고  $n$ 은 도체 턴 수이다.

## 2.2 FEM에 의한 해석

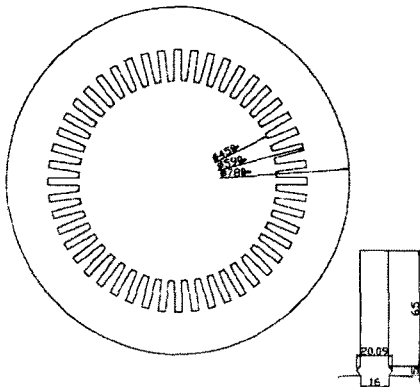
유한요소 해석에 사용되는 자계 방적식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

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

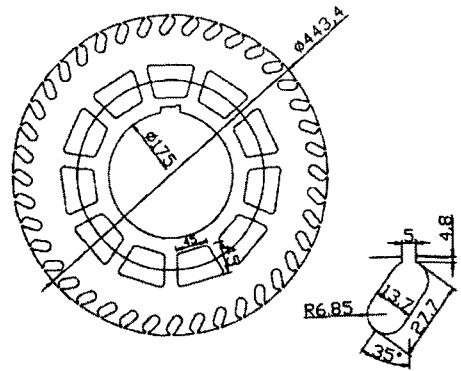
여기서,  $A_z$ 는 z축 방향 자기 벡터 포텐셜,  $J_{ext}$ 는 입력전류 밀도,  $\vec{v}$ 는 회전자 속도,  $\phi$ 는 전기 스칼라 포텐셜,  $\sigma$ 는 회전자 바의 전도율을 나타낸다.

## 2.3 비틀림 각을 가지는 회전자 바의 설계

전동기의 설계방법은 주요치수와 장하비의 관계를 이용한 체적법과 미증가 비례법에 의한 장하분배법이 널리 이용되고 있다. 체적법은 전기 및 장하비와 출력계수를 이용하는 방법이며 장하분배법은 미증가 비례법을 이용한 장하분배 계수를 사용한 방법이다. 이 두 방법 모두 각기 장단점을 지니고 있으며 설계자의 선호에 따라 선택되어지고 있다. 본 연구에서는 전동기 설계에 기초가 된 장하분배법을 이용하여 유도전동기를 설계한다. 그림 3.2는 장하 분배법에 의한 유도전동기의 치수 설계 도면을 보여준다.



(a)고정자



(b)회전자 (뒤틀림 35[deg])

그림 3. 고압 유도 전동기 치수 설계

## 2.4 고압 유도전동기 해석 모델의 구조 및 사양

본 논문에서 해석 모델인 유도전동기 구조는 그림 4와 같이 35[deg]의 비틀림 각을 가진 회전자 바로 구성된 회전자와 48개의 슬롯을 가지는 고정자로 이루어져 있다. 주요 사양은 표 1에 나타내었다. 2[MW]급의 대용량 전동기인 관계로 극수를 2극으로 줄이고, 속도를 높이는 방식을 택하였는데, 이로 인한 회전자의 진동 현상이 예상 된다. 따라서 정상상태와 과도상태 시 발생하는 전자력을 이용한 회전자의 진동, 모드 해석을 통한 문제점 발견 및 수정 보완 작업이 필요할 것으로 판단된다.

| Item      | Value     | Item   | Value           |
|-----------|-----------|--------|-----------------|
| Pole      | 2         | Stator | Outer 780[mm]   |
| Power     | 1865[kW]  |        | Inner 450[mm]   |
| Voltage   | 6600[V]   |        | Slot 48         |
| Frequency | 60[Hz]    | Rotor  | Outer 443.4[mm] |
| Speed     | 3590[rpm] |        | Inner 175[mm]   |
| Air-gap   | 3.3[mm]   |        | Slot 40         |

