영구자석을 이용한 소형 플라이휠 시스템의 설계 및 검증
Design and Validation of a Micro Flywheel System with Permanent Magnets

이학인[1], 유승열[1], *#노명규[2]
H. Lee[1], S. Yoo[1], *#M. Noh[2] (mnoh@cnu.ac.kr)
[1] 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단, [2]충남대학교 메카트로닉스 공학 전공

Key words : Micro flywheel, Flywheel energy storage system, Permanent magnet bearing, Toroidally-wound BLDC motor

기호설명

μ_0 : 공기중의 투자율
g : 고정자와 회전자 사이의 공극
k_b : 너비 상수
k_r : 반경 상수
L_B : 베어링의 축 방향 길이
N_{layer} : 적층 된 영구자석의 수
H_c : 포화 보자력
D_B : 평균 공극의 직경
t_{rm} : 회전자에 적층 된 영구자석의 반경 방향 두께
t_{sm} : 고정자에 적층 된 영구자석의 반경 방향 두께

1. 서론

플라이휠은 관성모멘트를 크게 해서 회전 속도를 고르게 하여 안정성을 높이기 위한 회전체이다. 이러한 원리로 플라이 휠은 프레스 기계나 자동차 분야에서 많이 사용이 되고 있다. 이러한 플라이휠을 에너지 저장을 하는 분야에서 사용할 수 있는데 이것이 플라이휠 에너지 저장장치 또는 플라이휠 배터리이다. 플라이휠 에너지 저장 장치란 입력되는 전기적인 에너지를 회전하는 운동 에너지로 변환시켜 저장하고, 필요 시 다시 전기적인 에너지로 변환하여 내보내는 장치이다. 이것은 매우 높은 효율과 반영구적인 수명을 가지고 있으며 친환경적인 시스템으로서 기존의 화학적인 에너지 저장 장치를 대체하기 위해 최근 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.
본 논문에서는 플라이휠 에너지 저장 장치의 효율 높이기 위해 사용하는 수동형 영구자석과 환형권선 브러시리스 직류 전동기의 설계와 유한 요소법을 이용한 설계의 검증에 대해 기술 하고자 한다.

2. 초소형 플라이휠 시스템

2.1 시스템 구성

Fig.1 는 초소형 플라이휠 시스템의 개략도이다. 회전자의 중심에 작은 플라이휠이 위치하며 모터/발전기를 위한 영구자석으로 구성되어있다. 수동형 자기베어링은 회전자와 고정자 각각 환형의 영구자석으로 구성되어 있으며 서로 척력을 내도록 자화 되어 있다.(1) Fig. 1 에는 표시되지 않았지만 축 방향의 안정은 기계적 베어링에 의해 이루어진다.

모터/발전기는 환형권선 브러시리스 직류전동기 사용하였으며 이는 손실이 매우 작고 넓은 공극에서 사용 할 수 있는 장점이 있다.(2,3)

2.2 수동형 자기베어링

수동형 자기베어링의 설계목표는 주어진 자석의 부피에서 반경방향으로의 최대강성을 만들어 내는 것이다.

