

PM 모터에서 극당 슬롯비율이 코깅토크와 역기전력 파형에 미치는 영향력에 관한 연구

김도욱, 민철기, 전명선, 이갑재, 이주
한양대학교 전자전기공학부 에너지변환 연구실

Effect of Pole to Slot Ratio on Cogging torque and EMF Waveform in Fractional Slotted PM motor.

Do-Wook Kim, Cheol-Ki Min, Myung-Sun Jun, Kab-Jae Lee, and Ju Lee
Energy Conversion Lab., Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - Conventional integral slot design tend to have a high cogging torque and large end turns which contribute to copper losses. The fractional slot is more effective compared to integral slot in the cogging torque and EMF waveform. The effectiveness of fractional slot can be maximized by selecting optimal pole to slot ratio. This paper presents the effect of pole to slot ratio on the cogging torque and EMF waveform in the fractional slotted permanent magnet(PM) motor. The effectiveness of the proposed designs had been confirmed by comparing cogging torque, and EMF waveform between conventional and new models which are analyzed by Finite Element Method(FEM).

	기 존 모 델	제 안 모 델
극 수	10	20
슬롯수	30	27
상 수	3	
영구자석	NdFeB	
적층폭	37.5mm	
공 극	1.75mm	

1. 서 론

스위칭 인버터 기술의 발전과 고 에너지 영구자석이 개발됨에 따라 기존의 교류 전동기에 비해 고효율, 정토크 특성을 가진 BLDC(Brushless Direct Current)전동기의 활용이 활발히 진행되고 있으며, 주요 전동력의 응용 기종으로 각광을 받고 있다. BLDC전동기는 자기적 에너지 밀도가 높아 효율이 좋으며 속도 제어가 용이하여 이미 A/V기기, 컴퓨터 기억장치 등과 같이 정밀을 요하는 전기구동분야에 많이 사용되고 있다. 이러한 활발한 응용은 영구자석의 신소재 개발과 기술의 발달로 가능했으며, 최근에는 제어 전동기로서의 소형화, 경량화 및 고성능화에 연구중점을 두고 있다.

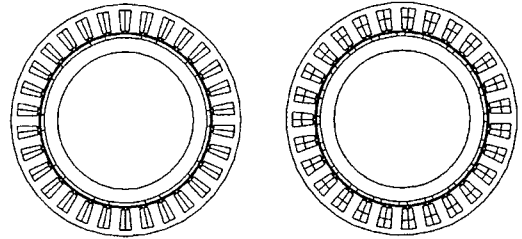
이러한 연구는 기술 개발과 설계 변경에 있어서 여러 가지 대안들이 있을 수 있으나, 고 에너지 밀도와 낮은 코깅 토크는 슬롯 설계의 변경에 의해 향상시킬 수 있다. 기존 모델들이 1:3의 극당 슬롯 비율을 채택하고 있지만 일반적으로 높은 코깅 토크 현상을 보이며, 구조상 고정자에 큰 동손을 유발하는 End Turn을 갖고 있는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 극당 슬롯 비율을 20:27의 비대칭으로 변경한 분수 슬롯 모델을 제안하고자 한다. 본 논문의 목표는 제안된 분수 슬롯 모델과 기존 모델과의 코깅 토크, 역기전력 파형 비교를 통한 우수성의 검증에 있으며, 분석방법으로는 구동회로가 고려된 2차원 유한요소법이 이용되었다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

표 1은 해석에 사용한 BLDC 전동기의 제원을 나타내고 있으며, 그림 1은 모델의 단면을 나타내고 있다. 기존모델은 집중권 형태를 적용하였고, 제안 모델은 비대칭의 분수 권선법을 적용하였다. 두 모델의 회전자 및 고정자의 재질과 크기는 동일하다.

표 1. BLDC 전동기 해석 모델의 제원



【기존 모델】

【제안 모델】

그림 1. 해석에 사용한 BLDC 전동기의 단면도

2.2 해석방법

본 논문의 해석방법은 해석영역을 매질의 종류에 따라 구분한 후 삼각형 요소로 세분하고, 경계조건과 함께 공극 요소의 중점을 서로 연결하여 적분 경로를 택했다. 2차원 유한요소법과 시간차분법, Maxwell 용력법을 이용하여, 각 모델별로 역기전력, 코깅 토크를 구하였다.

2.2.1 지배방정식 및 유한요소법의 정식화

2차원 유한요소법을 이용한 해석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 전류와 벡터포텐셜을 z축 방향 성분만 존재한다.
- 2) 철심은 등방성이다.
- 3) 히스테리시스 손실은 무시한다.
- 4) 변위전류는 무시한다.