표 1. 고압 유도 전동기 사양

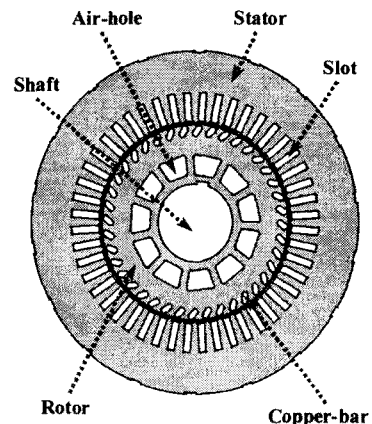
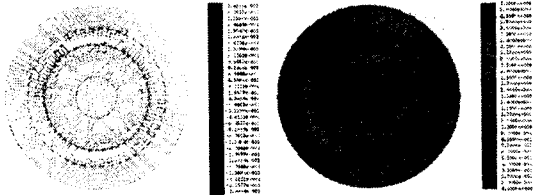
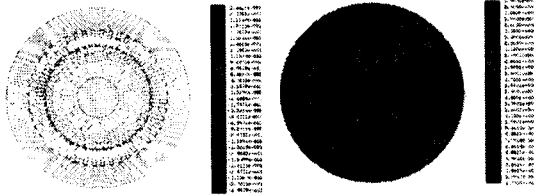


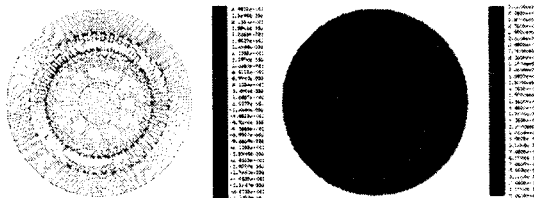
그림 4. 고압 유도전동기 구조 및 형상



(a)회전자 바 비틀림 0[deg]



(b)회전자 바 비틀림 17.5[deg]



(c)회전자 바 비틀림 35[deg]

그림 5. 전부하시의 자속선도 및 자속 밀도 분포

그림 5는 회전자 바 뒤틀림에 따른 유도전동기의 전부하시의 자속선도 및 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 본 연구의 대상 전동기는 대용량 전동기이므로, 회전자 바의 뒤틀림 각도에 따라 기동시의 토크 및 속도의 리플 현상을 고찰하기 위하여 먼저 자속 밀도 분포를 알아보았다.

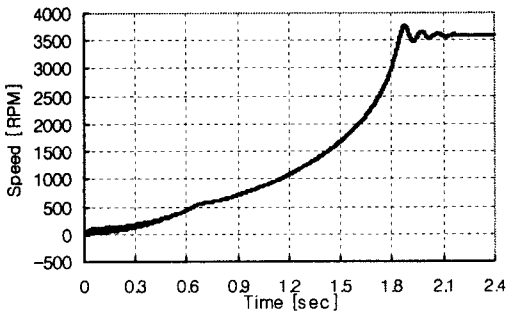


그림 6. 전부하(5000Nm)시 기동 속도 특성

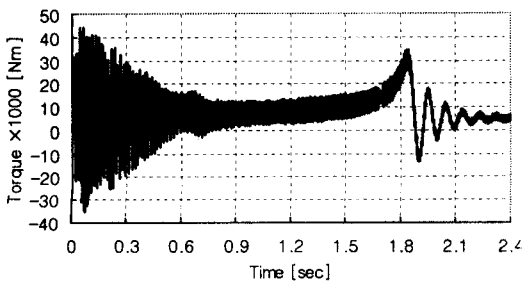


그림 7. 전부하(5000Nm)시 기동 토크 특성

그림 6과 그림 7은 각각 전부하(5000Nm)시의 기동 속도 및 기동 토크 특성을 나타낸다. 정격 운행 속도까지 걸리는 시간은 약 2.1[sec]정도이며, 정격 토크를 발생하는 데 걸리는 시간도 역시 2.1[sec]정도이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석법을 이용하여 6,600 [V], 1.865 [kW], 2P, 3,590[rpm]의 정격을 갖는 대용량 유도전동기의 회전자 바 비틀림에 따른 전자계 현상을 해석하였다. 회전자바의 비틀림 각에 따른 자속 분포도를 통해 속도 및 토크 리플현상을 예상할 수 있었으며, 회전자 바 비틀림 각도가 35[deg] 일 때의 기동 토크 및 기동 속도 특성을 고찰하였다. 이후 회전자 바의 뒤틀림 각도의 다양한 변화와 함께 그 변화에 따른 기동 속도 및 기동 토크 특성을 파악하고, 이를 이용한 회전자 진동 저감에 관한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] IEEE std 1434-2000, IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.