

외전형 유도전동기의 불균형력 저감을 위한 회전자 슬롯형상 최적화

김경수, 차현록, 윤철호, 정대욱, 박성준
 전남대학교 전기공학과, 한국생산기술연구원

The Optimization Design of Rotor Slot Shape in Outer-Rotor Type Induction Motor Reducing Unbalance Force

K.yung Su Kim, Hyun Rok Cha, Cheol Ho Yun, Tae Uk Jung, Seong Jun Park
 Depts. Electrical Eng. Chonnam National University, Korea Institute of Industrial Techonology

Abstract - 외전형 유도전동기는 내전형에 비해 회전자가 외부에 존재하는 특징을 가지고 있어서 제품의 소형화 및 경량화를 시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만 외전형은 회전자의 직경이 내전형에 비하여 크기 때문에 조립 공정상에 존재하게 되는 회전자와 고정자간의 이심률에 따른 제품 전체의 불균형력이 상대적으로 크며, 이로 인해 모터의 정속적인 운전 방해 및 불규칙한 출력토크로 인한 제품 작동상의 오류발생이 더 크게 나타난다. 본 논문에서는 외전형 유도전동기에서 존재하는 이심률의 크기에 따른 불균형력이 최소화 될 수 있는 슬롯형태를 찾기 위해 회전자 슬롯의 형태를 전폐형, 반폐형, 개구형태의 3가지형태로 변경시킨 후, 이를 전자장 해석을 통해 불균형력을 비교하였다. 또한 이심률이 증가함에 따라 나타나는 불균형력의 증대를 슬롯 형태에 따라 비교 분석하여, 불균형력이 최적화된 외전형 모터의 슬롯형태를 알아보았다.

1. 서 론

유도 전동기는 튼튼하고 가격이 산 장점으로 현재 산업계에서 가장 널리 사용되고 있다. 그 중 외전형 유도 전동기는 내전형에 비해 회전자가 외부에 존재하는 특징으로 비록 기동시엔 많은 토크가 필요하지만 기동 후엔 관성의 영향으로 인해 적은 토크에도 많은 출력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 모터 제품 전체의 크기의 소형화 및 경량화를 시킬 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 외전형 모터는 그 장점을 활용하기 위해 팬형 모터나 환풍기용 모터로 주로 사용되고 있다[1].

그러나 외전형 모터는 회전자의 직경이 내전형에 비하여 크기 때문에 모터 조립 공정상에 존재하게 되는 회전자와 고정자간의 이심률에 따른 제품 전체의 불균형력을 가지게 된다. 이러한 불균형력은 곧 토크-리플을 발생시켜 모터의 정속적인 운전 방해 및 불규칙한 출력 토크로 인한 제품 작동상의 진동 및 소음의 증대를 가져온다[2].

외전형 모터에서 이러한 불균형력을 줄이기 위해서는, 설계변경의 제약이 큰 고정자 보다는 비교적 쉬운 회전자 부분의 재설계를 하는 방법이 있다. 우리는 회전자 설계의 여러 가지 방법 중에서 이심률에 의한 불균형력을 최소화 할 수 있는 최적화된 회전자 슬롯 형상을 찾아보았다.

2. 본 론

2.1 이심률과 불균형력

이심률이란 전동기의 고정자와 회전자의 조립과정에 나타나는 문제로, 고정자와 회전자 간에 동심도가 맞지 않을 때, 이 둘 사이의 동심도가 얼마나 차이가 나는지를 공극의 전체면적에 대한 비율로 나타낸 값이다. 이러한 이심률은 모터가 정지하고 있을 때 나타나는 정적인 이심률과 모터에 전원을 인가한 후 회전자가 회전할 때 나타나는 동적인 이심률로 구분할 수 있다. 이러한 이심률은 모터 조립 시 부정확한 페어링 위치나 모터 축의 휘어짐 또는 회전자의 정격속도 이상 회전 시 나타나는 휠 현상으로 존재하게 되며, 현재 모터 조립의 세밀화 및 모터 설계 기술의 발달로 실제 모터 조립 상에 나타나는 이심률은 5-10% 이내로 줄어들게 되었다. 하지만 조립과정을 수행하는 기계의 정밀도가 떨어지거나, 모터 조립 상에 문제가 있을 때 이심률의 크기는 증가하며 정밀한 모터 조립이라 하여도 모터의 사용기간이 길어지면 열팽창 효과 때문에 이심률 또한 최대 40%까지 증가하게 된다.[3]

제조 공정상 존재하는 정적인 이심률의 증가는 모터 구동 시 불균형적인 자속밀도를 만들어 불균형력에 의한 동적인 이심률 증가 및 토크-리플에 의한 제품의 소음 또한 증가시킬 뿐만 아니라, 심할 경우 모터 전체의 고장을 초래하기도 한다.[4]

