

## Comparison of Torque-Speed Curve according to the Changes in Cross-Sectional Area and Shape of Squirrel Cage Rotor of Induction Motor

Jin Seok Lee, Ha Jeong Lee, and Gwan Soo Park\*

Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received 5 February 2016, Received in final form 21 April 2016, Accepted 22 April 2016)

Recently, cost of rare-earth magnets has been raised, because rare-earth magnets are monopolized and the export is also regulated in China. For this reason, the induction motor is operated without the rare-earth magnets. The efficient development of induction motor is more important for economical scheme. A torque of the induction motor is computed and the correlation between dimension and resistance of the squirrel cage rotor is investigated. Also, the correlation between leakage reactance and torque was analyzed with respect to the same dimension of rotor with different shapes. Therefore, this paper proposes the method of improvement for squirrel cage rotor.

**Keywords** : rotor, squirrel cage induction motor, cross-sectional area of squirrel cage rotor, shape of squirrel cage rotor, resistance, leakage reactance

## 농형 유도전동기의 회전자 형상과 단면적 변화에 따른 토크-스피드 곡선 비교

이진석 · 이하정 · 박관수\*

부산대학교 전기공학과, 부산시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241

(2016년 2월 5일 받음, 2016년 4월 21일 최종수정본 받음, 2016년 4월 22일 게재확정)

최근 중국의 희토류 자석 생산 독점과 수출 규제에 의해 희토류 자석의 가격이 급등하였다. 이러한 경제적인 문제로 인해, 희토류 자석을 사용하지 않는 유도전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 논문에서는 유도전동기의 토크를 계산하고, 농형 유도전동기의 회전자 단면적과 저항에 관한 상관관계를 연구하였다. 또한, 회전자의 단면적이 같고 형상이 다를 경우, 회전자의 누설 리액턴스와 토크의 상관관계에 대해 분석하여 농형 유도전동기를 개선하고자 하였다.

**주제어** : 회전자, 농형 유도전동기, 회전자의 단면적, 회전자의 형상, 회전자의 저항, 누설 리액턴스

### I. 서 론

최근 중국의 희토류 자석 독점과 수출 규제의 영향으로 희토류 자석의 가격이 상승하였다. 이에 따라 유도기의 효율과 특성을 개선하는 연구가 다시 이루어지고 있는 추세이다[1, 2]. 본 논문에서는 유도전동기의 토크를 유도하고 회전자의 단면적과 회전자의 저항에 대한 상관관계를 파악하였다. 또한 회전자의 단면적이 토크에 미치는 영향을 파악하였고, 단면적은 같고 형상이 다른 회전자에서 토크와 회전자의 누설 리액턴스의 관계를 파악하여 토크에 미치는 영향을 분석하였다.

### II. 본 론

#### 1. 유도전동기의 토크식 유도

유도전동기의 토크는 슬립에 따라 그 값이 변하게 되는데 이는 토크-스피드 곡선으로 나타낼 수 있다. 이 곡선으로 유도전동기가 기동시나 정격에서 어떠한 특성을 가지는지 알 수 있다. 토크-스피드 곡선을 그리기 위해서는 먼저 1차측 고정자의 저항을 계산해야 한다. 고정자의 저항은 대부분 권선의 저항이기 때문에 권선의 길이와 면적, 비저항을 이용하여 계산한다. 구리의 비저항을  $\rho_{cu}$ , 고정자 권선의 턴 수를  $N_{ph}$ , 권선의 길이를  $l$ 이라고 할 때, 고정자의 저항은  $R_1$ 으로 나타낼 수 있다. 그리고 권선의 총 길이  $l$ 은 고정자 적층 길이  $l_s$ , 극 간격  $\tau$ 로 나타낼 수 있다. Fig. 1은 각 파라미터들을

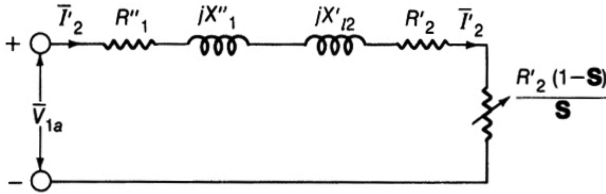


Fig. 1. Equivalent circuit of induction motor.

포함하는 유도전동기의 등가회로를 나타낸 것이다.

$$R_1 = \rho_{cu} \times \frac{N_{ph} l}{A} \quad (1)$$

$$l = l_i + 1.5 \times \tau \quad (2)$$

유도전동기 등가회로의 파라미터인 고정자 저항  $R_1$ , 회전자 저항  $R_2$ , 1차측 누설 리액턴스  $X_{l1}$ , 2차측 누설 리액턴스  $X_{l2}$  를 구하여 토크와 전류를 계산하였다.

$$R_2 = \rho_{Al} \times \left\{ \frac{L}{A} K_r + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2\left(\frac{\pi p}{N_r}\right)} \right\} \quad (3)$$

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{rotor} - h_{er})}{N_r} \quad (4)$$

위 식에서  $\rho_{Al}$ 은 알루미늄의 비저항,  $L$ 은 회전자 도봉의 길이,  $A$ 은 회전자 도봉의 단면적,  $K_r$ 은 회전자 슬롯의 포피계수,  $l_{er}$ 은 농형바의 길이,  $A_{er}$ 은 엔드링 단면적,  $p$ 는 극 수,  $N_r$ 은 회전자 슬롯 수,  $D_{rotor}$ 는 고정자의 외경,  $h_{er}$ 은 엔드링의 높이이다.

