

자기 베어링의 센서리스 제어를 위한 회전축 위치 추정

임정식*, 김장환*, 설승기*, 안형준**, 최상현**
 서울대학교*, (주)D&M

Estimation of Rotor Position for Sensorless Control of Active Magnetic Bearing

Jung-Sik Yim*, Jang-Hwan Kim*, Seung-Ki Sul*, Hyung-Jun Ahn**, Sang-Hyun Choi**
 Seoul National University*, D&M Technology Cop. Ltd**

Abstract - 자기 베어링을 구동하는 코일은 회전축의 위치 정보를 가지고 있다. 따라서 코일의 인덕턴스를 알 수 있으면 위치 센서를 쓰지 않고도 회전축의 위치를 알아낼 수 있다. 본 논문에서는 코일에 고주파 신호를 주입하여 인덕턴스를 알아내고, 이를 통해 회전축의 위치를 추정하는 방법을 제안하고, 실험을 통해 이를 검증한다.

1. 서 론

자기 베어링은 전자기력으로 축을 지지하므로 축과 베어링 사이의 마찰이 없다. 따라서 자기 베어링은 일반적인 베어링을 사용할 수 없는 고속 회전기나, 고온, 고압의 환경으로 인해 축과 베어링 사이에 일반적인 윤활 방법을 사용할 수 없는 특수한 목적의 회전기에 사용될 수 있다. 또한 자기 베어링은 회전자의 위치 동특성을 능동적으로 제어할 수 있기 때문에, 기계적 공진점의 임계 속도(critical speed)에서도 회전을 안전하게 운전할 수 있게 한다.

자기 베어링은 축을 지지하는 과정에서 축의 위치를 계측하는데, 대부분의 위치 센서는 가격이 비싸고, 모터의 인버터 노이즈에 취약하다. 따라서 위치 센서를 쓰지 않고 축의 위치를 계측하여 제어하는 것(센서리스 제어)은 제품의 단가를 낮추고 신뢰도를 높일 수 있는 방법이 된다.

본 논문에서는 자기 베어링의 센서리스 제어를 위한 회전축 위치 추정 방법을 제안하고, 실제 시스템을 구성하여 제안된 방법을 검증한다.

2. 본 론

2.1 자기 베어링의 기본 원리

그림 (1)은 자기 베어링의 기본 원리를 설명하기 위한 간단한 자기 회로를 나타낸다. 이 회로에서 전류에 의한 자속 밀도는 수식 (1)과 같고, 공극에 저장된 에너지는 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 전류와 힘의 관계는 수식 (3)~(4)로 표현된다. 힘은 공극의 에너지를 줄이는 방향, 즉 공극의 크기를 줄이는 방향으로 작용하게 된다.

$$B = \mu_0 \frac{ni}{2s} \quad (1)$$

$$W_a = \frac{1}{2} B_a H_a V_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a 2s \quad (2)$$

$$f = \frac{dW_a}{ds} = B_a H_a A_a = \frac{B^2 A_a}{\mu_0} \quad (3)$$

$$f = \mu_0 A_a \left(\frac{ni}{2s} \right)^2 = \frac{1}{4} \mu_0 n^2 A_a \frac{i^2}{s^2} = k \frac{i^2}{s^2} \quad (4)$$

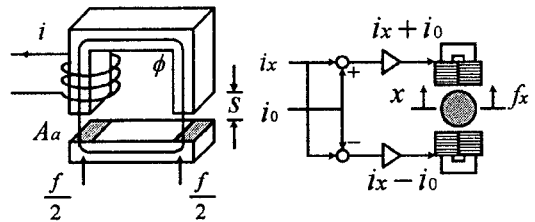


그림 1. 간단한 자기 회로
 i : 전류, n : 코일 권선수
 ϕ : 자기 flux, s : 공극
 A_a : flux 경로의 단면적, f : 힘

그림 2. 통합 정전류 제어법
 i_x : 변위 전류
 i_0 : bias 전류, s_0 : 평균 공극
 x : 변위, f_x : 힘

한편, 이 회로의 자속(Magnetic Flux) Φ 는 식 (5)와 같고, 쇄교 자속(Flux Linkage)은 식 (6)으로 나타내어진다. 이때 코일의 인덕턴스는 식 (7)과 같다.

$$\Phi = B A = \frac{\mu_0 A_a n}{2s} i \quad (5)$$

$$\lambda = n \Phi = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2s} i \quad (6)$$

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2s} \quad (7)$$

일반적인 자기 베어링 시스템의 경우, 그림 2와 같이 두 개의 코일로 하나의 축을 제어한다. 일정한 바이어스 전류를 기준으로 두 코일에 흐르는 전류의 합이 항상 같도록 제어할 때 축에 작용하는 힘 f_x 는 수식 (8)과 같다. 수식 (8)을 $(i_x, x) = (0, 0)$ 부근에서 테일러 급수 전개하여 선형화하면 수식 (9)와 같다. 이를 자기 베어링 선형화 방법 중 가장 기본적인 방법인 통합 정전류 제어법(Constant Current Sum)이라 한다[1].

