

페슬롯 형상을 가진 영구 자석형 동기 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 고정자 치수 최적화

천장성*, 홍선기*, 윤중석*, 정현교*

*서울대학교 전기공학과 *호서대학교 제어계측공학과 *금성기전(주)제어기기그룹 연구실

Optimal Design of Stator of Permanent Magnet Motors
Having Closed Slot For The Cogging Torque Reduction

J.S.Chun*, S.K.Hong*, J.S.Yoon*, H.K.Jung*

*Dept. of Electrical Engineering Seoul National University *Goldstar Electric Machinery Co., Ltd.
*Dept. of Control and Instrument Engineering Hoseo University

ABSTRACT

This paper presents the cogging torque analysis of the permanent magnet type AC servo motor which have the closed slot structure. Generally, existence of the slot opening causes the cogging torque. But the cogging torque exists in this type motor(having closed slot structure) because the bridge part is saturated by the rotor flux.

In this paper, the finite element analysis is used to calculate the cogging torque and the rated torque. As the size of the bridge part-the thickness and the width- changes, the cogging torque and the rated torque are obtained repeatedly like as upper procedures. Finally, the trends of the cogging torque and the rated torque versus the size of the bridge part are obtained from this analysis procedures.

By this approach, the optimal geometry of the bridge part can be found which minimize the cogging torque satisfying the required value of the rated torque.

1. 서론

현재의 AC 서보 모터는 소형화, 경량화, 고기능화, 고도도화를 위해 그 기술이 진보되고 있다. 위와 같은 서보 성능의 향상을 위해 회전자에는 고성능 회로류 자석을 채용하고, 고정자의 슬롯 형상은 페슬롯 구조를 취하는 추세이다.

특히 페슬롯 형상의 고정자는 고밀도 권선 - Fill Factor를 약 70%까지 이르게 함 -이 가능한데, 이는 정격 토크대 동손의 비를 감소시켜 모터의 소형화에 기여한다. 또한 페슬롯 형상을 가진 전동기는 공극 릴럭턴스가 균일하게 되어 개슬롯 구조의 전동기에 비해 코깅 토크가 현저히 감소된다. 이는 특히 저속시의 성능향상에 기여한다.

그러나, 페슬롯 형상이라 할지라도 회전자 플럭스에 의하여 철심이 포화되기 때문에 증가적인 공극이 존재하게 된다. 이론적인 페슬롯 형상의 전동기에서는 균일한 공극 릴럭턴스로 인해 코깅 토크가 존재하지 않아야 하나, 포화 현상에 의한 증가 공극으로 인해 페슬롯 형상의 전동기에서도 코깅 토크는 존재한다. 특히, 고성능의 회로류 자석을 채용하는 소형 AC 서보 모터에서는 이 영향이 크게 나타난다. 이러한 코깅 토크는 등가 공극의 계산에 의해 해석할 수도 있고, F.E.M. Finite Element Method)에 의해 해석할 수도 있다. [1], [2], [3], [4], [5]

본 논문에서는 이러한 코깅 토크의 저감을 위해 F.E.M. 을 사용한 정확한 자계 해석으로 페슬롯 형상 고정자의 치수를 최적화한다. 먼저, 페슬롯 형상 전동기의 외측 철심의 치수는 일정한 것으로 한다. 그리고, 코깅 토크의 존재에 가장 큰 영향을 미치는 브리지부-고정자 치부와 치부 사이를 연결하는 부분-의 폭과 두께에 따라 F.E.M.을 사용하여 코깅 토크와 정격 토크를 해석한다. 토크의 계산 방법에는 Maxwell Stress Tensor법^[3]과 Energy법^[4]이 있으나, 본 논문에서는 Energy법을 사용한다.

위의 과정을 반복하여 브리지부의 두께와 폭에 따른 코깅 토크와 정격 토크의 추이를 통해 정격 토크의 제한 조건을 만족하면서 코깅 토크를 최소화시키는 최적의 고정자 치수를 결정한다.

2. 본론

[1] Finite Element Method

Finite Element Method를 이용하는 자기장의 지배 방정식은 다음 식과 같이 자기 벡터 포텐셜을 이용하여 쓸 수 있다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \nabla \times \vec{J}_0 \vec{M} \quad (1)$$

여기서 ν 는 reluctivity, \vec{J}_0 는 전류 밀도, \vec{M} 은 자화량을 나타낸다.

[2] Torque calculation

특정한 회전자의 위치에서 토크를 계산하기 위해, 본 논문에서는 토크값이 한번의 자장 해석만으로 계산이 되는 Energy 방법을 사용한다.

