

회전형 이상 횡자속형 전동기에서 발생하는 자기력 및 토크 해석

Analysis of the Magnetic Force and Torque of a Rotatory Two-phase Transverse Flux Machine

박 남 기* · 장 건 희† · 장 정 환**

Namki Park, Gunhee Jang and Junghwan Chang

(2006년 9월 28일 접수 ; 2006년 12월 12일 심사완료)

Key Words : Transverse Flux Machine(횡자속형 전동기), Torque(토크), Magnetic Force(자기력), Rotatory Two-phase(회전형 이상), Excitation Frequency(가진 주파수), Unbalanced Magnetic Force(불평형 자기력)

ABSTRACT

Rotatory two-phase transverse flux machine(TFM) is a relatively new type of motor with high power density, high torque, and low speed in comparison to conventional electrical motors. However, it has some shortcomings, i.e. complex construction and high possibility of the magnetically induced vibration due to its inherent structure. This paper investigates the characteristics of the magnetic force and the torque in the rotatory two-phase TFM by using the 3-D finite element method and the spectral analysis. This research shows that the average torque decreases and that the torque ripple increases as the phase delay increases. It also shows that the unbalanced magnetic force is one of the dominant excitation forces in this machine. And it proposes a new topology of rotatory two-phase TFM to eliminate the unbalanced magnetic force.

1. 서 론

횡자속형 전동기(transverse flux machine, TFM)는 1980년대 Weh와 May에 의해 Fig. 1과 같은 형태로 제안되었다⁽¹⁾. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 TFM은 서로 반대방향으로 자화 된 자석을 회전자에 삽입하여 공극에 흐르는 자속을 증가시킨다. 또한 이 전동기는 magnetic flux가 흐르는 iron core path가 짧고 극 간격이 작기 때문에 기존 전동기에 비해 체적대비 높은 토크와 파워를 발생시키며 효율이 높은 특징을 가지고 있다. 이러한 장점으로 산업

용 추진기, 승강기 등의 선형 추진 시스템에 이용되고 있으나 구조가 복잡하여 제작이 어려운 단점이 있어 대량생산으로 이어진 사례는 많지 않다.

많은 연구자들이 횡자속형 전동기에 대한 연구를 하였으며, Maddison 등은 제작이 용이하고 높은 토크를 발생시키는 claw pole 횡자속형 전동기를 제안하였다⁽²⁾. 그리고 Kang과 Jeong은 teeth 사이에 초전도 스크린을 삽입하여 자속 누설을 줄임으로써 높은 파워를 발생시키는 횡자속형 전동기를 설계하였고⁽³⁾, Guo 등은 전동기의 고정자와 회전자에 SMC(soft magnetic composite) 재질을 도입하여 철손을 감소시킨 횡자속형 전동기를 설계하였다⁽⁴⁾. 그리고 Masmoudi 등은 전동기의 회전자에 skew를 주어서 토크 발생을 저해하는 코깅 토크를 감소시키는 연구를 하였다⁽⁵⁾. 그 밖에도 많은 연구자들이 TFM의 파워, 토크, 효율에 관한 연구를 수행하고 있지만

† 책임저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02)2220-0431, Fax : (02)2292-3406
* 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
** 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹

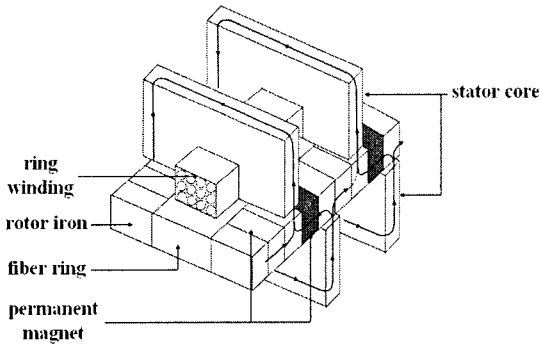


Fig. 1 Topology of TFM proposed by Web

횡자속형 전동기의 구조적인 특징 때문에 필연적으로 발생하는 불평형 자기력 및 이에 의한 소음 진동 감소 방안에 관한 연구는 거의 진행되고 있지 않다.

이 논문은 회전형 이상 횡자속형 전동기에서 발생하는 토크와 불평형 자기력을 3차원 유한 요소법을 이용하여 해석하였고 이 전동기의 정류 위상 차 변화에 대한 토크 특성과 자기력을 해석하였다. 또한 회전형 이상 횡자속형 전동기의 구조 특성상 발생하는 불평형 자기력의 특성을 해석하였고, 주파수 분석 방법을 이용하여 불평형 자기력의 가진 주파수를 예측할 수 있도록 하였다. 그리고 이 전동기에서 발생하는 불평형 자기력을 제거할 수 있는 새로운 구조의 TFM을 제안하였다.