【기본 방정식】

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J, \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ B &= \mu H + M \end{aligned}$$

$$B = \nabla \times A$$

단,

- H : 자계의 세기 [A/m]
- B : 자속밀도 [Wb/m²]
- J : 전류밀도 [A/m²]
- μ : 철심의 투자율
- M : 영구자석에 의한 자화량
- A : 자기벡터 포텐셜

위의 가정을 만족하는 준 정상상태에서, Maxwell 방정식으로부터 지배방정식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_o + J_m + J_e \quad (1)$$

A : 자기벡터 포텐셜

여기서, J_m 은 영구자석의 등가 자화 전류밀도항으로 식(2)와 같이 정의한다.

$$J_m = \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (2)$$

M_r : 영구자석의 잔류자화량

여기서, J_e 은 와전류 항으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$J_e = \sigma(E + v \times B)$$

$$= -\sigma \left[\frac{\partial A}{\partial t} - v \times (\nabla \times A) - \nabla \phi \right] \quad (3)$$

위의 가정을 바탕으로 식(1)로부터 유한요소 해석을 위한 지배방정식을 유도하면 식 (4)가 된다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right)$$

$$= -J_o + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + v_x \frac{\partial A}{\partial y} \right)$$

$$- \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

그리고 권선 한상에 대한 회로 방정식은 식(5)와 같다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (5)$$

- R_m : 해석영역의 내부저항과 외부저항의 합성저항
- L_m : 권선 코일단부의 누설인덕턴스
- E_m : 권선에 유기된 역기전력

한편, 역기전력 E 는 다음 식(6)처럼 표현할 수 있다.

$$E = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_s B \cdot dS$$

$$= \frac{d}{dt} \oint_l A \cdot dl = \frac{d}{dt} [l(A_{ie} - A_{ie})] \quad (6)$$

B : 자속밀도

2.2.2 Maxwell 응용법 및 토오크 계산

회전자 표면에서 작용하는 영구자석의 힘은 Maxwell 응력법으로부터 식(7)과 같이 계산된다.

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_s P \cdot ds = \frac{l_{stk}}{\mu_0} \oint_l (P \cdot n) dl \quad (7)$$

여기서, n 은 적분 경로상의 단위 법선 벡터, l 은 삼각형 요소 내의 적분 경로를 의미한다. 그리고 P 는 Maxwell Stress tensor로 식(8)의 행렬식과 같이 나타낼 수 있고, 행렬식의 B_x 는 X방향의 자속밀도, B_y 는 Y방향의 자속밀도, B 는 식(9)와 같다.

$$P = \begin{bmatrix} (B_x^2 - \frac{1}{2} |B|^2) & B_x B_y \\ B_y B_x & (B_y^2 - \frac{1}{2} |B|^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2)} \quad (9)$$

요소의 무게중심을 연결하여 미소경로를 구성하고 이를 통과하는 자속밀도 B 의 법선 성분과 접선 성분의 평균치를 각각 B_n 과 B_s 라 할 때, 회전자 표면에서 작용하는 토오크는 식(10)로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu} [B_n^{(i)} B_s^{(i)}] (l_i D) \quad (10)$$

- r : 회전자의 반지름
- u : 미소 적분 경로의 수
- i : 미소 적분 경로의 길이
- D : 철심의 적층폭

그림 2는 토오크를 계산하기 위한 공극에서의 적분 경로를 나타내고 있다. 그림 3은 제안 모델의 요소 분할도를 나타내고 있다.

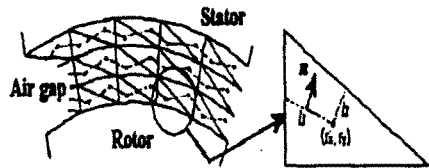


그림 2. 공극에서의 적분경로

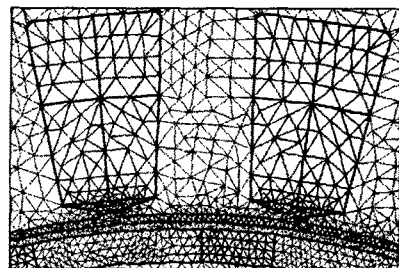


그림 3. 제안된 모델의 요소 분할도

2.3 해석 결과

2.3.1 코깅토크, 역기전력 분포곡선

구동회로가 고려된 2차원 시간차분 유한요소법을 이용해 코깅토크와 역기전력을 산출하였고, 그 결과를 바탕으로 기존모델과 제안모델에 대한 해석 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 가로축은 모두 시간을 나타내며 세로축은 각각 코깅토크, 역기전력을 의미한다.

FEM 해석 시 고정자 권선을 여자시키지 않은 상태에서 회전자를 1000rpm으로 회전시킨다. 기계각 360도 1회전만 해석하였다.

그림 4는 기존모델과 제안모델에 코깅토크를 나타내고 있다. 정수슬롯의 경우 1회전당 코깅토크는 슬롯수와 동일한 30번 진동하며, 분수 슬롯의 경우 1회전당 코깅토크는 크기가 일정하지 않았으며 극수와 비례하여 대칭 분포형태로 나타난다($360^\circ/20\text{극} = 18^\circ$ 대칭 분포). 그림 4에 나타낸 것과 같이 코깅 토크 특성 비교에 있어서 제안 모델은 기존 모델에 비해서 1/24.6으로 감소된 코깅토크 파형을 보여주고 있다(분수슬롯 코깅토크 : 정수슬롯 코깅토크 = 1 : 24.6). 식 (11)를 이용하여 코깅 토크 리플을 계산하였으며, 코깅 토크 리플 비교에 있어서도 208.9%의 리플을 보이는 기존모델과 비교해서 제안모델의 토크리플은 181.5%로 감소하였다.