회전자의 각 변위에 대한 에너지 보존 법칙은 다음과 같다.

$$\Delta E_{elec} = \Delta E_{stored} + \Delta E_{mech} \quad (2)$$

즉, 전기적 입력 에너지의 변화량은 자기 에너지의 변화량과, 토크 T 와 각변위 $\Delta\theta$ 의 곱인 기계적인 에너지로 된다. 영구 자석으로 여자되는 전동기에서 전기적인 입력 에너지는 power supply로부터 권선에 공급된다. 단, 코깅 토크의 계산에서 이 입력 에너지는 영이 된다. 반면에, 자기 에너지는 i) 공기나 동같은 비자성체에 ii) 자성체인 영구 자석에 저장된다.

$$T = -\Delta F_{\text{stored}} / \Delta \theta \quad (3)$$

여기서, $\Delta F_{\text{stored}} = \Delta(E_{\text{air}} + E_{\text{iron}} + E_{\text{magnet}})$ 이다.

일반적으로 저장되는 자기 에너지는 다음식으로 계산되어진다.

$$E = \int w dv \quad (4)$$

여기서, $w = \int_0^H dB$ 이다.

위 식은 물질 상수로부터 계산되어진다. 비자성체 영역에서는 $B = \mu_0 H$ 이므로 다음 식이 성립된다.

$$E_{\text{air}} = B^2 / 2\mu_0 \quad (5)$$

그림 1(a)와 같은 soft 자성체에서 자화 특성 곡선은 다음과 같이 수식화 할 수 있다.¹⁵⁾

$$B = \mu_0 H + s_1 \arctan(a_1 H) + s_2 \arctan(a_2 H) \quad (6)$$

여기서, a_1, a_2, s_1, s_2 는 상수이고, 저장되는 에너지 밀도는 다음과 같다.

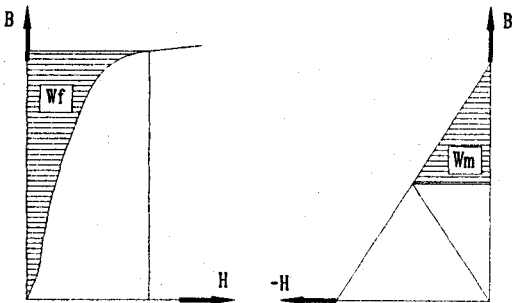
$$w_{\text{iron}} = BH - w_{\text{coe}} \quad (7)$$

$$w_{\text{coe}} = \mu_0 \frac{H^2}{2} + Hs_1 \arctan(a_1 H) - \frac{s_1}{2a_1} \ln[1 + (a_1 H)^2] + Hs_2 \arctan(a_2 H) - \frac{s_2}{2a_2} \ln[1 + (a_2 H)^2] \quad (8)$$

그림 1(b)와 같은 hard 자성체에서 저장되는 에너지 밀도는 다음과 같다.

$$w_{\text{magnet}} = (B_r - B_{\text{par}})^2 / 2\mu_0 \mu_{\text{par}} + B_{\text{per}}^2 / 2\mu_0 \mu_{\text{per}} \quad (9)$$

여기서, B_{per} 과 B_{par} 은 자석의 자화 방향과 평행한 성분과 수직인 성분을 나타낸다.



(a) Soft Magnetic Material (b) Hard Magnetic Material

그림 1. 영구 자석의 자화 특성 곡선

[3] Cogging torque

코깅 토크는 영구 자석 회전자와 고정자 사이에 존재하는 것으로, 다음 식으로 나타내어진다.

$$F_{rs} = \frac{1}{2} F_g^2 \frac{dP_g}{dg} \quad (10)$$

여기서, F_g 는 공극 기자력, P_g 는 공극 퍼미언스를 나타낸다.

일반적으로 공극 퍼미언스는 공극의 길이의 함수이므로 공극의 길이가 일정한 폐쇄형의 전동기에서는 균일해야 한다. 그러나, 그림 2. 브리지부의 포화로 인해 균일

공극이 변화하므로 고정자와 회전자 사이에 자기력이 생겨난다.

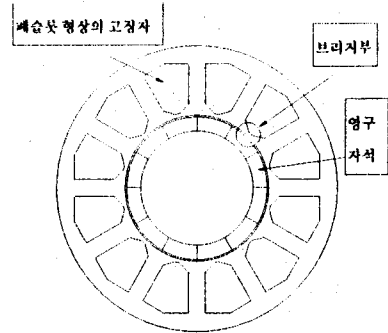


그림 2. 대상 전동기의 고정자와 회전자

3. 해석 결과

본 논문에서 해석한 전동기의 기본 사양은 다음과 같다.

항 목	Value
고정자 슬롯수	12
회전자 극수	12
고정자 외경	60 [mm]
고정자 내경	30.7 [mm]
공극의 길이	0.35 [mm]
자속 밀도	1.1 [T]

유한 요소법을 이용한 코깅 토크 계산시 고정자와 회전자의 상대적인 위치를 그림 3.과 같이 4가지로 나누어 해석하였다.