$$f_x = k \left(\frac{(i_0 + i_x)^2}{(s_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(s_0 + x)^2} \right) \quad (8)$$

$$\approx \frac{4k i_0}{s_0^2} i_x + \frac{4k i_0^2}{s_0^3} = k_i i_x + k_x x \quad (9)$$

이때, 각 코일의 인덕턴스 L_1, L_2 는 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2s_1} = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2(s_0 - x)} \quad (10-1)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2s_2} = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2(s_0 + x)} \quad (10-2)$$

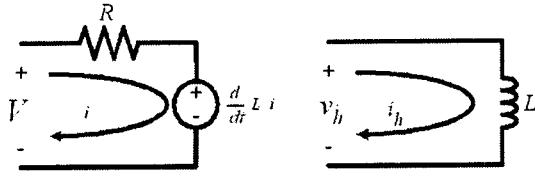


그림 3 (a) coil의 등가회로 (b) 고주파 신호에 대한 등가회로

2.2 고주파 신호 주입 위치 추정법

식 (10)에서 볼 수 있듯이, 자기 배어링은 회전축의 위치에 따라 회전축을 제어하는 코일의 인덕턴스가 변한다. 따라서 코일의 인덕턴스를 구하면 축의 변위를 알아낼 수 있다. 본 절에서는 고주파 신호 주입에 의한 위치 추정법을 제안한다. 이 방법은 고주파 신호를 주입하여 한 축을 제어하는 두 코일의 인덕턴스를 알아내고, 그 차이를 통해 두 코일이 제어하는 축의 변위를 알아내는 방법이다.

그림 3 (a)는 코일의 등가 회로를 나타낸다. 이 때의 전압, 전류 관계식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= R i + \frac{d}{dt}(L i) \\
 &= R i + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \\
 &= R i + L \frac{di}{dt} - i L \frac{1}{s} \frac{ds}{dt}
 \end{aligned} \quad (11)$$

이때, 고주파 전압 v_h 가 인가되고 그때의 고주파 전류를 i_h 라 할 때, R 값이 고주파에서의 인덕터 임피던스에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하면, v_h 와 i_h 사이의 관계는 다음과 같다.

$$v_h \approx L \frac{di_h}{dt} + i_h L \frac{1}{s} \frac{ds}{dt} \quad (12)$$

주입 주파수 ω_h 에 대해 정리하면 식 (12)는 다음과 같다.

$$v_h = (j \cdot \omega_h L + L \frac{1}{s} \frac{ds}{dt}) i_h \quad (13)$$

이때, $\frac{1}{s} \frac{ds}{dt}$ 는 변위의 주파수가 되고, 이것이 주입 주파수 ω_h 에 비해 무시할 수 있을 정도로 작을 경우 $\omega_h L \gg L \frac{1}{s} \frac{ds}{dt}$ 이 되어 식 (13)은 다음과 같이 정리된다.

$$v_h \approx j \cdot \omega_h L i_h \quad (14)$$

그림 3(b)는 이 결과를 등가 회로로 나타낸 그림이다. $V_h = |v_h|$, $I_h = |i_h|$ 라 하면, V_h 와 I_h 의 관계는 다음과 같다.

$$V_h = L \frac{di_h}{dt} = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2s} \omega_h I_h \quad (15)$$

따라서 공극의 크기 s 는 다음과 같이 구해진다.

$$s = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2} \omega_h \frac{I_h}{V_h} \quad (16)$$

각 코일의 주입 전압을 $V_h = |v_{1h}| = |v_{2h}|$, 그 때의 고주파 전류를 $I_{1h} = |i_{1h}|$, $I_{2h} = |i_{2h}|$, 고주파 주입 주파수를 ω_h 라 할 때, 각 코일로부터 공극의 크기를 구하면 다음과 같다.

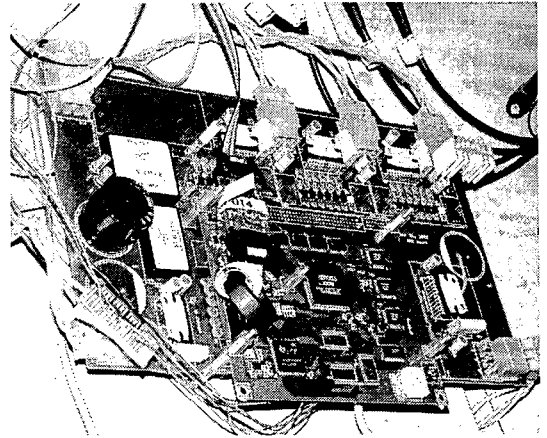


그림 4. 자기 베어링 구동을 위한 파워 보드와 컨트롤러 보드
 파워 보드 : 3상 인버터 5개, 최대 20kHz 스위칭, 각 상당 정격 전류 2A
 컨트롤러 보드 : TMS320VC33, 150MHz clock

