

토크리플을 줄이기 위한 외전형 유도전동기의 회전자 슬롯형상의 최적화

김경수, 차현록, 윤철호, 정태욱, 이규석  
전남대학교 전기공학과, 한국생산기술연구원

The Optimization Design of Rotor Slot shape In Outer-Rotor Type Induction Motor  
Reducing Torque-ripple

Kyung Su Kim, Hyun Rok Cha, Cheol Ho Yun, Tae Uk Jung  
Depts. Electrical Eng. Chonnam National University, Korea Institute of Industrial Technology

**Abstract** - 외전형 유도전동기 모터는 내전형에 비해 소형화 및 경량화 시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 회전자와 고정자간의 공극사이에 이심률이 있을 때, 불균형 모멘트로 인한 토크 리플이 내전형보다 더 크게 일어나는 단점이 있다. 이러한 토크리플은 모터의 정속적인 운전을 방해시킬 뿐만 아니라 불규칙한 출력토크로 인한 작동상의 오류를 초래한다. 본 논문에서는 외전형 모터에서 이심률에 따른 불균형력이 최소화 될 수 있는 슬롯 형태에 대해서 연구하기 위해, 전폐형, 반폐형, 개구형태의 3가지 슬롯 형태에 대한 특성을 비교 하였다. 개구형의 경우 슬롯 누설 리액턴스가 낮아져 토크 형성율이 매우 높아 높은 토크를 발생시킬 것을 예상 하였지만, 토크 리플에 따른 출력 감소로 오히려 출력토크가 감소할 뿐만 아니라 이심률 증가에 따른 불균형력 또한 매우 컸다. 이에 비해 전폐형태의 슬롯은 누설리액턴스의 영향으로 토크 형성 자체는 10% 정도 저감 되었으나, 이심률 증가에 따른 불균형력이 가장 적어 외전형 모터에 가장 적합한 형태임을 알 수 있었다.

터의 조립과정에서 나타나는 현상 중에 하나이며 보통 공정 중 나타나는 이심률은 5-10% 이내이다[1]. 하지만 조립과정 중에 문제가 있거나, 조립과정을 수행하는 기계의 정밀도가 떨어진다면 최대 40%까지 이심률이 나타날 수 있다[2]. 또한 베어링 조립, 회전자 또는 고정자의 동작이나 모터 동작 시 발생하는 열팽창 또한 공극사이의 이심률 증가에 영향을 미친다. 제조공정 상 만들어지는 정적인 이심률의 증가는 불균형 모멘트와 불균형 자속밀도를 만들어 동적인 이심률 또한 증가시켜서, 토크-리플 및 소음을 유발할 뿐만 아니라, 심할 경우 모터의 고장을 초래하기도 한다[3]. 이심률에 대한 이해를 돕기 위해 그림 1. 과 같은 이심률이 공극사이에 존재한다고 가정하였다[4]. 그림2. 에서 고정자와 회전자 사이에 수평방향으로 존재하는 이심률을  $\delta_g$ 로 표기하였다. 이심률이 존재하지 않을 때의 공극 반경을  $g_0$ 라 하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$g(\phi) = g_0 - \delta_g \cos\phi \quad (1)$$

1. 서 론

현재 유도 전동기 모터는 간단한 구조성과 신뢰할 수 있는 성능을 제공하기 때문에 많은 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 그 중 외전형 모터는 내전형 모터에 비해 회전하는 회전자부분이 외부에 존재하는 특징을 가지고 있어서, 적은 토크에도 많은 출력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 모터의 크기를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 이러한 외전형 모터는 그 장점을 활용하기 위해 팬형 모터나 환풍기용 모터로 주로 사용된다.

그러나 외전형 모터는 내전형 모터에 비해 회전자의 직경이 더 커지기 때문에, 모터 조립 과정 중 공극사이에 회전자와 고정자 간의 이심률이 존재할 때 더 많은 불균형 모멘트를 가지게 된다. 이러한 불균형 모멘트는 모터에 토크-리플을 발생시켜 모터의 정속적인 운전을 방해할 뿐만 아니라 불규칙적인 출력토크로 인해 나타나는 모터의 진동 및 소음을 가져온다.