베어링 반경 방향 강성은 고정자 및 회전자 자석의 두께, 공극의 길이, 축 방향 길이, 자석의 세기 등에 의해

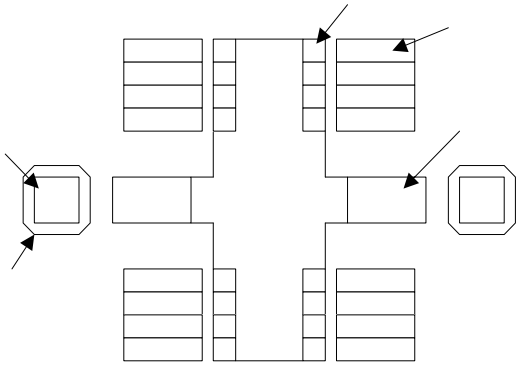

Fig. 1 The schematic diagram of micro flywheel system

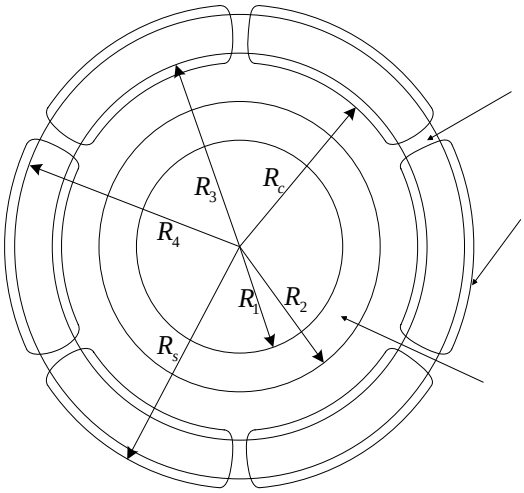

Fig. 2 The geometry of toroidally-wound BLDC motor

결정되며 이러한 관계를 등가 전류판 방법(1)을 이용하면 이러한 관계를 해석적으로 구할 수 있으며 이를 통해 수동형 자기 베어링을 설계 할 수 있다.

2.3 모터

모터는 환형 권선 브러시리스 직류전동기(BLDC) 타입을 사용하였고, Fig. 2 는 이 2 극 BLDC 의 기본 구조이다. 고정자 철심은 3 상 입력을 가지며 2 개의 그룹으로 나뉘는 6 개의 코일을 지지한다. 한 코일에 의해 생성되는 자화는 쌍이 되는 위상에 의해 상쇄되기 때문에 철심에는 아주 작은 히스테리시스 손실만 생기게 된다.

모터의 설계 식은 공극에서의 자속밀도를 해석적으로 구함으로써 얻을 수 있다. 공극에서의 자속밀도는 각도에 따라 정현파 모양으로 가정하여(5)

$$B_r = \mu_0 H_c \left[\left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{R_3}{r} \right)^2 \right] \cos\theta \qquad (1)$$

와 같이 구할 수 있다.

Table. 1 Parameters of Reference Machine

Parameter	Symbol	Value
Number of pole pair	p	1
Inner radius of rotor magnet	R_1	13.5mm
Outer radius of rotor magnet	R_2	20.0mm
Radius to the coil	R_c	21.2mm
Inner radius of stator iron	R_3	25.0mm
Outer radius of stator iron	R_4	36.0mm
Axial length	L	6.0mm
Coercivity of rotor magnet	H_c	883KA/m

이를 이용하여 토크방정식을

$$T = k_t I_0 \tag{2}$$

와 같은 형태로 얻을 수 있다.

3. 시스템 설계 및 검증

3.1 수동형 자기베어링

수동형 자기베어링의 강성을 계산하기 위해서 유한요소 해석(Finite Element Method, FEM)을 사용하거나, Maxwell 방정식에 기초한 해석적 방법 등이 사용되었다. 유한 요소 해석 방법은 정확도가 높지만 계산 시간이 오래 걸려 설계 변수에 따른 최적 설계에 어려움이 있다. 또한 해석적인 방법은 유도 과정에서 사용한 여러 가정들로 인해 정확도가 떨어지고 따라서 설계의 신뢰도를 확보하기 어렵다.[4]

이러한 문제들을 해결할 수 있는 방법 중 하나가 영구자석을 등가 전류판(Current sheet)을 이용하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 계산 시간이 빠른데다 정확도도 비교적 높아 수동형 자기베어링의 최적 설계에 적합하다.[4]

검증된 설계 방법에 따라서 영구자석을 이용한 자기베어링은 axial array 방법을 가지고 4 개의 링 타입의 희토류계 영구자석으로 구성 하였다. 고정자 부분의 영구자석 바깥쪽 반지름은 17.5mm 이고, 회전자 부분의 영구자석의 안쪽 반지름은 8mm, 바깥쪽 반지름은 10mm 이고 회전자와 고정자 사이의 공극은 0.2mm 이다. 자석의 층당 축 방향 두께는 4mm 이다.[5] 이 값으로 반경 방향 강성을 구하면 107×10^3 N/mm 이다.

