

터보분자펌프용 고장허용 자기베어링 시스템 설계 및 개발

조성락[†]·노명규^{*}·박병철^{**}

Design and Implementation of a Fault-Tolerant Magnetic Bearing System For Turbo-Molecular Vacuum Pump

Myounggyu Noh, Byungchul Park and Sungrak Cho

Key Words: Magnetic Bearing(자기베어링), Inductive Sensor(인덕티브 센서), Fault-Tolerance(고장허용)

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, which we don't expect for conventional passive bearings. These failure modes include electric power outage, 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 the system. In this paper, we designed and implemented a fault-tolerant magnetic bearing system for a turbo-molecular vacuum pump. The system can cope with the actuator/amplifier faults as well as the faults in position sensors, which are the two major fault modes in a magnetic bearing system.

1. Introduction

자기베어링이란 자석의 흡인력 또는 반발력을 이용하여 기계적 접촉이 없는 상태로 축을 지지하는 베어링을 말한다. 자기베어링은 자기부상기술을 이용한 비접촉·비윤활 베어링이기 때문에, 마찰·마모없이 고속 회전이 가능하고 깨끗하게 사용할 수 있는 친환경적인 장점을 가지고 있다. 또한 능동제어를 할 수 있기 때문에 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있다.

하지만 자기베어링 기술을 많은 산업현장에 적용하는데 큰 문제점 중 하나가 자기베어링 시스템의 신뢰도이다. 일반적인 기계식 접촉 베어링에서

예상할 수 없는 자기베어링의 고장은 전체 시스템에 큰 영향을 주게 된다. 자기베어링의 고장 유형으로는 정전, 전력 증폭기 고장, 위치 센서 고장 그리고 제어기의 고장을 들 수 있다. 몇 년 동안 자기 베어링 시스템에서 일부분이 고장나더라도 원활히 작동하는 고장 허용 자기베어링 시스템에 대한 연구가 이루어져 왔다.[1,2,3]

예를 들어 전력 정전시에는 보조 전지를 사용하여 전력을 공급해 주거나 재생회로(Regenerative circuit)를 이용하여 회전체의 운동에너지를 전기에너지로 변환함으로써 고장시에도 안정하게 전원을 공급해 준다. 제어기 고장은 추가로 3개의 제어기를 사용하여 제어기들 사이의 출력을 비교하여 고장난 제어기를 찾아 원래대로 시스템을 안정하게 작동시키게 된다[4]. 또한 가장 흔한 형태의 고장인 액츄에이터 고장시에는 여분의 액츄에이터를 이용한 액츄에이터 고장허용 알고리즘[1,2]을 구현하여 제어가 가능하다. 즉, 힘을 발생하는 8개의 코일중 3개의 코일이 고장나더라도 회전체를 지지할 수 있게 된다.

본 연구에서는 터보분자펌프용 고장허용 자기베어링 시스템을 설계하였다. 이번 연구에서는 액츄에이터 고장과 센서의 고장 허용 알고리즘에 대

[†] 충남대학교 대학원

E-mail: scho@cnu.ac.kr

TEL: (042)821-6877 FAX: (041)821-4919

^{*} 충남대학교 메카트로닉스 공학과

^{**} 한국전력연구원

해 다루었다. 액츄에이터 고장허용을 위해 Meeker와 Maslen[1]이 주장한 bias linearization 방법을 이용하였다. 또한 센서 고장 허용 알고리즘을 위하여 링 형태의 인덕티브 센서를 이용하였다. 다극 형태의 인덕티브 센서는 센서의 중복성을 쉽게 얻을 수 있으며 제작하기도 쉽다.

이번 연구에서 터보분자펌프의 초기 모델을 만들고 4200RPM으로 회전시키면서 실험을 하였다. 자기베어링 시스템은 8개의 코일중 3개의 코일이 고장나거나 하나의 센서가 고장나더라도 다시 원상태로 제어되어 고장에 대비할 수 있는 결과를 얻었다.

2. System Description

2.1 Turbo-Molecular Vacuum Pump

Fig. 1은 터보분자펌프의 전체적인 개략도를 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 액츄에이터 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.

