

자기연성을 이용한 동극형 자기베어링의 고장강건 제어

나연주[#]

Fault Tolerant Homopolar Magnetic Bearings with Flux Coupling

Uhn Joo Na[#]

ABSTRACT

This paper develops the theory for a fault-tolerant, permanent magnet biased, homopolar magnetic bearing. If some of the coils or power amplifiers suddenly fail, the remaining coil currents change via a novel distribution matrix such that the same magnetic forces are maintained before and after failure. Lagrange multiplier optimization with equality constraints is utilized to calculate the optimal distribution matrix that maximizes the load capacity of the failed bearing. Some numerical examples of distribution matrices are provided to illustrate the theory. Simulations show that very much the same dynamic responses (orbits or displacements) are maintained throughout failure events (up to any combination of 3 coils failed for the 6 pole magnetic bearing) while currents and fluxes change significantly. The overall load capacity of the bearing actuator is reduced as coils fail. The same magnetic forces are then preserved up to the load capacity of the failed.

Key Words : Magnetic bearings (자기베어링), Rotor dynamics (회전체동역학), Active vibration control (능동진동제어)

기호설명

a_0 = pole face area of an active pole
 g_0 = nominal air gap in active pole plane
 g_j = air gap of the j-th pole
 i_j = currents through the j-th pole
 I = current vector
 n = number of coil turns
 R_j = air gap reluctance of the j-th pole
 μ_0 = permeability of air
 ζ = flux fringing factor
 ϕ_j = flux through the j-th pole

ϕ_b = bias flux
 v_{cx}, v_{cy} = x and y control voltages
 θ_j = pole angle of the j-th pole
 T = distribution matrix

1. 서론

능동자기베어링 시스템은 자기베어링 구동기, 거리센서, 궤환제어기, 전력증폭기(power amplifier) 등으로 구성되어 회전체를 자기부상 시키고 진동을 제어하는 메카트로닉스 시스템이다. 자기베어링은 전통적인 유막베어링이나 구름베어링에 비해

접수일: 2007년 7월 2일; 게재승인일: 2008년 1월 7일

[#] 교신저자: 경남대학교 기계자동차공학부

E-mail uhnjoona@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2162

마찰에너지 감소, 무운환, 능동 강성 및 감쇠 조정 등 많은 장점을 가져 고속, 고성능의 회전기계에 많은 활용이 되고 있다. 하지만 제어투프에 있는 구성요소 즉 코일이나 전력증폭기 중의 하나라도 고장을 일으키면 전체 제어시스템의 붕괴로 이어지기 때문에 높은 신뢰도를 요구하는 회전기계에는 자기베어링과 같은 능동시스템의 사용이 제한적이다.

자기베어링의 고장강건제어(fault tolerant control)는 자기베어링의 작동 중에 코일이 끊어지거나 전력증폭기가 갑자기 미작동 할 때 이를 실시간으로 감지하여 제어기에서 각 극(pole)에 흐르는 전류를 분배행렬(distribution matrix)을 통하여 재분배하여 고장 이전의 동 특성을 유지하는 제어기법이다. 이극형(heteropolar) 자기베어링의 고장강건 제어기법은 자기베어링 구동기 내의 자기 연성(flux coupling)을 이용하여 몇 개의 극에서 코일전류가 흐르지 않더라도 나머지 작동하는 코일전류를 적절히 재분배하면 고장 이전의 정상적인 자기력을 회복할 수 있다.¹⁻³

이극형 자기베어링과는 달리 동극형(homopolar) 자기베어링은 영구자석을 이용하여 편향자속(bias flux)을 유지하고 코일전류를 이용하여 제어자속을 형성하는 자기베어링의 형태로 구동전력 소모가 적어 높은 에너지 효율을 요구하는 회전기계의 자기베어링으로 적합하다. 많은 연구자들이 동극형 자기베어링의 해석적 기법과 설계기법 및 실험결과를 보고하였다.⁴⁻¹⁰ 영구자석형 동극형 자기베어링의 고장강건제어는 먼저 4 극베어링에 대해 연구되었다.¹¹

한 경우로 고장 이후에 적절한 분배행렬을 이용하면 고장 이전의 C-코어 자속을 유지할 수 있고 고장 이전과 동일한 하중용량을 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 단지 1 개 코일의 고장만 허용되므로 고장강건을 충분히 활용할 수 없는 단점이 있다. 또한 4 개의 코일 중 1 개가 고장난 각각의 고장의 경우의 수에 대하여 하나의 유일한(unique)한 분배행렬이 존재한다. 4 극 동극형 자기베어링의 고장강건 원리는 Fig. 1 에서 설명된다. 동극형 4 극 자기베어링의 정상상태일 때의 분배행렬은 다음과 같다.