외전형 모터에서 이러한 문제를 줄이기 위해선, 설계의 변경이 어려운 고정자 보다 변경이 쉬운 회전자 부분을 재설계하는 방법이 있다. 우리는 회전자설계의 여러 가지 방법 중에서 이심률이 존재 시 발생하는 토크 리플을 최소화 할 수 있는 최적화된 회전자 슬롯 형상을 찾아보았다

2. 본 론

2.1 외전형 모터의 이심률과 불균형 모멘트

2.1.1 이심률

이심률이란 고정자와 회전자의 조립과정에서 나타나는 문제로, 고정자와 회전자 간에 동심도가 맞지 않을 때, 이 둘 사이의 동심도가 얼마나 차이가 나는 지를 공극의 전체면적의 비로 나타낸 값이다. 이러한 이심률은 모터의 정지 시에 존재하는 정적인 이심률과 회전자의 회전 시에 나타나는 동적인 이심률로 구분할 수 있다. 이심률은 제조공정 중 모터와 스테이

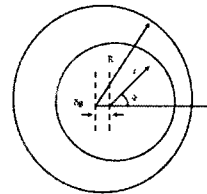


그림 1. 공극에 이심률이 존재할 때

2.1.2 불균형 모멘트

불균형 모멘트는 모터의 회전축이 고정 축과 정확히 일치하지 않을 때, 즉 이심률이 존재할 때 나타나는 현상이다. 이러한 현상은 이심률이 존재할 때 더 크게 나타나게 되며 이와 같은 현상은 힘의 오른손 법칙을 따른다.[4]

이심률  $\epsilon$ 에 의해 발생하는 불균형 힘은(Fu)

$$F_u = m\epsilon\Omega^2 = U\Omega^2 \quad (2)$$

(여기서 m = 회전자의 질량,  $\epsilon$  = 이심률,  $\Omega$ =각속도이다.)

로 나타낼 수 있다. 또한 힘의 오른손 법칙에 의한 원심력(Mu)은

$$M_u = (R_d - R_p)\tau\Omega^2 = U_M\Omega^2 \quad (3)$$

(여기서  $R_d$  = 회전자의 반경,  $R_p$  = 회전자 높이,  $\tau$ =각속도 편위량  $U_M$ =불균형 모멘트 이다.)

으로 나타낼 수 있다.

외전형 모터는 회전자의 반경이 내전형에 비해 더 크기 때

문에 공극에 이심률이 존재시 더 많은 불균형 모멘트가 발생하게 된다. 이러한 특징은 곧 내전형 모터에 비해 외전형 모터가 공극에 이심률에 따른 영향이 더 크다는 사실을 보여준다.

## 2.2 회전자 슬롯 형상 변화를 통한 이심률의 증가에 따른 토크 리플 및 출력 토크 비교

### 2.2.1 회전자 슬롯 형상

우리는 이심률의 증가에 따른 모터의 출력 토크 및 토크 리플을 최대한 줄일 수 있는 회전자 슬롯 형상을 찾기 위해 유한요소법을 사용한 시뮬레이션을 통한 그 값을 비교 분석하기로 하였다. 그림 2는 기존의 반폐형(Semi-Closed) 슬롯 형태를 가지는 외전형 모터의 로터부분을 나타낸 그림이다. 기존의 반폐형 슬롯을 가지는 모터를 기준으로 슬롯 형태를 전폐형(Totally Closed) 및 개방형(Totally Open)으로 변경하였을 때 나타나는 출력 토크 및 토크 리플을 비교 분석할 뿐만 아니라 이심률이 클 때 가장 적합한 슬롯 형태를 찾기로 하였다. 각 슬롯의 면적은 일치시켰고, 바의 재질에 따라 모터의 특성이 달라질 수 있기 때문에 재질을 알루미늄으로 하였다. 시뮬레이션 할 때 이심률은 0%부터 40%까지 각 10%씩 증가시키며 토크 리플 및 출력 토크를 비교하였다. 시뮬레이션 한 모터는 다음과 같은 특징을 따랐다: 커패시터 기동형 단상 유도 전동기, 입력전압 230V, 주파수 60Hz, 4극, 1700rpm으로 회전, 입력전류 0.51A, 고정자 슬롯갯수 16개, 회전자 슬롯갯수 22개.