2. 해석 방법

2.1 회전형 이상 횡자속형 전동기

Fig. 2는 해석 대상인 정격 속도 300 rpm의 회전형 이상 횡자속형 전동기의 고정자와 회전자 그리고 코일을 나타내고, Table 1은 주요 설계 변수를 나타낸다. 고정자는 철손을 감소시킬 수 있는 SMC 재질로 만들어 졌고, 각 상당 상하 두 개의 코어로 분리되어 있다. 상하 각각 14.5개의 치가 존재하며, 1/2 tooth pitch(전기각 180도, 기계각 5.625도)의 위상차가 존재하도록 배치되어 있다. 각 상의 상하 코어 사이에는 정상 상태에서 1250 AT(amphere-turn)의 기자력을 발생시킬 수 있는 코일이 감겨져 있다. 회전자는 SMC 재질에 반대방향으로 자화되어 있는 자석을 교대로 삽입하여 자속을 집중시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 또 극 쌍수는 32개이지만 고정자에 코일을 감기 위해 제거된 부분을 고려하면

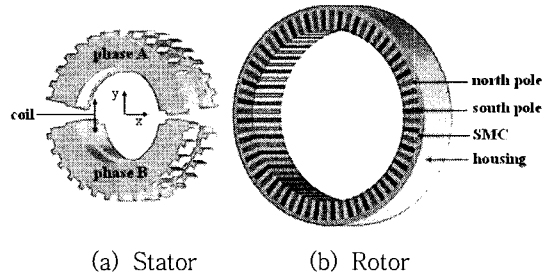


Fig. 2 Stator and rotor of a rotatory two-phase TFM

Table 1 Major design variables

Design parameters	Value
Stator inner radius	41.4 mm
Stator outer radius	72.5 mm
rotor outer radius	88.5 mm
Air-gap length	0.5 mm
Axial length	47 mm
Tooth pitch, $2r$	11.25 degree
Number of pole pairs	32
Residual flux density of magnet	0.38 T
MMF	1250 AT
Rated speed	300 rpm

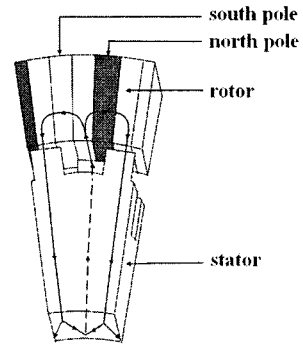
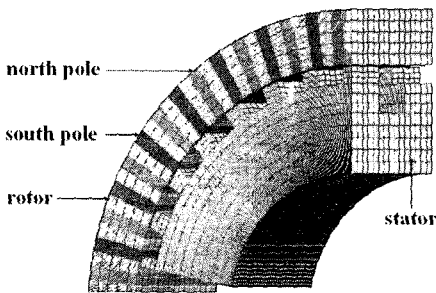


Fig. 3 3D magnetic flux path of a rotatory two-phase TFM

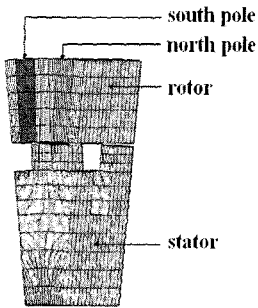
실제로 토크를 발생시키는 유효 극 쌍의 수는 29개가 된다. Fig. 3은 횡자속형 전동기의 자속 경로를 나타낸다. 코일에 전류를 인가하면 자속은 공극을 통해 치에서 회전자로 흐르고 회전자에서 영구 자석에 의해 집중된 후, 다시 공극을 통해 반대쪽 치로 흐르게 된다.