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

그러나 Fig. 1 의 네번째 코일이 고장났을 때의 계산된 전류 분배행렬은 다음과 같다.¹¹

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

x 방향과 y 방향으로의 전류는 다음과 같이 분리된다.

$$I_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{cx}, \quad I_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{cy} \quad (3)$$

Fig. 1 (a)의 그림은 I_x 에 의해 분배되어 C-코어 자속이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 1 (b)의 그림은 I_y 에 의해 분배된다. I_y 전류는 연성되어 x 방향으로 전류를 주어 x 방향으로의 자속의 흐름을 막고 y 방향으로 고장이 나지 않은 위쪽의 코일에서 2 배의 전류를 추가하면 고장 이전의 동일한 C-코어 자속을 형성할 수 있다.

본 연구에서는 고장강건 기능이 보장된 5 극 이상의 다극 동극형 자기베어링의 특성을 알아보기 위하여 가장 간단한 6 극 동극형 자기베어링을

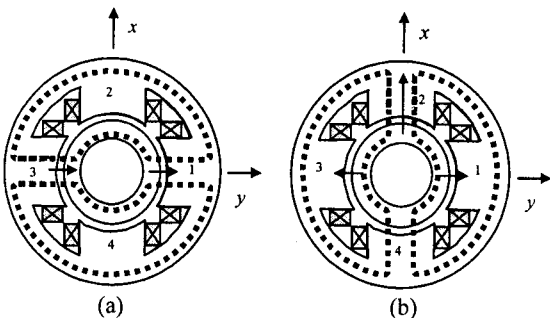


Fig. 1 Schematic of Fault tolerant control of 4-Pole Homopolar Magnetic Bearings

4 극 베어링의 고장강건제어는 구조적으로 특수

모델로 고장강건 해석을 하고자 한다. 즉 6 극 동극형 자기베어링의 특성과 분배행렬의 일반해를 구하고 이에 대응하는 자기베어링 구동기의 설계와 고장강건제어에 필요한 추가적인 하드웨어의 설계방법을 제시한다. 6 극 동극형 자기베어링의 6 개의 코일중 3 개 이하의 코일이 고장났을때의 모든 경우의 분배행렬을 구하는 방법이 제시되고 각각의 분배행렬에 대한 하중용량이 계산된다. 6 극 자기베어링에서 제시된 특성은 더 많은 극 수를 가진 동극형 베어링 (8 극, 12 극 16 극 등)에 적용될 수 있다.

2. 동극형 고장강건 자기베어링 모델

2.1 자기베어링 모델

영구자석형 6 극 동극형 자기베어링은 Fig. 2 와 같이 능동 극평면(active pole plane)의 극에 코일권선이 감겨 제어자속(control flux)을 형성하고 영구자석에 의한 편류자속(bias flux)은 축방향으로 형성된다.

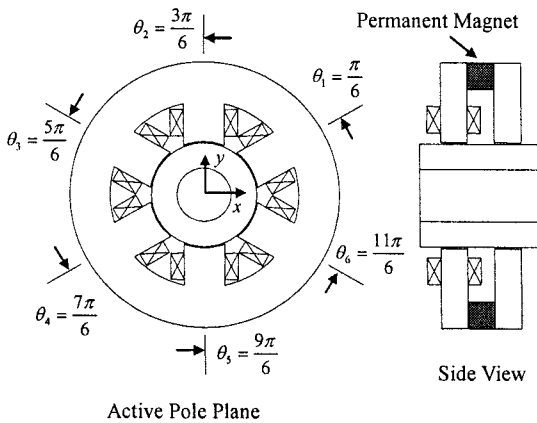


Fig. 2 Schematic of a Homopolar Magnetic Bearing

고장강건제어에 사용되는 6 극 동극형 자기베어링은 능동 극평면(active pole plane)의 각각의 극에 독립적인 6 개의 코일이 감겨 있어 각각의 전력증폭기에 의해 구동된다. 이 경우에는 자기베어링에 흐르는 자속은 전류 입력에 대해 연성(coupled)을 일으킨다. 즉 한쪽 극의 코일권선에 전류를 주어도 전체 6 개의 극에서 자속을 형성한다. 고장강건제어기법은 이러한 자속의 연성효과(coupling effect)와 고장이 나지않은 극의 전류의 재분배를 통하여 코