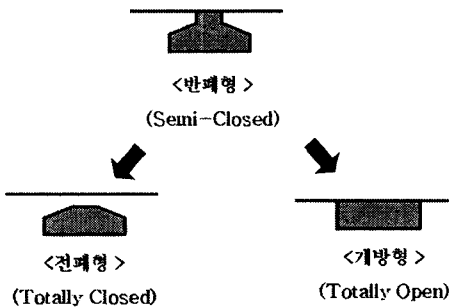


그림 2. 회전자 슬롯 변경

### 2.2.1 회전자 슬롯형상에 따른 출력 토크 및 토크 리플에 의한 출력 토크 감소

먼저 이심률이 0%일 때, 회전자 슬롯형상에 따른 출력 토크를 비교해 보았다. 실제로 회전자 슬롯형상의 개방형은 다이캐스팅 공정상의 문제로 설계가 불가능 하지만, 여기서는 회전자 슬롯형상 변화가 출력토크 및 토크 리플에 어떻게 영향을 주는지를 파악하기 위해 시뮬레이션 하였다. 표 1은 시뮬레이션 후 나타난 출력토크를 정리한 값이다.

슬롯형태	전폐형 (Totally Closed)	반폐형 (Semi Closed)	개구형 (Totally Open)
출력토크 (N. m)	0.18542	0.19335	0.13982

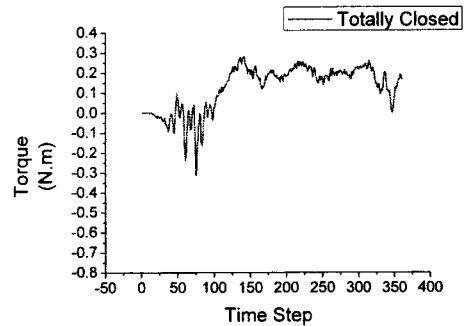
표1. 이심률이 0%일 때 슬롯형상에 따른 출력토크의 변화

시뮬레이션을 하기 전 우리는 개구형의 회전자 슬롯 형태를 가지는 모델이 슬롯 누설 리액턴스가 가장 적어 가

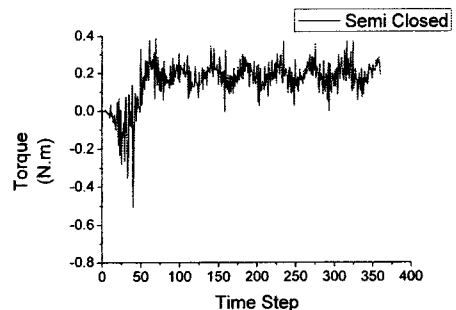
장 높은 출력토크를 낼 거라 예상하였다. 하지만 시뮬레이션 결과 개구형은 토크 리플이 반폐형에 비해 더 크게 나타남으로서, 결국 출력 토크의 감소가 나타났다. 하지만 전폐형의 경우 슬롯 누설 리액턴스가 증가하여, 기존의 반폐형 회전자 슬롯형태를 가지는 모델보다 약 10% 출력토크가 저감함을 알 수 있었다. 이와 같이 동일한 슬롯 면적을 가지더라도, 슬롯 형태에 따라 출력토크는 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

표 2. 회전자 슬롯 형상 변경 후 이심률의 증가에 따른 출력 토크 감소량 비교

이심률	10%	20%	30%	40%
전폐형 (Totally Closed) (비율)	0.0009	0.00316	0.00399	0.00557
반폐형 (Semi Closed) (비율)	0.00619	0.009725	0.0117	0.01382
개구형 (Totally Open) (비율)	0.00028	0.00083	0.00103	0.0021



(a)



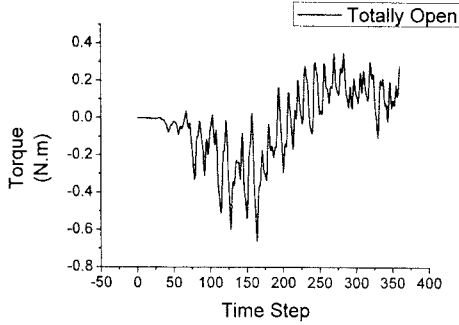
(b)