고정자 누설 리액턴스는 슬롯의 권선에 쇄교하는 누설자속과 end connection에서 발생하게 되며 이를 고려하여 1차측 누설 리액턴스  $X_{l1}$ , 2차측 누설 리액턴스  $X_{l2}$  그리고 토크와 전류를 나타낼 수 있다[3].

$$X_{l1} = 2\mu_0 \omega_1 \lambda L \frac{N_p^2}{pq} \quad (5)$$

$$X_{l2} = 2\pi f_1 \mu_0 \lambda L \quad (6)$$

$$T = \frac{m}{\omega_s} \times V_1^2 \times \frac{(R_2/s)}{[R_1 + (R_2/s)]^2 + (X_{l1} + X_{l2})^2} \quad (7)$$

$$I = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_{l1} + X_{l2})^2}} \quad (8)$$

위 식에서  $\mu_0$ 는 진공의 투자율,  $\omega_1$ 은 1차측 각 주파수,  $\lambda$ 는 쇄교지속,  $q$ 는 매 극 매 상 slot 수,  $f_1$ 은 1차측 주파수,  $m$ 은 상 수,  $\omega_s$ 는 고정자 각 주파수,  $V_1$ 은 1차측 전압을 의미한다.

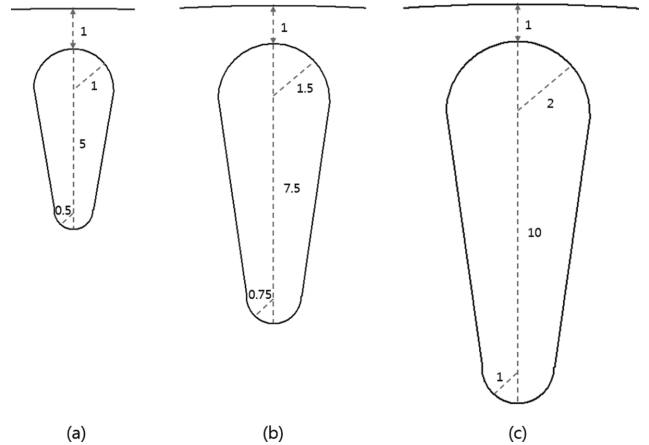


Fig. 2. Three Squirrel cage rotors that have different dimensions.

### 2. 회전자 단면적에 따른 토크-스피드 곡선 비교

식(7)에 의하면 정격속도에서의 토크는 회전자 저항에 비례함을 알 수 있다. 회전자 저항이 크면 정격속도에서 효율이 나빠지고 기동토크는 증가한다. 반대로 회전자 저항이 작아지면 정격속도에서의 효율은 좋아지고 기동토크가 감소하게 된다[4]. 이를 이용하면 회전자 단면적을 조절함으로써 토크와 효율을 개선할 수 있다. Fig. 2에 회전자의 형상은 같고 크기가 다른 세 가지 회전을 나타내고 각 회전자에서의 토크-스피드 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 토크-스피드 곡선은 등가회로 방법으로 계산하였다.

각 회전자 전체 길이는 5 mm, 7.5 mm, 10 mm이고 비율은 2 : 3 : 4이다. 이 때 회전자 길이는 회전자의 가장 윗부분부터 아랫부분까지를 뜻한다. 이에 따라 회전자의 단면적은 7.213 mm<sup>2</sup>, 16.230 mm<sup>2</sup>, 28.854 mm<sup>2</sup>이고 비는 4 : 9 : 16이다. 각 회전자의 최대토크가 나타나는 슬립은 각각 0.46, 0.23, 0.14이고, 각 회전자의 최대토크 크기는 10.0316, 10.0444,

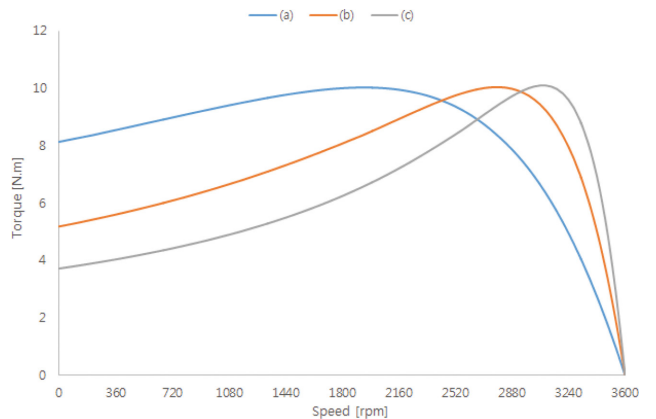


Fig. 3. (Color online) Torque-Speed curve of three induction motors that have different dimensions of rotors.