2.2 Linear Transconductance Power Amplifier

베어링 코일의 전류는 linear transconductance amplifier에 의해 생성되게 된다. Fig. 2는 전력 증

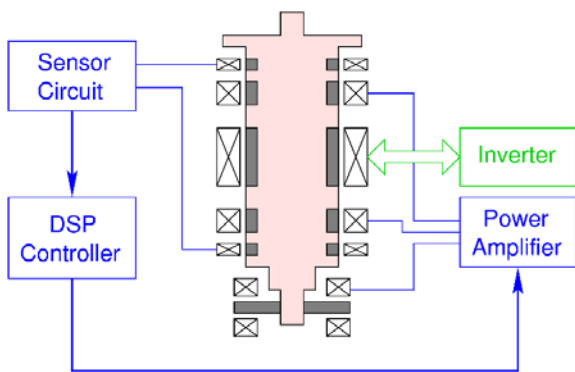


Fig.1 Schematic diagram of a magnetically levitated turbo-molecular pump

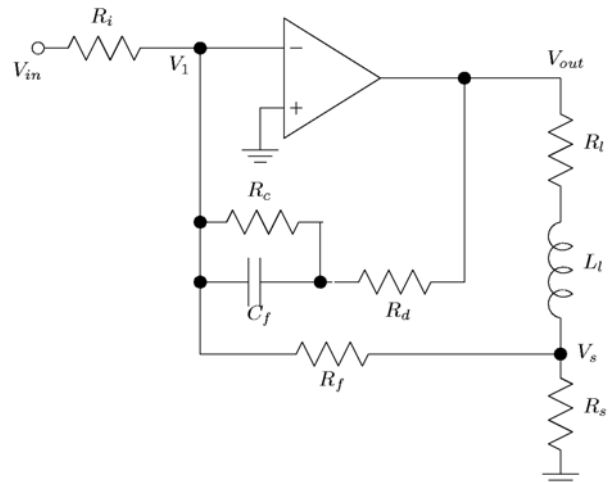


Fig. 2 Schematic of linear transconductance power amplifier

폭기의 전체적인 회로의 구조를 나타내고 있다. 파워 앰프로는 APEX사의 PA21을 사용하였고, 필요한 전력 용량이 작기 때문에(최대 1A) 전류 증폭기의 비효율성은 그리 큰 문제가 되지 않는다.

2.3 Inductive Sensor

이번 연구에서 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 듀티비를 가지는 PWM 스위칭 증폭기 집적회로(LMD18200)로 구동되게 된다.

센서 신호의 처리 회로는 Fig.3과 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.

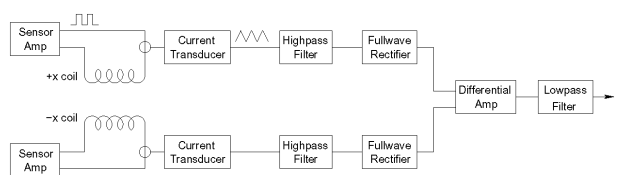


Fig. 3 Sensor signal processing circuit

3. Actuator/Amplifier Fault Tolerance

자기베어링의 고장양상과 전류 증폭기의 고장양상은 결과론적으로 원하는 코일 전류를 만들지 못하는 같은 결과를 나타내게 된다. 그리고 액츄에이터 고장 허용을 위해 충분한 힘을 낼 수 있는 코일을 사용할 수 있어야 하는데, 이는 충분한 부상력을 가지기 위함이다. 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.

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

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

식(1), (2)에서 전류 벡터 I 는 코일의 전류이며 공기간극, 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 각각 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. 예를 들어 첫 번째 코일이 고장났을 경우 식(7)의 전류 분배 행렬은 축의 무게를 지지하는데 충분한 힘을 발휘할 수 있게 해 준다.

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1.01 & -0.6466 & -0.6466 \\ 0 & -0.6466 & 0.2678 \\ -1.01 & 0 & -0.3788 \\ 0 & -0.9145 & -0.3788 \\ -1.01 & -0.2678 & 0.2678 \\ 0 & -0.2678 & -0.6466 \\ -1.01 & -0.9145 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

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. Sensor Fault Tolerance

액츄에이터 고장 허용과 마찬가지로 센서고장 허용 동작을 위해서는 센서의 중복성이 필요하다. 따라서 16극의 링 형태의 유도형 위치센서를 Fig. 4와 같이 배열하였다. 즉, 2개의 극을 하나의 코일로 연결하고, 그런 코일 그룹 중 마주보고 있는 것을 쌍으로 사용하여 하나의 축을 담당하는 센서로 사용하였다. 따라서 Fig. 4에서 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,

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

또는,

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{10}$$

로 나타낼 수 있다.

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

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{s} = \mathbf{G}_s \mathbf{s} \tag{11}$$

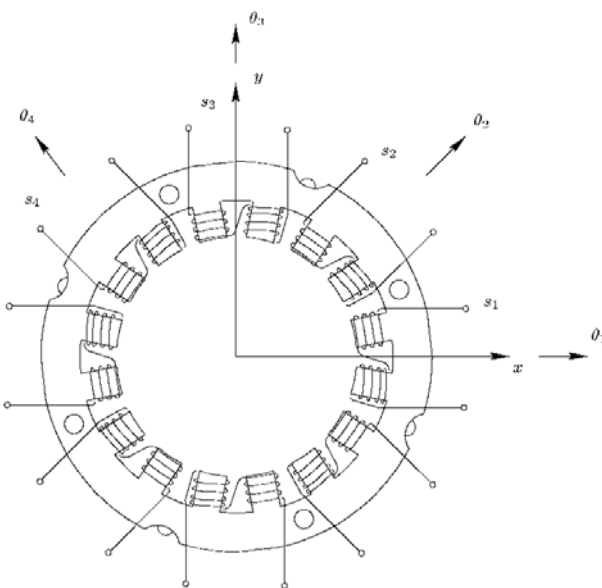


Fig. 4 Fault-tolerant inductive sensor

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

$$x_i = G_{si}s \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{12}$$

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

$$e_i = \|s - Ax_i\|_2 \tag{13}$$

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. Experimental Setup

Fig.5는 실험장치의 구성을 보여 주고 있다. 제어기로는 dSPACE사의 DS1104를 사용하여 고장 허용 알고리즘을 수행하였다. 프로그램에서 제어기로는 일반적인 PID 제어를 사용하였다.