3.2 모터

모터의 축 방향 길이는 6mm 로 적층 하였고 고정자 철심의 바깥쪽 반지름은 36mm, 안쪽 반지름은 25mm 이고 회전자 자석의 바깥쪽 반지름은 20mm, 안쪽 반지름은 13.5mm 이고 두께는 6mm 이다. 이 실험에서 사용된 장치는 고정자 철심만 가지고 있다.

각 상의 권선 수는 100 이며 공극의 길이는 1mm 이다. Table 1 에 설계 파라미터 값이 요약 되어있다.[5] 모터 설계를 검증하기 위해서 설계 식을 통해 얻은 공극에서의 자속밀도 (B_r)와 토크 상수(K_r) 값을 실험 및 유한 요소해석 결과와 비교하였다. Fig. 3 은 모터 공극에서의 자속 밀도를 식(3)에 의해 구한 것과 유한요소 해석 결과 및 실험 결과와 비교한 그래프이다. 식(3)에 의한 자속밀도는 유한 요소 해석 결과와 매우 일치하는 경향을 보인다. 실험 결과와는 뚜렷한 차이를 보이는데 특히 180 도 부근에서 큰 차이는 자석 제작 상에 오류에 기인한 것으로 추정된다.

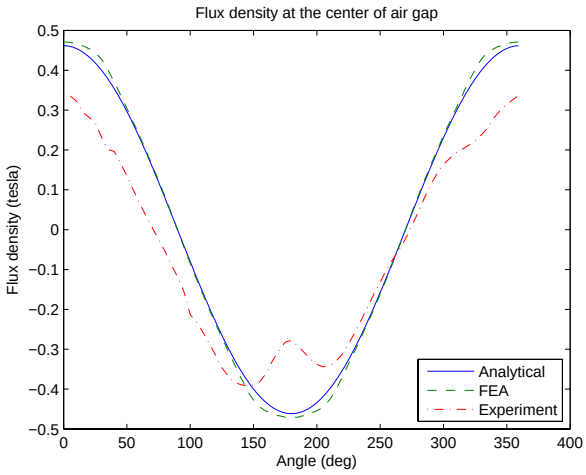

Fig. 3 Flux density at the center of the air gap

설계 식으로부터 구한 토크 상수는 0.167 Nmm/A, 유한요소 해석 결과인 0.174 Nmm/A 와 4% 이하의 차이를 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 영구자석을 이용한 소형 플라이휠 시스템의 설계를 위하여 수동형 자기베어링과 환형권선 브러시리스 모터의 설계방법을 제시 하였다. 설계 식은 유한 요소법과 실험을 통해 검증 하였다. 수동형 자기 베어링의 경우 설계 식에 의한 반경 방향 강성계수는 유한 요소 법에 의한 결과와 6 %이내로 일치 하였다. 모터의 공극 자속밀도와 토크 상수의 경우 설계 식에 의한 결과는 유한 요소법의 결과와 5%이내로 일치 하였다. 실험으로 측정된 공극 자속 밀도와는 뚜렷한 차이를 보였다. 실험을 통한 설계의 검증을 위해 보다 균일한 자석의 제작이 필요하며 토크 상수 및 역기전력 측정을 통해 설계 식의 보정이 이루어 져야 한다. 실험을 통해 보정된 설계 식은 초소형 플라이휠 시스템의 최적 설계에 활용 될 것이다.

참고문헌

1. J. Yi, Y. Yoo and M. D. Noh, “Optimal Design of Passive Magnetic Bearings,” *ICMDT*, 2007.
2. L. W. Langley and R. L. Fisher, “Toroidally Wound Brushless DC Motor”, *US Patent 4*,547, 1985.
3. F. Caricchi, F. Crescimbini, and O. Honorati, “Low-Cost Compact Permanent Magnet Machine for Adjustable-Speed Pump Application,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No. 1, pp.109-116, 1998
4. J. Yi, Y. Yoo and M. D. Noh, “Optimal Design of Passive Magnetic Bearings using Permanent Magnets”*KSPE*, 2007.
5. J. Yi, Y. Yoo and M. D. Noh, “Design of Micro Flywheel Energy Storage System ”*KSME*, 2007.