2.2 유한 요소 모델

이 전동기는 동일 평면상에 두 개의 상이 존재하는 구조로 되어 있으며 고정자가 원주 방향으로 연속적이지 않고 개방된 부분이 존재한다. 고정자가 개방된 부분의 극과 연속인 부분의 극에서 발생하는 토크와 자기력의 크기는 같지 않다. 따라서 주기경계조건을 적용한 부분모델로는 정확한 해를 도출할 수 없기 때문에 전동기 전체를 모델링 해야 한다. Fig. 4는 회전형 이상 횡자속형 전동기의 3차원 유한 요소 모델을 나타낸다. 상용프로그램인 ANSYS를 이용하여 전자장 해석을 하였고 8절점 육면체 요소로 모델링 하였다. 또 공극은 자속의 변화가 크기 때문에 요소를 조밀하게 나누었다. 그리고 회전자의 회전을 고려하기 위해 요소를 원주방향으로 0.28125도씩



(a) A quarter of full model



(b) Partial model

Fig. 4 Finite element model of TFM

Table 2 Current switching sequence

Position	Phase A	Phase B
$0\tau - 0.5\tau$	+	-
$0.5\tau - 1.0\tau$	+	+
$1.0\tau - 1.5\tau$	-	+
$1.5\tau - 2.0\tau$	-	-

나누었다. 이렇게 모델링 하면 회전자의 회전을 고려할 때 요소 재분할이 필요 없이 회전자의 영구자석과 SMC에 해당되는 유한 요소의 B-H곡선과 자화 방향을 변경시킴으로써 수치 해의 일관성을 확보할 수 있다.

전체 모델은 전동기 전체를 모델링 하였고 절점 수는 614,448개, 요소 수는 559,376개 이다. 부분 모델은 A상과 B상 사이에 개방된 영역의 효과를 알아보기 위해 모델링 하였고, 전동기의 한 극 쌍의 고정자와 회전자로 구성되며 양쪽 끝 면에 주기경계조건을 적용하였다. 그리고 절점 수는 19,700개, 요소 수는 17,492개 이다.

전동기의 한 극 쌍의 간격은 치 사이의 간격과 같이 2τ (기계각 11.25도, 전기각 360도)가 된다. 토크와 자기력은 회전자가 한 극 쌍을 회전할 때 0.28125도 간격으로 virtual work method를 이용하여 계산하였다. 전류는 Table 2에 나타난 바와 같이 사각파 직류 전류를 기자력 1,250 AT으로 인가하였다.

3. 해석 결과 및 문제점

3.1 토크

Fig. 5는 A상에만 전류를 인가할 때 A상에서 발생하는 토크를 부분 모델을 이용하여 해석한 것과 전체모델을 이용하여 해석한 것을 나타낸다. 부분모델을 이용하여 한 상에서 발생하는 토크를 계산하기 위해 한 극 쌍에서 발생하는 토크에 고정자 한 개의 치의 개수 14.5를 곱하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 부분 모델로 해석한 토크 파형과 전체 모델로 해석한 토크 파형은 일치하지 않는다. 즉, 고정자가 개방된 부분의 극과 연속인 부분의 극에서 발생하는 토크가 서로 다른 것을 알 수 있다. 따라서 전체 모델은 많은 계산시간을 필요로 하지만 정확한 해를 도출할 수 있는 전체 모델로 해석해야 한다.

Fig. 6은 전류를 두 상에 모두 인가할 때의 출력 토크(output torque)와 전류를 인가하지 않았을 때의 토크(cogging torque)를 나타낸다. 여기서 출력 토크는 전류를 스위칭 하면서 한 상에만 인가할 때 각 상에서 발생하는 토크의 합과 거의 같으며 각 상은 서로 토크 발생에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6에서 보는 바와 같이 코깅 토크는 출력 토크에 비해 매우 작은 값을 가지므로 토크와

토크 리플의 크기는 코깅 토크보다 전류 인가에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 BLDC 나 AC 전동기의 토크 리플은 평균 토크 대비 20% 이하이나 이 전동기의 토크 리플은 43.5%로 매우 크다.

토크 리플은 속도 변화에 영향을 주면서 가진 원으로 작용한다. 이 전동기의 한 극 쌍의 주기는 2τ 이지만 전류 스위칭에 의해 토크가 음이 되는 구간을 양이 되게 했기 때문에 토크 T_A 와 T_B 의 주기는 τ 가 되고 T_A 와 T_B 의 합인 출력 토크의 주기는 $\tau/2$ 가 된다. 따라서 전동기가 1회전할 때 토크 파형은 극 쌍수의 네 배만큼 반복되고 토크의 가진 주파수는 극 쌍수의 네 배와 회전 주파수(rev/s)의 곱의 정수 배로 표현할 수 있다.