일전류가 흐르지 않는 극에서도 제어자속을 형성하고 고장 이전의 자기력을 유지하도록 제어하는 방법이다. 와전류효과와 경로 자기저항을 무시하면 맥스웰 방정식은 등가 자기회로로 축약된다. 능동 극평면의 j 번째 공극의 자기저항은 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$R_j = \frac{g_j}{\mu_0 a_0} \quad (4)$$

$$g_j = g_0 - x \cos \theta_j - y \sin \theta_j \quad (5)$$

영구자석의 기자력(magnetomotive force)은 $h_c I_{pm}$ 으로 모델링 되고 회귀경로(return path) 자기저항(reluctance)을 R_R 이라 할 때 암페어법칙과 가우스 법칙을 이용하면 다음과 같은 행렬방정식으로 재구성 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_1 & -R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & -R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & -R_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 + \frac{R_6}{R_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{h_c I_{pm}}{R_R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n & -n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n & -n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n & -n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n & -n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{n}{R_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

또는

$$R\Phi = H + NI \quad (7)$$

능동극평면에 흐르는 자속벡터(flux vector)는

$$\Phi = R^{-1}H + R^{-1}NI = \Phi_b + \Phi_c \quad (8)$$

$$\Phi_c = [\phi_{c1} \ \phi_{c2} \ \phi_{c3} \ \phi_{c4} \ \phi_{c5} \ \phi_{c6}]^T$$

으로 계산되고 코일전류에 의해 발생된 제어자속이 대부분 능동극평면에 흐른다고 가정하면 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\phi_{c1} + \phi_{c2} + \phi_{c3} + \phi_{c4} + \phi_{c5} + \phi_{c6} = 0 \quad (9)$$

식 (9)은 6 개중에 하나의 자속은 나머지 5 개 자속의 합이고 단지 5 개의 독립된 자속만이 존재함을 나타낸다. 하지만 각각의 극에 6 개의 독립된 전류가 공급되고 단지 5 개의 독립된 자속을 형성하면 하나의 전류는 자속을 전혀 생성하지 못하게 된다. 전류가 공급되는데 자속을 형성하지 못하면 인덕턴스는 제로가 되고 스위칭 전력증폭기는 불안정하게 된다. 독립된 코일이 감긴 6 극 동극형 자기베어링의 인덕턴스 행렬은 연성화(coupled) 되어 특이점(singular)이 존재한다. 전력증폭기를 안정화 시키기 위해서는 부가적인 인덕턴스를 형성하여 인덕턴스 행렬을 비연성화(decouple) 시켜 주어야 한다. 인덕턴스의 비연성화를 위해 자기베어링에 감긴 코일은 Fig. 3 과 같이 공통의 전자기 코어에 감기고 전력증폭기에 다시 연결시킨다.¹¹ 전자기 코어에 흐르는 전류들은 추가적인 하나의 자속을 형성하게 되고 6 개의 전류에 6 개의 독립된 자속을 형성하게 된다.

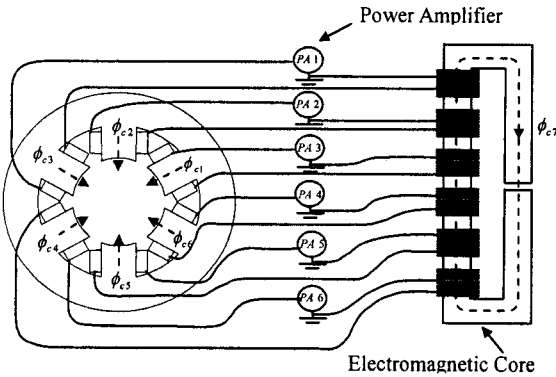


Fig. 3 Homopolar Magnetic Bearing with Independent Coils and a Electromagnetic Core

인덕턴스 행렬의 비연성화를 위한 전자기코어의 설계조건은 다음과 같다.

$$\frac{a_d n_d^2}{g_d} = \frac{1}{6} \frac{a_0 n^2}{g_0} \quad (10)$$

전자기코어의 공극(g_d), 단면적(a_d), 코일권선수(n_d)는 식 (10)에 의해서 결정된다.

2.2 분배행렬

자기베어링에 분배되는 제어전류는 일반적으로 6x2 행렬 T 와 제어 전압벡터(control voltage vector) v_c 로 표시된다.¹¹

$$I = T v_c \quad (11)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x & T_y \end{bmatrix}, \quad v_c = \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix}$$

예를 들면 6 극 동극형 자기베어링의 분배행렬은 다음과 같다.

