

고장허용 회전체 자기베어링 시스템의 설계 연구

조성락*, 경진호⁺, 노승국⁺, 박종권⁺

A Study on the Design of a Fault-Tolerance Rotor Magnetic Bearing Systems

Sungrak Cho*, Jinho Kyung⁺, Seungkook Ro⁺, Jongkweon Park⁺

Abstract

One of the obstacles for a magnetic bearing to be used in the wide range of industrial applications is the failure modes associated with magnetic bearings. These failure modes include power amplifier faults, position sensor faults, and the malfunction of controllers. Fault-tolerant magnetic bearing systems have been proposed so that the system can operate in spite of some faults. In this paper, we designed and tested a fault-tolerant magnetic bearing system. The system can cope with the actuator faults as well as the faults in position sensors, which are the two major fault modes in a magnetic bearing system.

Key Words : Magnetic Bearing(자기베어링), Fault-Tolerance(고장허용)

1. 서론

자기베어링 기술은 현재 많은 산업현장에서 적용하는데 큰 문제점 중 하나는 자기베어링 시스템의 신뢰도이다. 일반적인 기계식 접촉 베어링에서 예상할 수 없는 자기베어링의 고장은 전체 회전축 시스템에 큰 영향을 주게 된다. 자기베어링의 고장 유형으로는 정전, 정력 증폭기 고장, 위치 센서 고장 그리고 제어기의 고장을 들 수 있다. 본 연구에서는 고장허용 회전체 자기베어링 시스템의 설계 및 실험에 대해 기술하였다. 이번 연구에서는 액츄에이터 고장과 센서의 고장 허용 알고리즘에 대해 다루었다. 액츄에이터 고장허용을 위해 Meeker 와 Maslen[1]이 주장한 bias linearization 방법을 이용하였다. 또한 센서 고장 허용 알고리즘을 위하여 링 형태의 인덕티브 센서를 이용하였다.

이번 연구에서 개발된 인덕티브 센서의 검증실험을 위하여 회전축 자기베어링 모델로 사용할 터보분자 펌프의 초기 모델을 제작하고 4200 RPM으로 회전시키면서 실험을 하였다. 그 결과로 자기베어링 시스템은 8개의 코일중 3개의 코일이 고장나거나 하나의 센서가 고장나더라도 다시 원상태로 제어되어 고장에 대비할 수 있는 결과를 얻었다.

2. 유도형 위치 센서

개발된 센서의 성능 평가를 위하여 회전축 자기베어링 모델로서 사용한 터보분자펌프에 유도형 위치 센서를 적용하였다. 관련된 실험 시스템을 설명하면 다음과 같다.

* 주저자, 충남대학교 메카트로닉스 공학과 (scho@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전서 유성구 궁동 220

+ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

이번 연구에서는 Fig. 1과 같은 2개의 인덕티브 센서가 사용되었다. 각각의 센서는 링 형태의 유도형 위치 센서로 반경방향의 로터의 움직임을 측정하게 된다[5].

고장 허용 알고리즘을 적용하지 않을 때는 16극의 센서가 4부분으로 나뉘어져서 코일이 감겨지고 마주보고 있는 2개의 코일 그룹은 상대적으로 1축의 로터 움직임을 센싱하게 된다. 센싱 코일은 50%의 Duty Ratio를 가지는 PWM 스위칭 증폭기 집적회로(LMD18200)로 구동되게 된다.

센서 신호의 처리 회로는 Fig. 2와 같이 전류센서와 복조필터로 구성되어 있다. 복조필터는 고역통과필터, 전파 정류기, 저역통과필터로 이루어져 있다. 고역통과필터에서는 위치정보와 관계없는 저주파 잡음을 없애주고 전파 정류기와 저역통과필터의 조합은 코일 전류의 스위칭 잡음으로부터 위치 정보를 추정한다.