$$f_i = 4 \cdot p \cdot f \cdot i \quad (1)$$

여기서 f_i, p, f, i 는 각각 토크의 가진 주파수,

극 쌍수, 회전 주파수, 정수이다. 이 전동기의 정격 속도는 300rpm (5Hz)이므로 기본 가진 주파수는 640Hz가 된다. Fig. 7은 토크의 주파수 분석 결과로, 식 (1)에서와 같이 토크의 가진 주파수는 회전 주파수의 128, 256, 384 등의 고조파로 표시된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 전류의 정류 위상 차에 대한 토

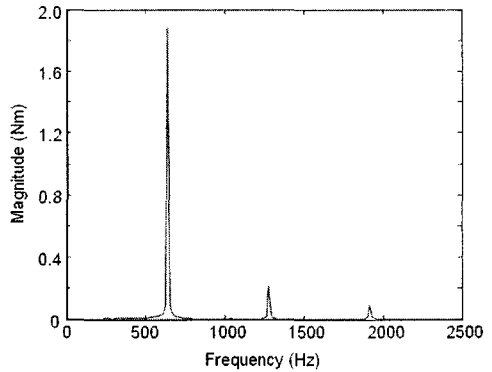


Fig. 7 Frequency spectrum of torque

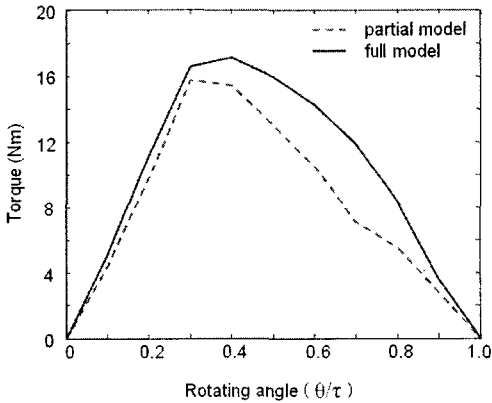


Fig. 5 Comparison of torque profile

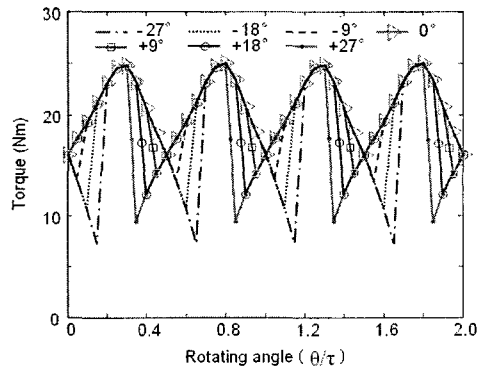


Fig. 8 Torque profile due to commutation delay

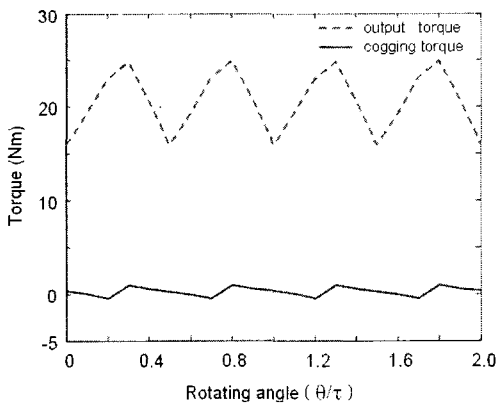


Fig. 6 Output torque and cogging torque

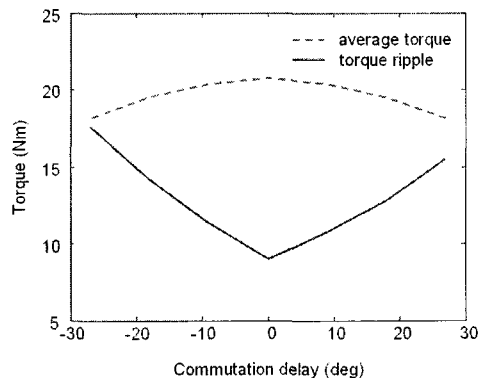


Fig. 9 Average torque and torque ripple versus commutation delay

크 파형과 평균 토크, 토크 리플의 크기를 나타낸다. 전류의 스위칭이 적절하게 일어나지 않으면 평균 토크는 감소하고 토크 리플의 크기는 증가하게 된다. 또한 토크 리플이 증가하면 토크에 의한 가진력이

커지게 되어 더 큰 진동과 소음을 발생시키고 전동기의 효율을 감소시킬 수 있다.