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ 0 & 1 \\ -\sqrt{3}/2 & 1/2 \\ -\sqrt{3}/2 & -1/2 \\ 0 & -1 \\ \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

제어전압 v_{cx} 와 v_{cy} 는 정상적인 경우에 분배행렬 \tilde{T} 를 통해 각각의 극에 분배된다. 공극에 흐르는 자속밀도는 자기누설에 의해 감소되고 자성체의 포화에 의해 제한된다.

$$B = \zeta A^{-1} R^{-1} I \quad (13)$$

능동극평면에 형성되는 자기력은 다음과 같이 계산된다.

$$f_x = B^T \frac{\partial D}{\partial x} B \quad (14)$$

$$f_y = B^T \frac{\partial D}{\partial y} B \quad (15)$$

공극에너지 행렬은 $D = \text{diag}([g_d a_0 / (2\mu_0)])$ 로 표시된다. 동극형 자기베어링의 자기력은 전압벡터의 형태로 재구성 된다.¹¹

$$f_x = v^T M_x v \quad (16)$$

$$f_y = v^T M_y v \quad (17)$$

$$M_x(\hat{T}) = -G^T \frac{\partial D}{\partial x} G, \quad M_y(\hat{T}) = -G^T \frac{\partial D}{\partial y} G \quad (18)$$

3. 분배행렬의 최적화

3.1 바이어스 선형화

자기력 식 (16) 과 (17)은 베어링의 중심위치와 제로 제어전압(control voltage)의 작동점에서 선형화된다. 코일이 고장 난 자기베어링에 최적의 분배행렬을 이용하면 고장이 나지 않은 정상상태의 자기력과 동일한 선형화된 제어 자기력을 구할 수 있다. 선형화된 제어 자기력을 구하기 위한 필요조건은 다음과 같다.¹¹

$$M_x = k_v \begin{bmatrix} 0 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_y = k_v \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

만약 식(19)을 만족시키는 분배행렬 T 가 존재하면 자기력 (16) 과 (17)는 선형화된 자기력으로 단순화 된다. 고장 전과 후에 동일한 제어력을 유지하기 위한 구속조건은 다음의 식으로 주어진다.¹¹

$$h_j(T) = 0, \quad j = 1, \dots, 10 \quad (20)$$

비선형 대수방정식 (20)의 등제조건(equality constraint)을 만족시키는 분배행렬 \hat{T} 의 해는 한 개 이상 존재한다. 최적의 해를 구하기 위한 비용함수(cost function)는 베어링의 하중용량(load capacity)으로 정하고 라그랑제 승수기법(Lagrange Multiplier)을 이용하여 자속밀도벡터 B 를 최소화하는 방향으로 분배행렬 T 를 구한다. 비용함수는 다음과 같이 정의된다.¹¹

$$J = B(T)^T P B(T) \quad (21)$$

가중행렬(weighting matrix) P 도 역시 하중용량을 최대화하는 방향으로 설정된다. 분배행렬 T 를

구하기 위한 라그랑제 승수기법은 다음과 같이 정의된다.¹¹

$$L(T) = B(T)^T P B(T) + \sum_{j=1}^{10} \lambda_j h_j(T) \quad (22)$$

변수 t_i 와 λ_j 에 대해 식 (22)를 편미분하면 $2q + 10$ 개의 비선형 대수방정식이 구해진다.¹¹

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1(t, \lambda) \\ \psi_2(t, \lambda) \\ \vdots \\ \psi_{2q+9}(t, \lambda) \\ \psi_{2q+10}(t, \lambda) \end{bmatrix} = 0, \quad (23)$$

최적화를 위한 비용함수가 컨벡스(convex)가 아니고 등제조건이 아핀(affine)이 아니므로 여러 개의 국소 최적해(local optima)가 존재한다. 식(23)을 비선형 대수방정식 해석 알고리즘을 이용하여 풀면 국소 최적해를 구할 수 있다. 전역 최적해(global optimum)를 구하기 위해서는 여러가지 초기값을 이용하여 하나 이상의 국소 최적해를 구하고 그 중 최고의 하중용량을 갖는 최적해를 선택할 수 있다.

3.2 최적해의 예

영구자석형 6극 동극형 자기베어링에 대한 분배행렬이 계산되었다. 자기베어링은 공극 g_0 (0.508 mm), 극단면적 a_0 (602 mm²), 코일감김수 n (50 turns)를 가지며 영구자석에 의한 공극 바이어스 자속밀도는 0.8 tesla 로 설계되었다. 정상상태에서의 전압강성 k_v 는 114.95 N/volt 로 계산되었다. 영구자석형 6극 동극형 자기베어링에 대한 위치강성은 전류에 영향을 받지않고 영구자석에 의한 공극에서의 바이어스 자속밀도, 공극, 그리고 극의 단면적에 의해서만 결정된다. 6번째 코일이 고장난 6극 자기베어링의 분배행렬은 여러 개가 존재하고 그중 2개가 식 (23)에 의해 계산되었다. 6극 자기베어링의 6번째 코일이 고장이 난 경우의 첫번째 분배행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$T_6^1 = \begin{bmatrix} 1.5213 & 0.1247 \\ -0.8266 & 1.4789 \\ -0.2481 & 0.1491 \\ -1.6947 & -0.0244 \\ 0.6574 & -1.3720 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

분배행렬 T_6^1 을 식 (18)에 대입하면 다음과 같이 계산된다.