액츄에이터 고장 판별을 위해 홀 형태의 전류 센서로 코일의 전류양을 측정하였다.

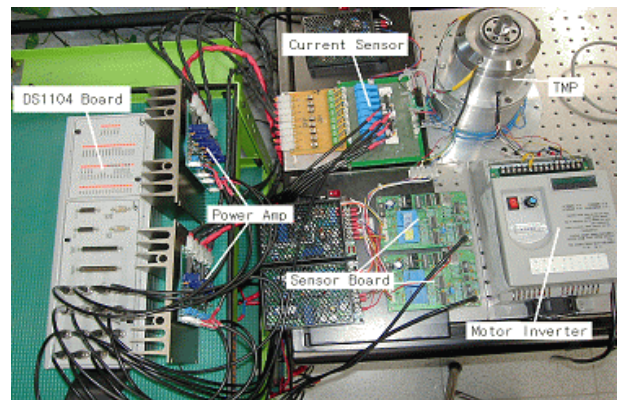


Fig. 5 Experimental Setup

6. Experimental Results

Fig. 6에서 보는바와 같이 3개의 연속적인 코일이 고장 상황일때의 로터의 각 축방향에서의 위치를 나타내고 있다. P계인은 2.4, D계인은 0.002이고 I 계인은 0으로 설정하였다. 모터는 정지 상태이며 3개의 코일이 고장났을 시점에서 약간 흔들리지만 바로 원래의 로터 위치로 돌아옴을 알 수 있다.

Fig. 7에서 보는 것과 같이 센서와 액추에이터 고장이 동시에 일어났을 경우의 로터의 움직임은 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.

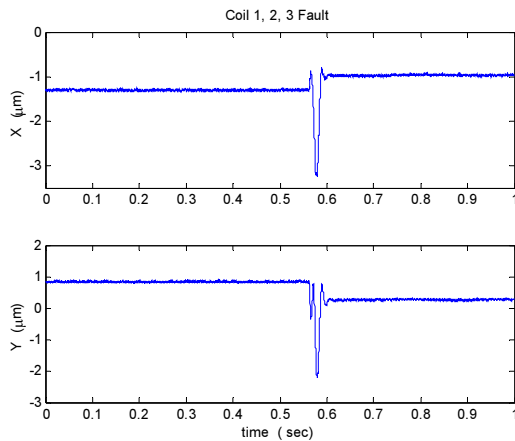


Fig. 6 Loci of the shaft movement before and after actuators failure

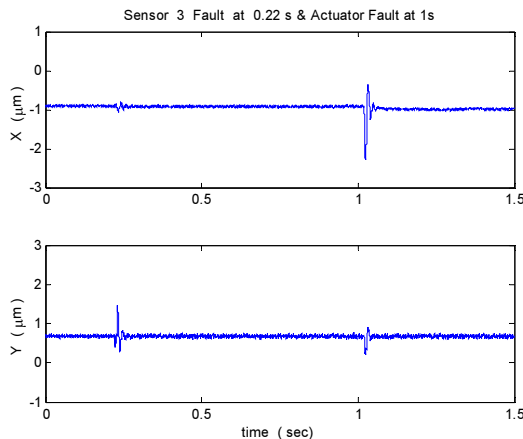


Fig. 7 Loci of the shaft movement before and after sensor and actuator failure

7. Conclusion

본 논문에서는 터보 분자 펌프용 고장허용 자기베어링을 설계하고 개발한 내용에 대하여 기술하였다. 논문의 시스템에서 액추에이터 고장허용 뿐만 아니라, 센서 고장허용 알고리즘 모두를 실험하였다. 고장허용을 위하여 액추에이터의 중복성을 가지고 bias linearization 방법을 사용하여 테스트하였다. 또한 센서 고장허용을 위해 역시 센서의 여유를 가지고 그 중에 임의로 하나의 센서를 고장상황을 만든 후, 센서 고장허용 알고리즘을 적용하여 원래의 x, y 값에 거의 비슷하게 출력을 내면서 자기 베어링을 제어하여 보았다. 따라서 실제 산업의 여러 분야에서 고장상황에서도 자기 베어링을 사용할 수 있다.

또한 펌프의 회전날개를 모두 단 상태에서 40000RPM으로 회전을 시키면서 고장허용 알고리즘을 테스트하는 중에 있다.

참고문헌

- (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*