10.1023 N·m이다. 회전자의 저항은 유도전동기의 토크특성을 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 따라서 회전자 저항을 일정한 값으로 유지하기 위해 회전자의 단면적을 고정하여 형상 설계를 하였다.

**3. 회전자 형상에 따른 토크-스피드 곡선 비교**

Fig. 4에는 단면적이 같고 형상이 다른 세 가지 회전자를 나타내었다. Fig. 5에는 각 회전자에서 토크-스피드 곡선을 나타내었다. 토크-스피드 곡선은 등가회로 방법으로 계산하였다.

각 회전자의 단면적은 40.854 mm<sup>2</sup>로 동일하게 하였다. 유도전동기의 토크식은 식(7)이고, 여기서 회전자 누설 리액턴스는 식(6)이다. 식(6)에서 쇄교자속 λ의 값은 회전자의 길이

와 회전자의 너비의 비에 의해 결정된다. 따라서 회전자의 단면적을 일정하게 유지하더라도 최대토크와 최대토크가 나타나는 슬립이 서로 다른 것을 알 수 있다. 회전자의 형상에 따라 기동토크의 분포를 정확히 파악하기 위해서는 유도전동기의 end connection을 조정하여 최대토크와 최대토크가 나타나는 슬립을 일정하게 맞춰줄 필요가 있다.

**III. 결 론**

본 논문에서는 회전자의 단면적과 형상을 달리하여 유도전동기의 토크-스피드 곡선을 분석하였다. 회전자의 단면적이 커지면 회전자의 저항이 작아지고 이는 정격속도에서 효율을 좋아지게 한다. 하지만 회전자의 단면적이 커지면 기동토크가 작아지게 되는 단점도 발생한다. 이에 따라 효율을 유지하면서 기동토크를 향상시키기 위해 회전자의 단면적을 고정하고 형상을 다르게 하여 토크-스피드 곡선을 분석하였다. 회전자 표면의 너비를 좁게 하면 기동토크가 커지는 것을 확인할 수 있으나, 회전자의 단면적이 같더라도 회전자의 길이와 너비의 비에 따라 회전자의 누설 리액턴스가 달라지게 되고 최대토크의 크기와 최대토크가 나타나는 슬립이 변하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 정확하게 회전자의 형상에만 의존하여 기동토크의 차이를 분석하기 위해서는 최대토크와 최대토크가 나타나는 슬립을 일정하게 고정한 후 해석을 진행해야 할 것이다.

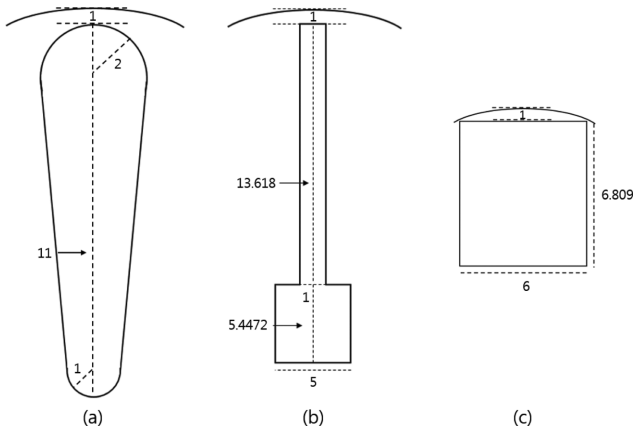


Fig. 4. Three Squirrel cage rotors that have different shapes.

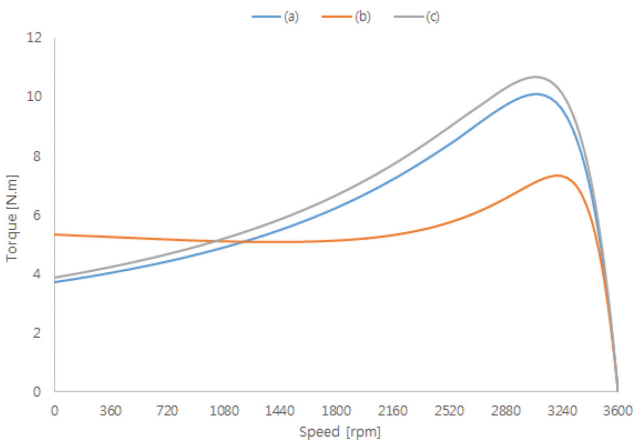


Fig. 5. (Color online) Torque-Speed curve of three induction motors that have different shapes of rotors.

**감사의 글**

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

**References**

[1] OECD, OECD Factbook Economic, Environmental and Social Statistics, 110 (2014).  
 [2] B. Y. Kim and J. H. Oh, KIEP 21 (2011).  
 [3] Jean-Francois Trigeol, Yves Bertin and Patrik Lagonotte, IEEE Industrial Electronics, 4829 (2006).  
 [4] Kan Akatsu and Atsuo Kawamura, IEEE Trans. Power Electron. 15, 553 (2000).