3.2 자기력

자기력은 전동기에서 진동과 소음을 발생시키는 중

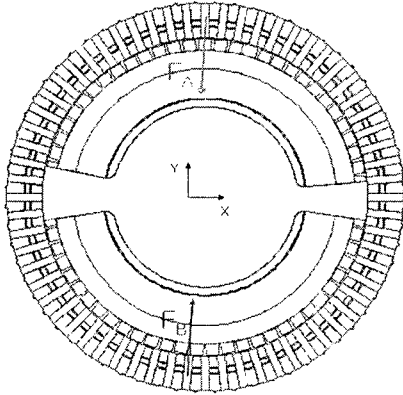


Fig. 10 Magnetic force generated by phase A and B

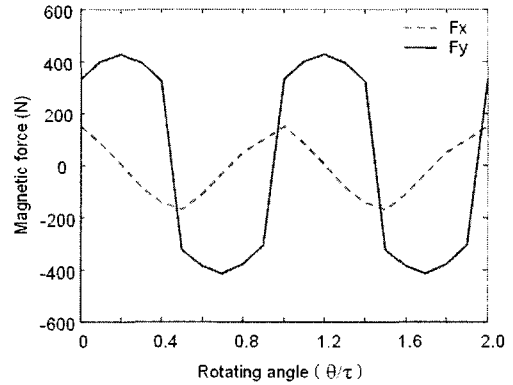
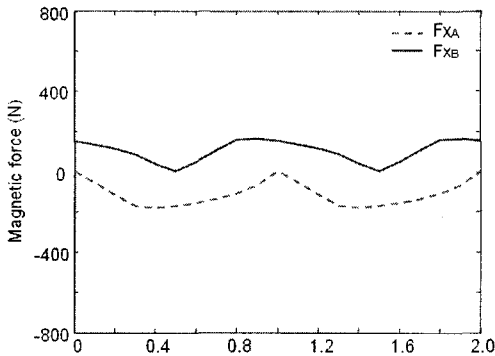
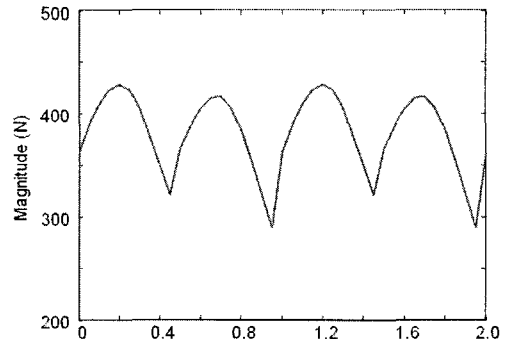


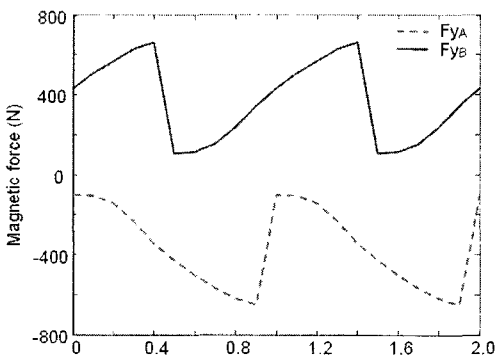
Fig. 12 X and Y components of magnetic force