이심률에 대한 이해를 돕기 위해 그림 1.과 같은 이심률이 공극사이에 존재하는 그림을 나타냈다. 공극에서 이심률의 위치를 ϕ 라고 할 때 이심률에 의한 공극의 길이를 $g(\phi)$ 라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

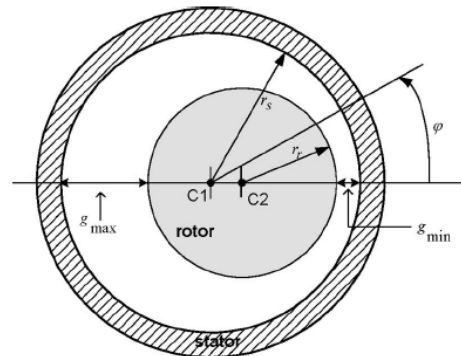
$$g(\phi) = g_0(1 - \alpha \cos\phi) \quad (1)$$

(g_0 = 불균형적인 기계의 평균 공극 길이,
 ϕ = 중심을 기준으로 한 고정자 위치 변화,
 α = 이심률)

여기서 이심률 α 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\alpha = (g_{\max} - g_{\min}) / (2g_0) \quad (2)$$

(g_{\max} , g_{\min} = 회전자 주변공극의 상대적인 최대값과 최소값)



〈그림 1〉 공극에 이심률이 존재할 때 (C₁ 은 고정자의 중심, C₂는 회전자의 중심)

불균형력은 모터의 회전자의 축이 고정자 축과 정확히 일치하지 않을 때, 즉 이심률이 존재할 때 나타나는 기계에 영향을 미치는 힘을 말한다. 이러한 불균형력은 회전자가 회전 시 나타나는 관성 모멘트에 비해 하며, 방향은 힘의 오른손 법칙에 따라 나타내게 된다[4].

이심률 α 에 의해 나타나는 불균형력 F_u 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$F_u = m\alpha\Omega^2 = U\Omega^2 \quad (3)$$

(m = 회전자 전체 질량 , α = 이심률, Ω = 각속도)

로 나타낼 수 있다 또한 힘의 오른손 법칙에 의해 불균형력이 영향을 미치는 관성 모멘트는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$M_u = (R_d - R_p)\tau\Omega^2 \quad (4)$$

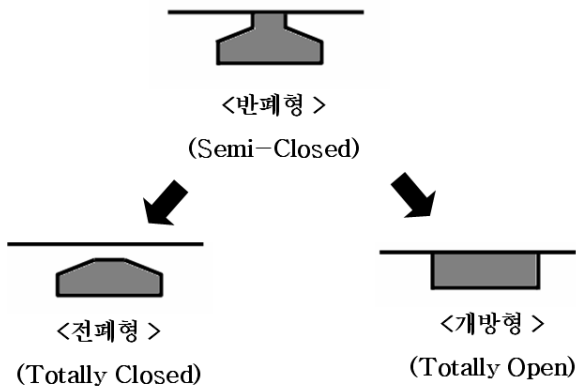
(R_d = 회전자 반경, R_p = 회전자 높이, τ = 각속도 변위량)

외전형 모터는 회전자의 반경이 내전형에 비해 더 크기 때문에 공극에 이심률이 존재 및 증가할 때, 관성 모멘트에 의한 불균형력이 증가하게 된다. 이러한 특징은 곧 내전형 모터에 비해 외전형 모터가 불균형력에 더 큰 영향을 받는다는 의미이며, 따라서 외전형 모터 설계 시 이심률에 의한 불균형력을 줄일 수 있는 방안 모색이 필수적이라 할 수 있다.

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

2.2.1 회전자 슬롯 형상

우리는 이심률의 증가에 따른 모터의 불균형력을 최대한 줄일 수 있는 회전자 슬롯 형상을 찾기 위해 유한요소법을 이용한 전자장 시뮬레이션을 통한 그 값을 비교 분석하기로 하였다. 그림 2는 기존의 반폐형(Semi-Closed) 슬롯 형태를 가지는 외전형 모터의 로터부분을 나타낸 것이다. 기존의 반폐형 슬롯을 가지는 모터를 기준으로 슬롯 형태를 전폐형(Totally Closed) 및 개방형(Totally Open)으로 변경하였을 때 나타나는 출력 토크 및 불균형력을 비교 분석하였으며, 이심률이 증가함에 따라 비례하는 불균형력의 최소화에 적합한 슬롯 형태를 찾기로 하였다. 회전자 각 슬롯의 면적은 동일하게 하였으며, 바의 재질에 따라 모터의 특성이 달라질 수 있기 때문에 알루미늄으로 통일하였다. 전자장 시뮬레이션 방법은 기존의 외전형 모델을 바탕으로 이심률이 0%부터 40%까지 각 10%씩 증가할 때 출력 토크 및 불균형력을 비교하였으며, 전자장 시뮬레이션 한 외전형 모터 모델은 다음과 같은 특징을 따랐다: 커패시터 기동형 단상 유도 전동기, 입력전압 220V, 주파수 60Hz, 4극, 1700rpm으로 회전, 입력전류 0.51A, 고정자 슬롯 수 16개, 회전자 슬롯 수 22개.