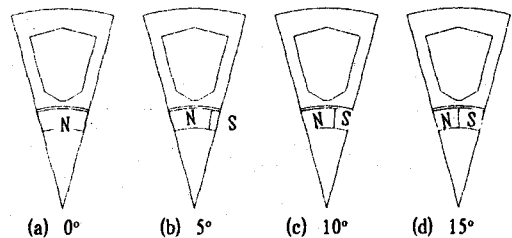


그림 3. 고정자와 회전자의 상대적인 위치

[1] 브리지부의 치수 변화에 따른 코깅 토크의 변화
코깅 토크는 각도 약 10° 정도(그림 3.의 (b))에서 최대값을 나타낸다. 본 전동기의 극피치(30°)의 나머지에 해당하는 15°~30° 부분은 음의 값이어서 대칭의 형태가 된다.

그림 4.와 그림 5.로부터 브리지 두께가 두꺼울수록, 브리지폭이 작을수록 코깅 토크는 감소함을 알 수 있다.

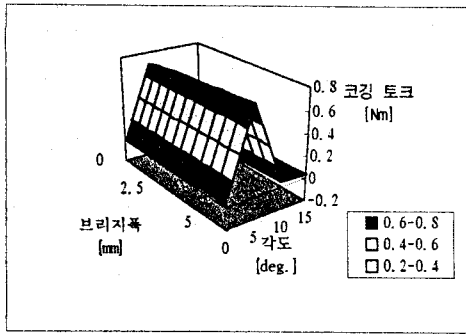


그림 4. 브리지 폭에 대한 코깅 토크의 곡선

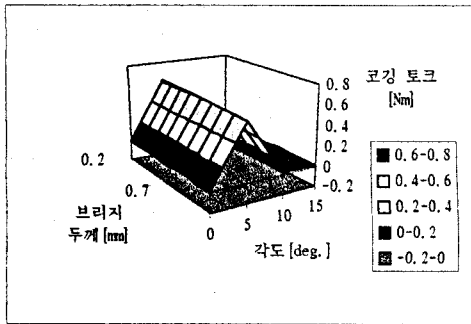


그림 5. 브리지 두께에 대한 코깅 토크의 곡선

[2] 브리지부의 치수 변화에 따른 정격 토크의 변화

그림 6. 은 브리지부의 치수 변화에 따른 정격 토크의 변화를 보인 것인데, 슬롯의 단면적이 정격 토크의 크기에 관여함을 알 수 있다. 즉, 일정 전류, 일정한 고정자 선경의 제한 조건에서는 슬롯의 단면적에 비례하여 고정자 기자력이 발생한다. 따라서, 슬롯의 단면적이 정격 토크와 비례하는 것은 자명하다.

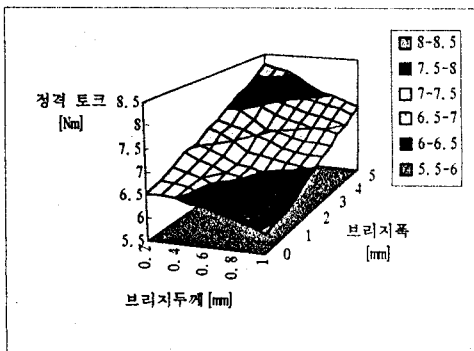


그림 6. 브리지 폭과 치수에 대한 정격 토크의 곡선

[3] 최적화 전동기

위의 해석 결과로부터 얻어진 최적의 전동기의 고정자 치수는 다음과 같다. 정격 토크의 제한 조건은 6.85 [Nm] 이다. 이때 최적의 고정자 치수는 브리지 두께가 0.6 [mm] 이고, 브리지폭은 3 [mm] 이다.

4. 결론

본 논문은 페슬롯 형상의 고정자와 영구 자석형 회전자를 가지는 동기 전동기에서 코깅 토크와 정격 토크의 해석을 통해 고정자 치수를 최적화하였다. Energy Method를 사용한 F.E.M.으로 해석으로 얻은 고정자 슬롯의 브리지부의 치수 변화에 대한 토크 정보를 통해 최적의 치수가 결정되었다. 본 논문은 동기기형 서보 모터의 서보 성능 향상을 위한 최적 설계시 코깅 토크에 관한 해석법을 제공한다.

5. 참고 문헌

- [1] Takeo Ishkawa, Gordon R. Slemon, "A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 29, no. 2, pp. 2028-2031, 1993.
- [2] Yoshihiro KAWASE, Tadashi YAMAGUCHI, Yoji HAYASHI, "Analysis of Cogging Torque of Permanent Magnet Motor by 3-D Finite Element Method", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 31, no. 3, pp. 2044-2047, 1995.
- [3] D. Howe, Z. Q. Zhu, "The Influence of Finite Element Discretization on the Prediction of Cogging Torque in Permanent Magnet Excited Motors", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1080-1083, 1992.
- [4] M. Marinescu, N. Marinescu, "NUMERICAL COMPUTATION OF TORQUES IN PERMANENT MAGNET MOTORS BY MAXWELL STRESS AND ENERGY METHOD", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 463-466, 1988.
- [5] J. Mizia, K. Adamiak, A. R. Eastham, G. E. Dawson, "FINITE ELEMENT FORCE CALCULATION: COMPARISON OF METHODS FOR ELECTRIC MACHINES", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 447-450, 1988.