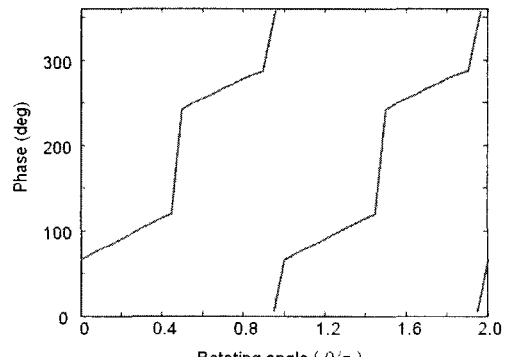
(a) X components



(a) Magnitude



(b) Y components



(b) Phase

Fig. 13 Magnitude and phase of the resultant magnetic force

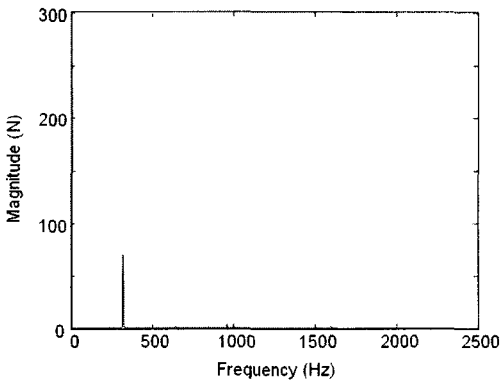
Fig. 11 Magnetic force of phase A and B

요한 요인이지만, 회전 대칭 구조로 되어 있는 전동기는 자기력이 서로 상쇄되어 0이 된다^(6,7). 그러나 회전형 이상 횡사속형 전동기에 A상과 B상에 인가하는 전류는 서로 전기각 90도의 위상 차를 갖고 또 두 고정자의 치가 직면하는 극의 위치가 서로 전기각 90도의 위상 차를 갖는 회전 비대칭 구조이기 때문에 불평형 자기력이 존재하게 된다. Fig. 10은 A와 B상에서 발생하는 자기력 F_A 와 F_B 를 나타내며, Fig. 11은 회전자가 전기각 360도 회전할 때 A와 B상에서 발생하는 자기력 F_A 와 F_B 의 X, Y성분을 나타낸다. Fig. 11에서와 같이 F_A 와 F_B 의 X, Y성분은 서로 다른 값을 갖기 때문에 서로 상쇄되지 않아 불평형 자기력이 발생하게 된다.

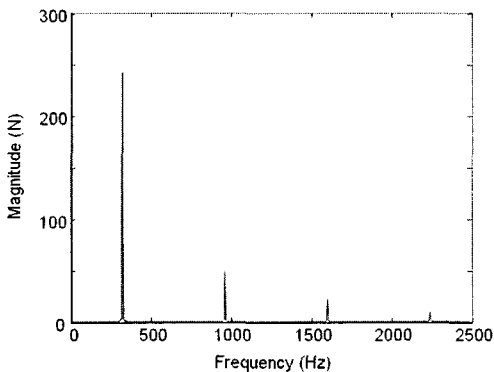
Fig. 12는 각 상에서 발생한 자기력의 합력을 X축, Y축 방향의 불평형 자기력 F_x 와 F_y 로 나타낸 그림이다. 불평형 자기력 F_y 가 F_x 보다 큰 이유는 Y축을 중심으로 왼쪽과 오른쪽은 서로 같은 상이 대치되어 자기력이 대폭 상쇄되지만 X축을 중심으로

위쪽과 아래쪽은 서로 다른 상이 대치되어 자기력이 상쇄되지 않기 때문이다.

Fig. 13은 불평형 자기력 F_x 와 F_y 의 합력 F_r 의 크기와 위상 각을 나타낸다. 불평형 자기력 F_r 은 τ 의

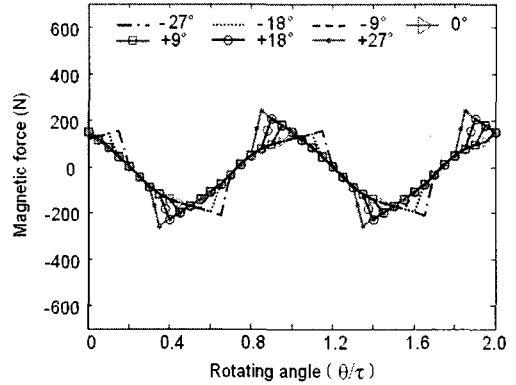


(a) X components

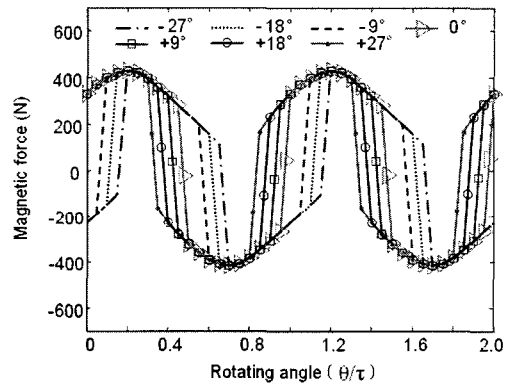


(b) Y components

Fig. 14 Frequency spectrum of magnetic force



(a) X components



(b) Y components

Fig. 15 Magnetic force profile due to commutation delay

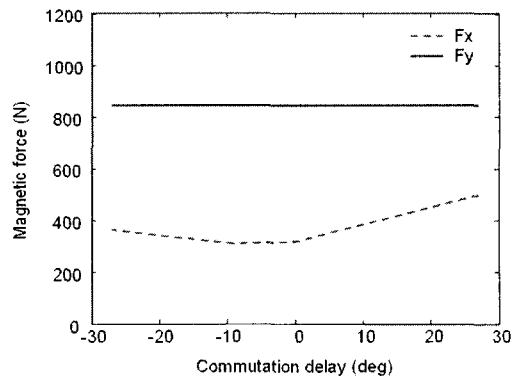


Fig. 16 Ripple of the magnetic force due to commutation delay

주기로 360도 회전하는 것을 알 수 있고 전류를 스위칭하는 지점에서 위상 각이 급격히 변하는 것을 볼 수 있다.