[2] R. L. Nailen, "Are electric motor aluminium bar rotors here to stay?", *Elect. App.*, Dec 1980

[3] H. A. Toliyat and M.S. Arefeen and A.G. Parlos, "A method for dynamic simulation and detection of air-gap eccentricity in induction machines", *IEEE trans.* 1995

[4] Erwin Kramer, *Dynamics of Rotors and Foundations*, Springer-Verlag, NY: 1990, p.38-76

[5] A. Barbour and W. T. Thomson, "Finite element study of rotor slot designs with respect to current monitoring for detecting static air-gap eccentricity in squirrel-cage induction motors", *IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana*, October 5-8, 1997 pp.112-119



(c)

그림 3. 이심률이 40%인 경우, 슬롯형상에 따른 토크 리플 특성

(a) 전폐형 (b)반폐형 (c)개구형

표 2는 이심률이 증가함에 따라 슬롯형상에 따라 나타나는 출력토크의 감소량을 나타내었다. 이심률이 증가함에 반폐형은 전폐형보다 출력토크의 감소폭이 더 크게 나타나는 현상을 볼 수 있었다. 이는 곧 반폐형이 전폐형보다 출력토크는 우수할지 몰라도 이심률이 증가하여 나타나는 불균형력에 취약하다는 사실을 보여준다. 또한 그림 3은 이심률이 40%인 경우 슬롯형상에 따른 토크 리플 그래프를 나타내었다. 이 그래프에서 개구형은 이심률 증가 시 출력토크의 변화가 가장 작았지만, 토크 리플이 가장 커서 소음 및 진동면에서 가장 취약하다는 사실을 알 수 있었다. 전폐형은 비록 출력토크는 반폐형보다 작지만, 이심률 증가시에 나타나는 출력토크의 변화가 반폐형보다 작아 신뢰성 있는 출력 토크를 낼 수 있을 뿐만 아니라, 토크 리플이 가장 작아 모터의 소음 및 진동을 줄일 수 있는 가장 최적화된 슬롯 형태임을 알 수 있었다. 이와 같이 동일한 면적을 가지는 회전자 슬롯은 그 형태 변화에 따라 출력토크 및 이심률 증가 시에 나타나는 토크 리플 특성에 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다.

### 3. 결 론

우리는 회전자 슬롯 형상 변화를 통해 이심률 증가에 따른 가장 최적화된 슬롯 형태를 찾아보았다. 회전자 슬롯의 면적이 동일하다고 가정할 때, 슬롯 형태를 전폐형, 반폐형, 개구형으로 구별하였다. 이심률이 없을 때, 출력토크는 반폐형이 가장 크고, 개구형이 가장 적었다. 이심률이 증가함에 따라 슬롯형태에 따라 차이는 있었지만, 어느 정도 출력토크가 줄어들음을 볼 수 있었다. 이는 이심률 증가 시 나타나는 불균형 모멘트가 출력토크에 영향을 줘서, 출력토크 감소 및 토크 리플 증가를 가져왔다는 사실을 보여준다. 이심률이 증가함에 나타나는 출력토크의 변화량을 비교 분석 한 결과, 출력토크의 변화량은 반폐형에서 가장 크고, 개구형이 가장 작음을 알 수 있었다. 하지만 토크 리플 곡선에서 나타나듯, 전폐형은 이심률이 증가함에 따라 토크 리플이 가장 크게 증가하였고, 전폐형이 가장 적음을 알 수 있었다. 결국 이심률이 증가하여도 출력토크의 변화가 가장 작고, 토크 리플 또한 가장 적게 발생하는 전폐형 슬롯이 이심률에 가장 효과적인 슬롯 형태라 볼 수 있다. 이러한 사실은 이심률 증가에 많은 영향을 받는 외전형 모터 설계 시 큰 효과를 볼 수 있을 거라 생각된다.

### [참 고 문 헌]

[1] Austin H. Bennett and Timothy Albers, "Squirrel-Cage Rotor Options for AC Induction Motors", *IEEE Trans. Industrial*