$$M_x = \begin{bmatrix} 0.0000 & 57.4771 & 0.0001 \\ 57.4771 & -0.0046 & -0.0014 \\ 0.0001 & -0.0014 & -0.0151 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 0.0000 & -0.0005 & 57.4772 \\ 0.0000 & 0.0070 & 0.0061 \\ 57.4772 & 0.0061 & 0.0020 \end{bmatrix}$$

위의 두 행렬값 M_x , M_y 는 구해진 분배행렬이 고장강제어 선형화 조건 식 (19)을 만족함을 보여준다. 두번째 분배행렬 T_6^2 은 다음과 같다.

$$T_6^2 = \begin{bmatrix} 1.6394 & 0.1543 \\ -0.8512 & 1.4769 \\ -0.1070 & 0.1778 \\ -1.7177 & -0.0234 \\ 0.7738 & -1.3454 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 0.0000 & 57.4771 & 0.0001 \\ 57.4771 & -0.0001 & 0.0039 \\ 0.0001 & 0.0039 & -0.0172 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 0.0000 & -0.0000 & 57.4771 \\ 0.0000 & -0.0002 & -0.0007 \\ 57.4771 & -0.0007 & 0.0008 \end{bmatrix}$$

같은 방법으로 여러 개의 국소 최적해를 구할 수 있고 구해진 국소 최적해 중에 하중용량이 큰 것을 선택하면 전역 최적해를 구할 수 있다. T_6^1 과 T_6^2 으로 재분배된 고장 난 자기베어링의 하중용량은 Fig. 4에 보여진다. 바깥쪽 궤적은 정상적인 자기베어링의 하중용량을 나타내고 안쪽의 실선은 T_6^1 으로 재분배된 자기베어링의 하중용량이고 점선

은 T_6^2 으로 재분배된 자기베어링의 하중용량을 나타낸다. 하중용량으로 판단하면 T_6^1 과 T_6^2 중에는 T_6^1 이 전역 최적해임을 알 수 있다.

같은 방식으로 3-6번째, 4-6번째, 5-6번째, 4-5-6번째 코일이 고장난 6극 자기베어링의 분배행렬은 다음과 같이 계산되었다.

$$T_{36} = \begin{bmatrix} 1.7321 & 0.0000 \\ -0.8660 & 1.5000 \\ 0 & 0 \\ -1.7321 & 0.0000 \\ 0.8666 & -1.5000 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, T_{46} = \begin{bmatrix} 2.6364 & 1.1611 \\ 1.4885 & 1.9857 \\ -0.8072 & 1.1797 \\ 0 & 0 \\ 2.4163 & 0.1887 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} 0.9668 & 1.6433 \\ -1.1147 & 1.3395 \\ -0.6166 & 1.6590 \\ -1.8799 & -0.0161 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, T_{456} = \begin{bmatrix} 1.6780 & 1.0501 \\ 0.0002 & 1.9262 \\ -1.6776 & 1.0501 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

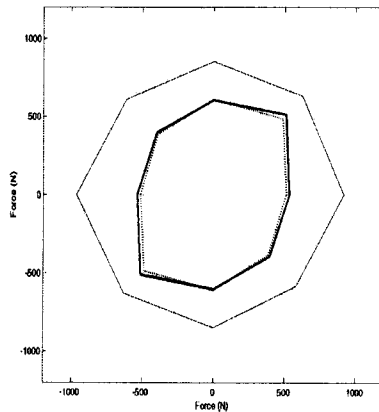


Fig. 4 Load Capacities of the Failed Homopolar Magnetic Bearings with T_6^1 and T_6^2

동일한 방법으로 6극 자기베어링의 3 개 이하의 코일이 고장났을 때의 모든 경우의 수에 대한 분배행렬을 구할 수 있다. 3 개 이상의 코일이 고장났을 경우에는 분배행렬의 해가 존재하지 않는다. 왜냐하면 자기베어링의 임의방향의 자기력을 발생시키기 위해서는 적어도 3 개 이상의 독립된 극(코일)이 필요하기 때문이다.¹²

위의 분배행렬의 결과는 3 개 이하의 코일이 고장났을 경우에도 T_{56} , T_{456} 와 같이 적절한 분배행렬을 사용하면 고장나기 이전과 같은 선형화된 자기력을 구할 수 있음을 보여준다. 그러나 코일 고장의 정도에 따라 자기베어링의 하중능력은 감소한다. 따라서 전류가 재분배된 고장난 자기베어링의 자기력은 하중용량까지만 고장이전의 자기력을 유지한다. T_6 , T_{46} , T_{36} , T_{456} 으로 재분배된 고장난 자기베어링의 하중용량은 Fig. 5 에 계산되어 있다.