불평형 자기력 F_x, F_y 의 주기는 τ 이고, 이 전동기의 한 극 쌍의 주기는 2τ 이기 때문에 전동기가 1회전할 때 자기력 파형은 극 쌍수의 두 배만큼 반복된다. 따라서 불평형 자기력의 가진 주파수는 극 쌍수의 두 배와 속도(rev/s)의 곱의 정수 배로 표현할 수 있다.

$$f_m = 2 \cdot p \cdot f \cdot i \quad (2)$$

여기서 f_m, p, f, i 는 각각 불평형 자기력의 가진 주파수, 극 쌍수, 회전 주파수, 정수이다. 이 전동기의 정격 속도는 300rpm (5Hz)이므로 기본 가진 주파수는 320 Hz가 된다. Fig. 14는 자기력 F_x 와 F_y 의 주파수 분석 결과로, 식 (2)에서와 같이 불평형 자기력의 가진 주파수는 회전 주파수의 64, 128, 192 등의 고조파로 표시된다.

Fig. 15와 Fig. 16은 전류의 정류 위상 차에 대한 불평형 자기력의 파형과 리플의 크기를 나타낸다. 전류의 스위칭이 적절하게 일어나지 않으면 불평형 자기력 F_x 리플의 크기는 증가하지만 F_y 리플의 크기는 변하지 않는다. 그 이유는 전류가 스위칭 될 때 F_x 는 최소값 또는 최대값을 갖지만 F_y 는 그렇지 않기 때문이다.

위와 같은 해석 결과들로 회전형 이상 횡자속형 전동기는 매우 큰 불평형 자기력이 발생하는 것을 확인하였다. 이 불평형 자기력은 전동기에 심각한 진동과 소음을 유발시킬 수 있기 때문에 이것을 감소시킬 수 있는 방안이 필요하다.

4. 해결 방안

회전형 이상 횡자속형 전동기는 회전 비대칭형 구조이기 때문에 심각한 진동과 소음을 유발시킬 수 있는 불평형 자기력이 발생하게 된다. 따라서 불평형 자기력을 제거하기 위해서는 이 전동기를 회전 대칭형 구조로 설계 변경해야 한다. Fig. 17은 네 개의 고정자로 구성된 회전형 4-고정자 이상 횡자속형 전동기의 고정자를 나타낸다. 네 개의 고정자는 각각 6.5개의 치가 존재하며 실제로 토크를 발생시

키는 유효 극 쌍수는 26개이다. A상과 B상에 인가하는 전류는 서로 전기각 90도의 위상 차를 갖고 또 고정자 A와 B의 치가 직면하는 극의 위치가 서로 전기각 90도의 위상 차를 갖는다. 그리고 전류 A상이 인가되는 두 고정자는 서로 대칭이고 전류 B상이 인가되는 두 고정자도 서로 대칭이다. 따라서

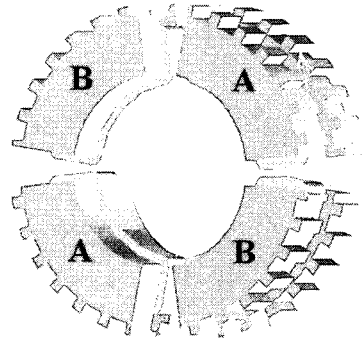
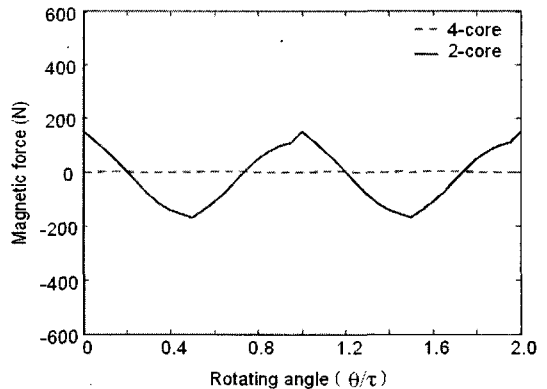
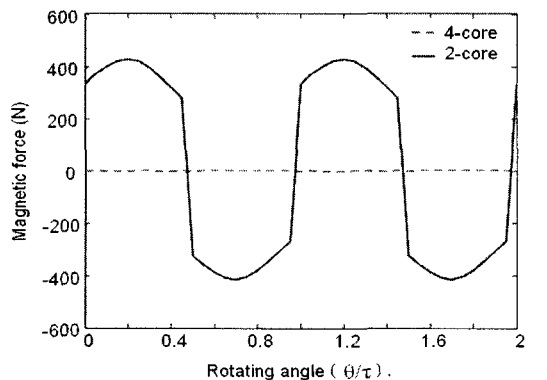