3. 액츄에이터 고장허용

액츄에이터 고장 허용 알고리즘은 액츄에이터 또는 파워 앰프가 고장이 나더라도 자기베어링이 충분한 힘으로 회전을 부상시킬 수 있도록 보상하여 주는 시스템이다. 이번 연구에서 사용된 방법은 bias linearization 방법으로, 입력 전류와 출력 힘과의 비선형적인 관계를 선형적으로 근사화하는 방법이다.

일반적으로 반경방향 자기베어링은 힘을 내는 성분의 개수보다 더 많은 극을 가지게 된다. 예를 들면 2축 방향으로 힘을 내기 위해 일반적으로 8극 형태의 고정자가 사용되게 된다. 자기회로 분석을 통해 코일 전류에 의한 자기력은 식 (1)과 (2)처럼 표현될 수 있다.

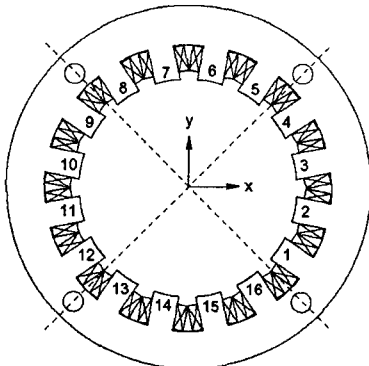


Figure 1. Schematic of the sensor stator

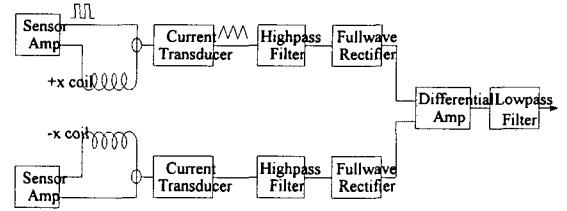


Fig. 2 Sensor Signal Processing Circuit

일반적으로 반경방향 자기베어링은 힘을 내는 성분의 개수보다 더 많은 극을 가지게 된다. 예를 들면 2축 방향으로 힘을 내기 위해 일반적으로 8극 형태의 고정자가 사용되게 된다. 자기회로 분석을 통해 코일 전류에 의한 자기력은 식 (1)과 (2)처럼 표현될 수 있다.

$$F_x = I^T V_x I \quad (1)$$

$$F_y = I^T V_y I \quad (2)$$

식(1), (2)에서 전류 벡터 I 는 코일의 전류이며 공기 간극, 코일의 감긴수 그리고 자기장이 지나는 단면적 등의 함수로 정의될 수 있는 V_x 와 V_y 로 힘이 계산되어 진다.

우리가 원하는 F_x 와 F_y 가 있다고 하면 그것에 해당되는 전류의 해는 위의 식에서 무한대가 된다. 즉, 식 (1)과 (2)의 역관계가 유일하지 않기 때문에 최적해를 (3)에서와 같은 전류분배 행렬을 결정함으로써 선형화를 이룰 수 있다.

$$I = W \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고 전류 분배행렬을 대입하여 힘을 구하면 식 (1)과 (2)는 식 (4)와 (5)와 같이 선형화되어 표현된다.

$$F_x = C_x i_b i_x \quad (4)$$

$$F_y = C_y i_b i_y \quad (5)$$

8극 반경방향 자기베어링에서 전류 분배 행렬의 한 예는 아래와 같다.

$$W = \begin{bmatrix} 0.5051 & 0.4572 & 0.1894 \\ -0.5051 & -0.1894 & -0.4572 \\ 0.5051 & -0.1894 & 0.4572 \\ -0.5051 & 0.4572 & -0.1894 \\ 0.5051 & -0.4572 & -0.1894 \\ -0.5051 & 0.1894 & 0.4572 \\ 0.5051 & 0.1894 & -0.4572 \\ -0.5051 & -0.4572 & 0.1894 \end{bmatrix} \quad (6)$$