Cogging Torque Ripple

$$= \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \times 100 \quad (\%) \quad (11)$$

그림 5에서와 같이 기존 모델의 역기전력 파형은 비정현파적인 특성을 보이고 있는 반면, 제안 모델은 안정적인 정현파적인 특성을 보여주며 높은 전압을 나타내고 있다. 전동기 역기전력의 정현파적 특성은 일정 토크를 유도하고, 모터 제어를 위한 전력 전자 회로의 간섭성을 실현하므로 전동기적 우수성을 반영한다.

3. 결 론

본 논문에서는 구동회로가 고려된 2차원 유한요소법을 이용하여 극당 슬롯비의 변화가 전동기 특성에 미치는 각각의 영향을 분석하였다.

정수의 극당 슬롯(10:30)을 채택한 기존 모델과 제안된 비대칭의 분수 슬롯 모델(20:27)과의 성능비교는 본문에서 제시된 바와 같이 코깅 토크와 역기전력 파형을 통해서 이루어졌다.

분수 슬롯 모델이 기존의 정수 슬롯 모델에 대해서 갖는 우수성의 또 다른 이유는 영구자석의 극모서리(pole-edge)가 외부슬롯과 거의 정렬되지 않는다는 사실에서 연유한다. 정수의 극당 슬롯 모델은 슬롯과 극이 모두 직선상에 정렬되어 이로 인해 구동회로에서 코깅토크를 유도하게 되며, 이는 모터의 특성을 저하시킨다는 단점으로 연결된다. 이러한 분수 슬롯 모델의 구조적인 이점은 전동기의 기본 설계 이후에는 적층(lamination)과 비틀림처리(skew)와 같은 부가적인 설계 변경의 필요성을 제거하여 제작단계에서도 유리한 이점을 갖는다.

제어용 전동기로 그 활용이 높아지고 있는 BLDC전동기의 구조적인 대안설계로서 분수 슬롯 모델의 채택은 낮은 코깅 토크와 일정 토크를 가능하게 해준다는 것이 본 논문을 통해 조사되었다. 앞으로 영구자석 모터가 이용되어지는 다른 산업 영역에서도 고성능 및 고효율을 갖는 분수 슬롯의 응용 및 활용이 활발해질 것으로 전망된다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. R. Hendershot Jr. and TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet", 1994.
- [2] J. Cros, P. Viarouge, "Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings", IEEE, 1999.
- [3] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987.
- [4] 한문규 외, "BLDC 모터의 회전자 형상변화에 의한 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp861-863, 2000.
- [5] 장홍순 외, "스위칭 위치에 따른 2상 BLDC 모터의 특성 변화", 전기학회 논문지, Vol49B, No10, pp646-651, 2000.
- [6] 장홍순 외, "회전자 철심이 없는 내전형 BLDC 모터의 유한요소 해석", 대한전기학회 논문집, Vol49B, No10 pp652-658, 2000.
- [7] 조한샘 외, "Effect of Pole to Slot Number Ratio on Back-EMF Constant of BLDC Motor with Non-overlapping Stator Winding", LG Electronics Inc, IEEE, 1999.
- [8] 오근용, "동특성 유한요소법과 최적화 기법을 이용한 스위치 릴럭턴스 모터 (SRM)의 특성 해석 및 형상최적화에 관한 연구", 석사학위 논문, pp7-16, 1996.
- [9] Essam S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", 1994.
- [10] C. studer 외, "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE, 1997.

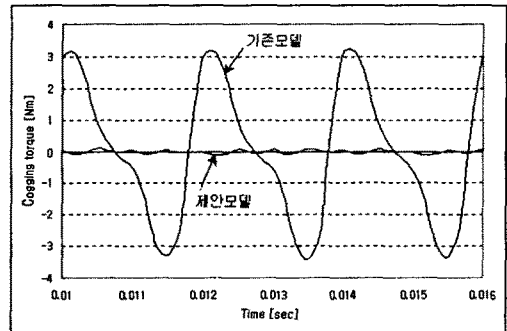


그림 4. 해석 모델의 코깅토크 분포 곡선

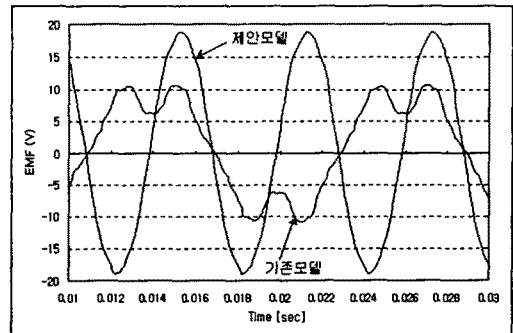


그림 5. 해석 모델의 역기전력 분포 곡선