Fig. 17 Stator of rotary four-core two-phase TFM



(a) X components



(b) Y components

Fig. 18 Magnetic force of 4-core and 2-core model

각 상에서 발생하는 자기력은 모두 상쇄된다. Fig. 18은 4-고정자 모델과 2-고정자 모델의 불평형 자기력을 나타낸다. 2-고정자 모델의 불평형 자기력은 매우 크지만 4-고정자 모델의 불평형 자기력은 0으로 상쇄되는 것을 알 수 있다. 그러나 4-고정자 모델과 2-고정자 모델의 토크를 발생시키는 유효극 쌍수는 각각 26개, 29개이기 때문에 2-고정자 모델의 토크가 더 크게 나타난다. 4-고정자 모델과 2-고정자 모델의 평균 토크는 각각 18.68 Nm, 20.74 Nm이고, 토크 리플은 각각 8.33 Nm, 9.02 Nm 이다. 또한 4-고정자 모델을 실제 제작할 시에는 공극의 공차, 회전자의 편심, 불균일한 SMC재질 등에 의해 불평형 자기력이 발생할 수 있다⁽⁸⁾.

5. 결 론

이 논문은 회전형 이상 횡자속형 전동기에서 발생하는 토크와 불평형 자기력을 3차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 회전형 이상 횡자속형 전동기는 정류 위상 차가 증가하면 평균 토크가 감소하고, 토크 리플이 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 회전형 이상 횡자속형 전동기의 각 상에 인가되는 전류와 각 상에 대응하는 고정자 치의 구조가 전기각 90도 위상 차를 갖기 때문에 회전 불평형 자기력이 발생하며, 불평형 자기력의 가진 주파수는 회전 주파수와 극 쌍수 2배의 곱의 정수 배로 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 불평형 자기력은 다른 형태의 전동기와는 달리 회전형 이상 횡자속형 전동기의 구조 때문에 발생한다. 따라서 이 전동기에서 발생하는 불평형 자기력을 제거할 수 있는 회전형 4-고정자 이상 횡자속형 전동기를 제안하였고, 해석 결과 4-고정자 이상 횡자속형 전동기의 불평형 자기력이 0이 되는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Weh, H. and May, H., 1986, "Achievable Force Densities for Permanent Magnet Machines on New Configurations", Proceedings of International Conference on Electrical Machines, Vol. 11, pp. 7~11.
- (2) Maddison, C. P., Mecrow, B. C. and Jack, A. G., 1998, "Claw Pole Geometries for High Performance Transverse Flux Machines", Proceedings of International Conference on Electrical Machines, Vol. 1, pp. 340~345.
- (3) Kang, D. H. and Jeong, Y. H., 2001, "A Study on the Design of Transverse Flux Linear Motor with High Power Density", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) 2001, Vol. 2, pp. 707~711.
- (4) Guo, Y. G., Zhu, J. G., Watterson, P. A. and Wu, W., 2003, "Design and Analysis of a Transverse Flux Machine with Soft Magnetic Composite Core", Proceedings of International Conference Electrical Machines (ICEM) 2003, Vol. 1, pp. 153~157.
- (5) Ahmed Masmoudi, Anis Njeh, Ahmed Elantably, 2005, "On the Analysis and Reduction of the Cogging Torque of a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Machine", European Transactions on Electrical Power, No. 15, pp. 513~526.
- (6) Jang, G. H. and Lieu, D. K., 1996, "Analysis of the Magnetic Force and the Torque in a Brushless DC Motor", Journal of the KSME, Vol. 10, No. 1, pp. 37~48.
- (7) Jang, G. H. and Yoon, J. W., 1996, "Torque and Unbalanced Magnetic Force in a Rotational Unsymmetric Brushless DC Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 5157~5159.
- (8) Hwang, G. B., Kim, K. T. and Hwang, S. H., 2001, "Comparison of Vibration Characteristics in IPM and SPM BLDC Motors with Rotor Eccentricity : (1) Electro-magnetic Force Due to PM", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 9, pp. 454~461.