〈그림 2〉 회전자 슬롯 변경

2.2.2 회전자 슬롯형상에 따른 출력 토크 및 불균형력 비교

먼저 이심률이 0%로 동일하다고 가정 한 후 전자장 시뮬레이션 후, 회전자 슬롯형상에 따른 출력토크를 비교해 보았다. 실제로 회전자 슬롯형상의 개방형은 다이캐스팅 공정상의 문제로 설계가 불가능 하지만, 여기서는 회전자 슬롯형상 변화가 출력토크 및 불균형력에 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

〈표 1〉 이심률이 0%일 때 슬롯형상에 따른 출력토크

시뮬레이션을 하기 전 우리는 개구형의 회전자 슬롯형태를 가지는 모델이 슬롯 누설 리액턴스가 가장 적어 가장 높은 출력토크를 낼 거라 예상하였다. 하지만 시뮬레이션 결과 개구형은 모터 토크 리플이 반폐형에 비해 더 크게 나타났으므로, 결국 출력토크가 기존의 반폐형 모델보다 급격한 감소가 나타났다. 하지만 전폐형의 경우 슬롯 누설 리액턴스가 증가하여, 기존의 반폐형 회전자 슬롯형태 모델보다 약 10%의 출력토크가 저감되었지만 모터 토크 리플이 상대적으로 적게 나타나 개구형보다 더 낮은 출력 토크 결과를 알 수 있었다. 이와 같이 동일한 슬롯 면적을 가지더라도, 슬롯 형태에 따라 출력토크는 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

이심률 \ 불균형력(Nm)	10%	20%	30%	40%
전폐형 (Totally Closed)	0.0127	0.0143	0.0198	0.0241
반폐형 (Semi Closed)	0.0232	0.0288	0.0325	0.0482
개구형 (Totally Open)	0.0438	0.0491	0.0542	0.0601

〈표 2〉 회전자 슬롯 형상에 따라 이심률의 증가 시 불균형력 비교

표 2는 이심률이 증가함에 따라 슬롯형상에 따라 나타나는 불균형력의 증가량을 나타내었다. 이심률이 증가함에 반폐형은 전폐형보다 불균형력의 증가폭이 더 크게 나타남을 볼 수 있었다. 이는 곧 반폐형이 전폐형보다 출력토크는 우수할지 몰라도 이심률이 증가하여 나타나는 불균형력에 취약하다는 사실을 보여준다. 또한 개구형은 이심률 증가 시 불균형력이 가장 크게 나타나게 되어 이에 따른 토크 리플이 가장 커서 소음 및 진동면에서 가장 취약하다는 사실을 알 수 있었다. 실험 결과 전폐형은 비록 출력토크는 반폐형 보다 작지만, 이심률 증가 시 나타나는 불균형력의 증가가 반폐형 보다 작아 신뢰성 있는 출력 토크를 낼 수 있을 뿐만 아니라, 그에 따른 토크 리플이 가장 작아 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 시 나타나는 불균형력 특성에 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다.

3. 결 론

우리는 회전자 슬롯 형상 변화를 통해 이심률 증가에 따라 나타나는 불균형력에 가장 최적화된 슬롯 형태를 찾아보았다. 회전자 슬롯의 면적이 동일하다고 가정 한 후 슬롯 형태를 전폐형, 반폐형, 개구형으로 구별하였다. 이심률이 없을 때, 출력토크는 반폐형이 가장 크고, 개구형이 가장 적었다. 이심률이 증가함에 따라 슬롯형태에 따라 차이는 있었지만 불균형력이 증가함을 알 수 있었다. 이는 이심률 증가 시 나타나는 불균형 모멘트가 출력토크에 영향을 줘서, 출력토크 감소 및 토크 리플 증가를 가져왔다는 사실을 보여준다. 이심률이 증가함에 따라 나타나는 불균형력의 변화량을 비교 분석 한 결과 변화량은 개방형에서 가장 크고, 개구형이 가장 작음을 알 수 있었다. 또한 이에 따른 토크 리플 증가는 전폐형에서 가장 적게 증가하였고, 전폐형이 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 결국 이심률이 증가하여도 출력토크의 변화가 가장 작고, 불균형력 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 Applications*, vol. 37, no. 4, July/August 2001, pp. 1197-1209
- [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