고장 허용 알고리즘은 바이어스 전류의 선형화와 힘을 낼 수 있는 코일의 중복성이라는 사실을 이용한다. 만약 몇몇의 코일이 고장났을 때 새로운 전류 분배 행렬이 제어 전류와 관계되어 사용되어지게 된다. 예로, 첫 번째 코일이 고장났을 경우 식(7)의 전류 분배 행렬은 축의 무게를 지지하는데 충분한 힘을 발휘할 수 있게 해 준다.

$$W_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1.01 & -0.6466 & -0.6466 \\ 0 & -0.6466 & 0.2678 \\ -1.01 & 0 & -0.3788 \\ 0 & -0.9145 & -0.3788 \\ -1.01 & -0.2678 & 0.2678 \\ 0 & -0.2678 & -0.6466 \\ -1.01 & -0.9145 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 이론은 8개의 코일중 그 바로 인접하고 있는 방향의 3개의 코일이 고장났다 하더라도 식(8)과 같은 전류 분배 행렬으로 원하는 제어 전류를 생성할 수 있게 된다.

$$W_{123} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.6667 & 0.4483 & -1.5307 \\ 0 & -0.9511 & -2.2961 \\ 0 & -0.9511 & -2.2961 \\ 0 & -0.9511 & -2.2961 \\ -0.6667 & -1.3994 & -0.7654 \end{bmatrix} \quad (8)$$

그러나 연속적으로 3개의 코일이 고장난 경우 자기베어링의 지지 능력은 고장나지 않았을 때의 14% 수준으로 줄어들게 된다.

4. 센서 고장허용

액츄에이터 고장 허용과 마찬가지로 센서고장 허용 동작을 위해서는 센서의 중복성이 필요하다. 따라서 16극의

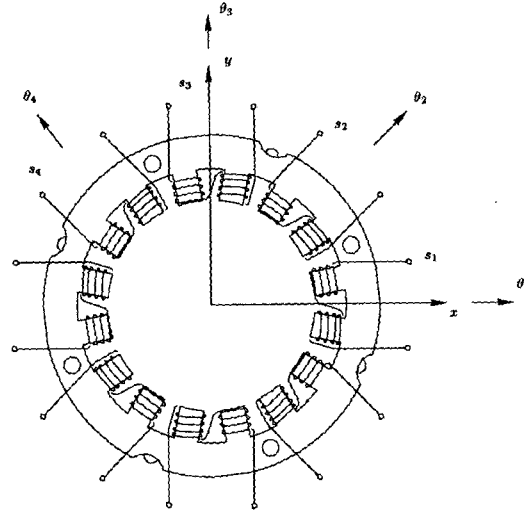


Fig. 3 Fault-Tolerance Inductive Sensor

링 형태의 유도형 위치센서를 Fig. 3와 같이 배열하였다. 즉, 2개의 극을 하나의 코일로 연결하고, 그런 코일 그룹 중 마주보고 있는 것을 쌍으로 사용하여 하나의 축을 담당하는 센서로 사용하였다. 따라서 Fig. 3에서 총 S1, S2, S3, S4까지의 센서 채널을 얻었다. 따라서 센서 네 개의 각도 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ 에서의 센서 출력값 s_1, s_2, s_3, s_4 라고 정의하면,

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \\ \cos \theta_4 & \sin \theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

또는,

$$S = Ax \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (10)은 유일해를 갖지 않으므로 pseudo-inverse를 이용하여 아래와 같이 최적화 해를 구할 수 있다.

$$x = (A^T A)^{-1} A s = G_s s \quad (11)$$

하나의 센서 채널이 고장났을 경우, 행렬 A에서 대응되는 열을 제거함으로써 센서 개인 행렬 G_s 를 구할 수 있다. 그리고 i 번째 채널이 고장났을 때의 센서 개인 행렬을 G_{si} 라고 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = G_{rs} s \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 i 번째 채널 출력을 제외한 나머지 채널의 출력값으로부터 센서 출력을 얻을 수 있다. 이 센서 출력으로부터 모든 채널의 추정출력 Ax_i 를 구할 수 있고 추정 출력과 실제 출력과의 오차를

$$e_i = \|s - Ax_i\|_2 \quad (13)$$

와 같이 구할 수 있다. 이렇게 구한 모든 e_i 가 0이거나 0에 매우 가깝다면 고장 상황이 일어나지 않는 경우이고 반대로 어느 한 e_i 가 다른 3개의 오차보다 일정값 이상으로 크다면 i 번째 채널의 센서 고장 상황으로 판단할 수 있다.