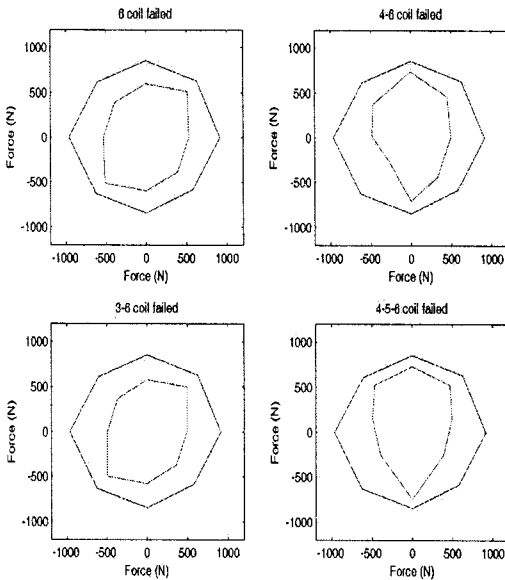


Fig. 5 Load Capacities of the Failed Homopolar Magnetic Bearings

4. 고장강건 제어시스템

분배행렬을 이용한 고장강건 제어시스템의 개략도는 Fig. 6 에 설명된다. 제어기는 궤환 전압제어 부분과 전류분배행렬 업데이트 시스템의 두개의 독립된 부분으로 나뉜다. 고장강건 제어시스템에 사용되는 전압제어법칙은 선형 또는 비선형의 어떤 제어법칙을 사용해도 되지만 본 논문에서는 시스템 안정화에 필요한 간단한 비례-미분제어법칙을 사용하였다.

$$v_{\omega} = K_p \phi + K_d \dot{\phi}, \quad \phi \in (x, y) \quad (29)$$

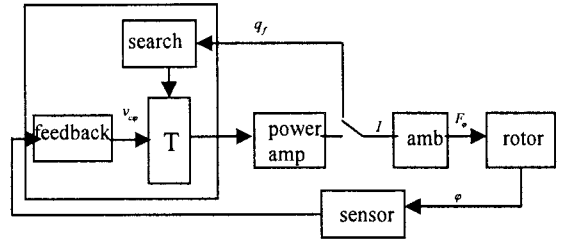


Fig. 6 Schematic of the Fault-Tolerant Controller

코일고장이 발생하더라도 전압제어법칙은 그대로 유지되며 적절한 전류분배행렬 T 만 지속적으로 업데이트 된다. 각각의 코일에는 전류센서가 부착되어 전류가 흐르지 않으면 1 volt TTL 신호, 전류가 흐르면 0 volt TTL 신호가 고장 감지 신호로 제어기에 실시간으로 보내져 6 개의 전류 고장 상태가 모니터링 된다. 예를들면 5-6 번째 코일전류가 흐르지 않는 측정된 고장상태벡터는 다음과 같다.

$$q_f = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T \quad (30)$$

6 극 자기베어링의 3 개 이하의 코일이 고장났을때의 모든 고장상태벡터는 고장상태 테이블행렬로 표시된다.

$$Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m] \quad (31)$$

고장상태 테이블은 DSP 제어기에 저장되어 탐색 알고리즘의 일부로 사용된다. 각각의 고장상태 벡터 q_i 에 대응하는 전류분배행렬 T_i 모두 계산되어 DSP 에 저장된다.

$$\bar{T} = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_m] \quad (32)$$

측정된 고장상태벡터 q_f 는 q_i 와 하나씩 비교하여 q_f 가 q_i 와 일치하면 그에 대응하는 T_i 를 업데이트 하게된다. 고장강건 탐색알고리즘은 DSP 제어기에 쉽게 설치되어 전류센서에 의한 코일고장의 감지, 고장조건에 적절한 전류분배행렬 T 의 탐색과 새로운 T 의 업데이트가 DSP 제어기의 하나의 루프타임 ($> 15K \text{ sec}^{-1}$) 안에서 실행된다.¹³

고장강건제어시스템의 제어 시뮬레이션을 수행

하기 위해 로터의 질량이 12 kg 이고 로터의 무게 중심에 대한 극질량관성모멘트와 횡질량관성모멘트가 각각 0.05 kgm² 와 0.36 kgm² 인 수평형 강체 로터가 사용되었다. 두개의 동극형 자기베어링은 무게중심으로부터 0.22 m 떨어진 위치에 설치되었다. 위상각 90°를 가진 이심율이 1.0×10⁻⁵ m 인 두개의 불평형질량이 베어링 위치에 존재한다. 1 게인값이 1 Ampere/Volt 인 전류증폭기와 감도가 7874 Volts/m 인 와전류 센서는 로패스 필터로 모델링 되어 페루프 제어시스템에 포함되었다.

회전속도 10,000 RPM 에서 회전체-베어링 시스템은 비례제어계인 6 과 미분제어계인 0.01 을 가진 PD 제어기가 사용되고 분배행렬 \tilde{T} 에 의해 전류가 정상적으로 분배되어 제어된다. 이어서 0.05 초 후에 5-6 번째 코일에 전류가 흐르지 않으면 고장강건 제어시스템은 고장을 감지하여 \tilde{T} 를 T_{56} 로 업데이트하고 연이어 0.1 초 후에 4-5-6 번째 코일에 전류가 흐르지 않으면 T_{56} 를 T_{456} 으로 업데이트한다.

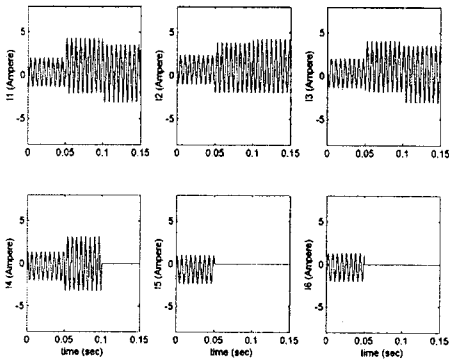


Fig. 7 Current Plot for a Series of Failures

Fig. 7 과 Fig. 8 은 고장강건 제어 시 각 전류와 각극의 자속밀도의 과도응답을 보여준다. 특히 0.1 초 이후에 자기베어링의 가장 심한 경우의 코일 손실 즉 4-5-6 번 코일이 손실되었을 경우에 하부 3 개의 코일 손실을 보상하기 위하여 상부 3 개 극에 자속이 크게 증가하고 자기베어링의 연성효과에 의해 하부 3 개의 코일이 손실된 극(dead pole)에서도 자속이 흐르는 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 4-5-6 번 코일이 손실되었을 때 자속이 정상상태 일 때 보다 2 배 이상 증가 함을 알 수 있다. 이것은 하중(side load)의 증가, 불평형 질량의 증가 등

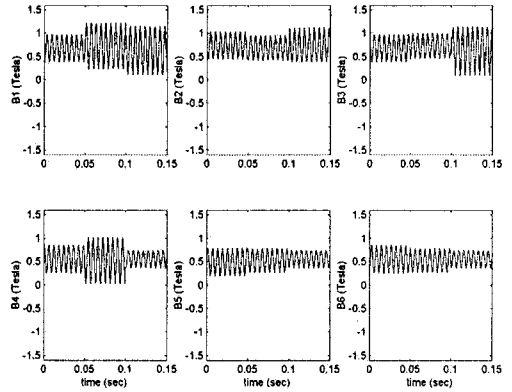


Fig. 8 Flux Density Plot for a Series of Failures

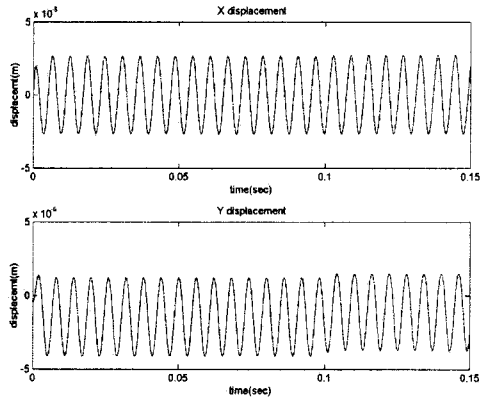


Fig. 9 Displacement Plot for a Series of Failures

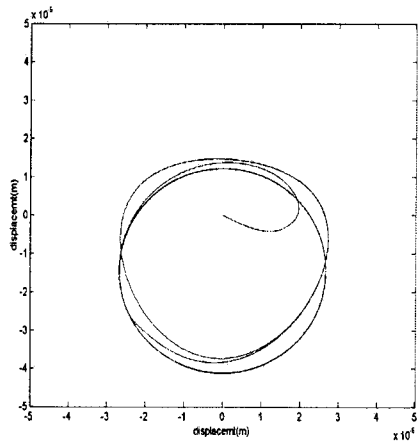


Fig. 10 Orbit Plot for a Series of Failures

외란이 발생할 때 정상적인 자기베어링 보다 쉽게 자기포화가 발생함을 의미한다.

따라서 극심한 코일 손실을 반영한 자기베어링 설계 즉 최소한 2 배의 자기베어링 하중용량을 설계해야 함을 알 수 있다.

Fig. 9 과 Fig. 10 는 고장강건 제어 시의 로터변위를 보여준다 Fig. 7 - Fig. 10 에서 보여진 것 같이 고장이 발생했을 때 고장강건제어시스템이 작동하여 적절히 분배행렬이 업데이트 되면 전류와 자속이 급격히 변하더라도 로터의 동역학적 응답은 거의 변하지 않음을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 영구자석형 6 극 동극형 자기베어링에 대한 고장강건제어시스템의 이론과 수치해석이 수행되었다.