5. 실험 장치 구성

Fig. 4는 터보분자펌프의 전체적인 구성을 보여주고 있다. 모터는 BLDC 모터를 사용하여 회전시키고 있고, 2개의 반경방향 베어링과 1개의 축방향 베어링에 의해 부상되고 있다. 각각의 반경방향 베어링은 8극 형태이고 일반적으로는 2개의 코일이 서로 연결되어 하나의 코일 그룹으로 나뉘지만 액추에이터 고장 허용을 위해서는 8극 모두 독립적으로 제어되어 중복성을 얻어야 한다. 실제로 펌프 회전날개의 무게 때문에 위쪽 반경방향 베어링은 아래쪽 반경방향 베어링보다 큰 구조로 되어있다. 펌프의 작동 시작과 작동 중지를 위하여 2개의 보조 베어링을 사용하였고, 로터와 반경방향 베어링의 공기간극은 0.3mm, 보조 베어링 간극은 0.1mm이다.

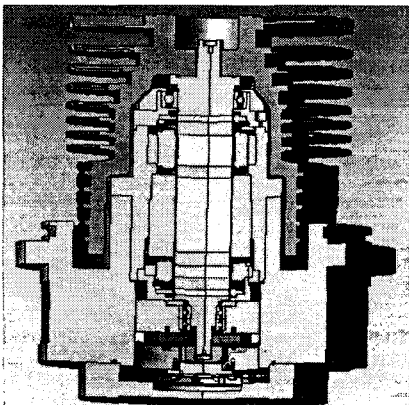


Fig. 4 Schematic diagram of a magnetically levitated turbo-molecular pump

6. 실험 결과

Fig. 5에서 보는바와 같이 2개의 연속적인 코일이 고장 상황일때의 로터의 각 축방향에서의 위치를 나타내고 있다. P계인은 2.4, D계인은 0.002이고 I 계인은 0으로 설정하였다. 모터는 4200rpm 으로 회전하고 있으며 3개의 코일이 고장났을 시점에서 약간 흔들리지만 바로 원래의 로터 위치로 돌아옴을 알 수 있다.

Fig. 6에서 보는 것과 같이 센서와 액추에이터 고장이 동시에 일어났을 경우의 로터의 움직임을 그래프로 나타낸 것이다. 4개의 센서 채널중 하나가 처음으로 끊어지고 나고 다음에는 하나의 코일이 끊어졌을 경우 둘 다 고장이 일어났을 경우에는 움직임이 불안하지만 바로 원래의 움직임대로 작동되는 것을 확인할 수 있다.

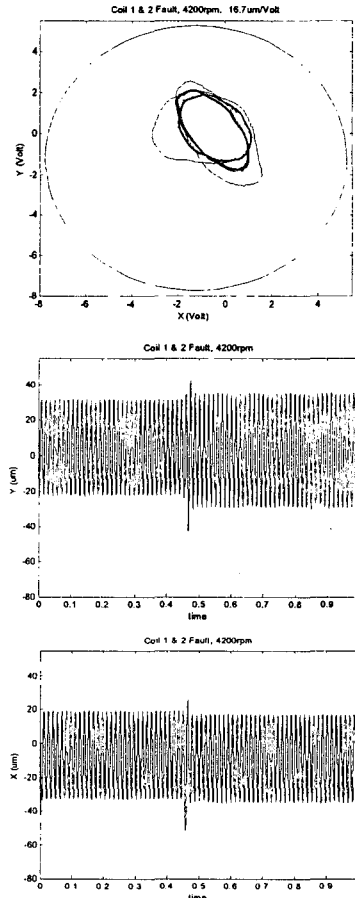


Fig. 5 Loci of the shaft movement before and after actuators failure

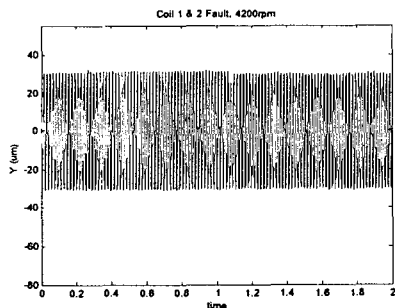
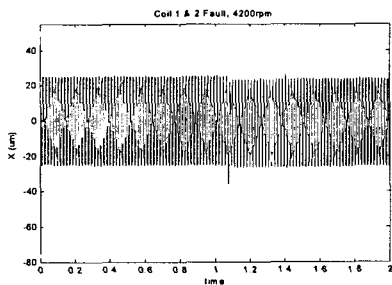
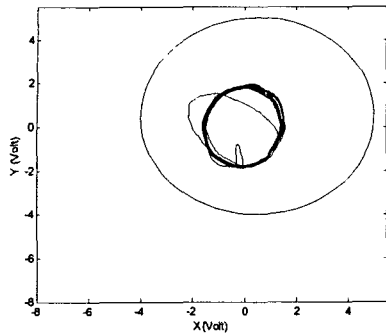


Fig. 6 Loci of the shaft movement before and after sensor and actuator failure

7. 결론

본 논문에서는 회전체에 적용 가능한 고장허용 자기베어링을 설계하였다. 또한 자기베어링 액츄에이터 고장허용 뿐만 아니라, 센서 고장허용에 대한 특성실험을 수행하였다. 액츄에이터가 중복성을 갖도록 설계하고 bias linearization 방법을 사용하여 고장허용 성능을 시험하였다. 또한 센서 고장허용을 위해 역시 센서의 여유를 가지고 그 중에 임의로 하나의 센서를 고장상황을 만든 후, 센서 고장허용 알고

리즘을 적용하여 자기베어링을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

향후, 40,000 RPM급의 운전속도에서 고장허용 알고리즘에 대한 검증 연구를 수행할 예정이다.

참고 문헌

- (1) E. H. Maslen and D. C. Meeker, 1995, "Fault Tolerance of Magnetic Bearings by Generalized Bias Linearization," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.31, No.3, pp.2304-2314
- (2) U. Na and A.B. Palazzolo, 2000, "Fault Tolerance of Magnetic Bearings with Material Path Reluctances and Fringing Factors," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 6, pp.3939-3946
- (3) J. P. Lyons, M.A. Preston, R. Gurumoorthy, and P. M. Szczesny, 1994, "Design and Control of a Fault-Tolerant Active Magnetic Bearing System for Aircraft Engine," in *Proceedings of Fourth International Symposium on Magnetic Bearings*, ETHZurich
- (4) E. H. Maslen, et. al., "Fault Tolerant Magnetic Bearings," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 121, pp.504-508, July, 1999.
- (5) M. D. Noh, M. K. Jeong, B. C. Park, J. K. Park and S. K. Ro, 2002, "Development of Low Cost Inductive Sensor Using Switching Noise Demodulation," in *Proceedings of Eighth International Symposium on Magnetic Bearings*, Mito, Japan
- (6) F. Loesch, 2002, "Detection and Correction of Actuator and Sensor Faults in Active Magnetic Bearing Systems," in *Proceedings of Eighth International Symposium on Magnetic Bearings*, Mito, Japan
- (7) D. C. Meeker, 1995, "Optimal Solutions to the Inverse Problem in Quadratic Magnetic Actuators." *Ph. D. Thesis, The University of Virginia*