일반적인 5 극 이상의 자기베어링에서는 4 극 베어링과 달리 고장 이후에 고장난 극의 자기력을 보상하기 위하여 고장이 안 난 극(active pole)의 자속이 증가하고 그 결과로 고장이 안 난 극(active poles)이 자기포화에 이르기가 쉬워 자기베어링의 하중용량을 감소시킨다. 따라서 5 극 이상의 자기베어링의 고장강건제어에서 하중감소를 예측하고 그에 따른 자기베어링 구동기의 설계에 반영해야 한다.

5 극 이상의 동극형 자기베어링은 3 개 이상의 고장이 안 난 극만을 유지하면 고장강건제어를 할 수 있다. 즉 6 극 자기베어링의 경우 6 개의 코일 중 3 개까지 코일의 고장이 허용된다. 6 극 동극형 자기베어링은 자속증가에 의해 하중용량의 감소가 이루어 지지만 고장허용 자유도를 늘릴 수 있다. 그러나 각 극의 코일을 독립적으로 제어하기 위한 각 극마다의 전력증폭기와 제어체널이 요구된다.

6 극 동극형 자기베어링의 고장강건 제어는 4 극 자기베어링의 경우처럼 유일(unique)해가 존재하는 것이 아니라 각각의 고장의 경우에 대하여 다중의 분배행렬 해를 가지며 여러 개의 해 중에서 하중용량을 극대화하는 전역 최적해를 구할 수 있다.

영구자석형 동극 자기베어링에 대한 고장강건 시스템은 고효율과 높은 신뢰도가 요구되는 터보기계 시스템에 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 경남대학교 신진교수연구사업의 지원에 의한 것이며 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Maslen, E. H. and Meeker, D. C., "Fault Tolerance of Magnetic Bearings by Generalized Bias Current Linearization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, Issue 3, pp. 2304-2314, 1995.
2. Maslen, E. H., Sortore, C. K., Gillies, G. T., Williams, R. D., Fedigan, S. J. and Aimone, R. J., "A Fault Tolerant Magnetic Bearings," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, Issue 3, pp. 504-508, 1999.
3. Na, U. J. and Palazzolo, A. B., "The Fault-Tolerant Control of Magnetic Bearings With Reduced Controller Outputs," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 123, Issue 2, pp. 219-224, 2001.
4. Kasarda, M. E. F., Allaire, P. E., Norris, P. M., Mastrangelo, C. and Maslen, E.H., "Experimentally Determined Rotor Power Losses in Homopolar and Heteropolar Magnetic Bearings," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, Issue 4, pp. 697-702, 1999.
5. Sortore, C. K., Allaire, P. E., Maslen, E. H., Humphris, R. R. and Studer, P. A., "Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings - Design, Construction and Testing," Proceedings of the Second International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 175-182, 1990.
6. Allaire, P. E., Maslen, E. H., Humphris, R. R., Sortore, C. K. and Studer, P. A., "Low Power Magnetic Bearing Design for High Speed Rotating Machinery," Proceedings of the NASA International Symposium on Magnetic Suspension Technology Part 1, pp. 317-329, 1992.
7. Maslen, E. H., Allaire, P. E., Noh, M. D. and Sortore, C. K., "Magnetic Bearing Design for Reduced Power Consumption," ASME Journal of Tribology, Vol. 118, Issue 5, pp. 839-846, 1996.
8. Lee, A. C., Hsiao, F. Z. and Ko, D., "Analysis and

- Testing of a Magnetic Bearing with Permanent Magnets for Bias,” JSME International Journal Series C, Vol. 37, No. 4, pp. 774-782, 1994.
9. Lee, A. C., Hsiao, F. Z. and Ko, D., “Performance Limits of Permanent-Magnet-Biased Magnetic Bearings,” JSME International Journal Series C, Vol. 37, No. 4, pp. 783-794, 1994.
 10. Fan, Y., Lee, A. and Hsiao, F., “Design of a Permanent/Electromagnetic Magnetic Bearing-Controlled Rotor System,” Journal of the Franklin Institute, Vol. 334B, Issue 3, pp. 337-356, 1997.
 11. Na, U. J., “Fault Tolerant Homopolar Magnetic Bearings with Flux Invariant Control,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 5, pp. 643-651, 2006.
 12. Meeker, D.C., “Optimal Solutions to the Inverse Problem in Quadratic Magnetic Actuators,” Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering, University of Virginia, 1996.
 13. Na, U. J., Palazzolo, A. B. and Provenza, A., “Test and Theory Correlation Study for a Flexible Rotor on Fault-Tolerant Magnetic Bearings,” ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124, Issue 3, pp. 359-366, 2002.