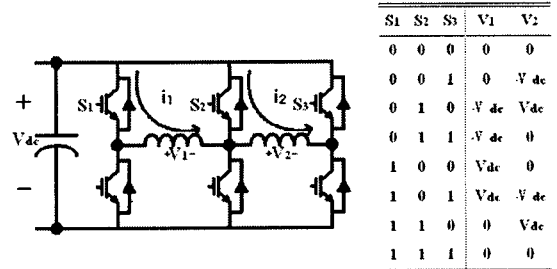


그림 5. 전력 증폭기의 구성

표 1. 스위칭 상태와 인가 전압

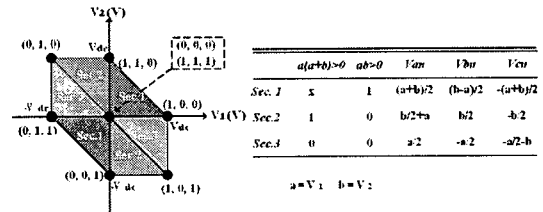


그림 6. 전력 증폭기의 동작 영역 표 2. 동작 영역 구분법과 동작 영역별 극전압(Pole Voltage) 지령치

$$s_1 = s_0 - x = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2} \omega_h \frac{I_{1h}}{V_h} \quad (17-1)$$

$$s_2 = s_0 + x = \frac{\mu_0 A_a n^2}{2} \omega_h \frac{I_{2h}}{V_h} \quad (17-2)$$

따라서 변위 x 는 다음과 같다.

$$x = \frac{1}{2}(s_2 - s_1) = \frac{\mu_0 A_a n^2}{4} \omega_h \frac{1}{V_h} (I_{2h} - I_{1h}) \quad (18)$$

2.3 실험 결과

2.3.1 실험 장치 구성

그림 4는 자기 베어링 구동용 전력 보드(Power Board)와 제어 보드(Control Board)이다. 전력 보드는 5개의 3상 인버터로 구성되어 있으며, 각 인버터의 연속 전류 정격은 2A, 최대 스위칭 주파수는 20kHz이

다. 제어 보드는 TMS320VC33 DSP를 사용하고 있으며, 24개의 A/D 입력과 4개의 D/A 출력을 가지고 있다.

그림 5는 전력 증폭기의 구성을 나타내고, 표 1은 그림 5와 같은 전력 증폭기의 스위칭 상태와 출력 전압 사이의 관계를 나타낸다.[2] 그림 5와 같은 방법으로 전력 증폭기를 구성하는 경우 하나의 3상 인버터로 2개의 코일을 구동할 수 있으므로, 이 시스템은 5개의 3상 인버터를 사용하여 총 10개의 코일, 5 축의 위치를 제어할 수 있다.

그림 6은 전력 증폭기의 동작 영역을 나타낸다. 표 2는 그림 6의 동작 영역에 따른 극전압(Pole Voltage) 지령치를 나타낸다.

그림 7은 자기 베어링 기계부를 찍은 사진이다.

2.3.2 실험 결과

그림 8은 전체 시스템 블록도를 나타낸다. 위치 제어기는 미분을 가지는 비례 적분 제어기(PID)로 구성되었고, 전류 제어기는 비례 적분 제어기(PI)로 구성되었다. 고주파 신호는 전류 제어기 출력에 더해져 파워 앰프로 지령치로 주어졌다. 그림 9는 변위 추정기의 블록도이다. 전류 제어기가 고주파 주입 신호의 영향을 받지 않도록 하기 위해 주파수 차단(Notch) 필터로 고주파 신호를 걸러낸 전류값을 제한(Feedback) 전류값으로 사용하였다. 그림 10은 위치 신호와 추정된 위치 신호를 나타낸 그림이다. 추정된 위치 신호에 직류 성분 오프셋(Offset)이 존재하는 것은, 위치 센서의 0점이 전기적인 0점, 즉 한 축을 제어하는 두 코일의 인덕턴스가 정확하게 0이 되는 점을 고려하지 않은 상태에서 설정되었기 때문으로 생각된다.

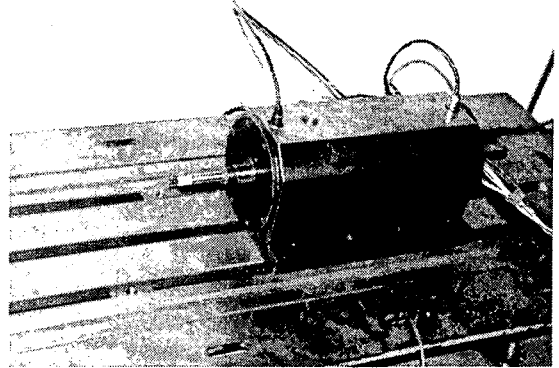


그림 7. 자기 베어링 기계부

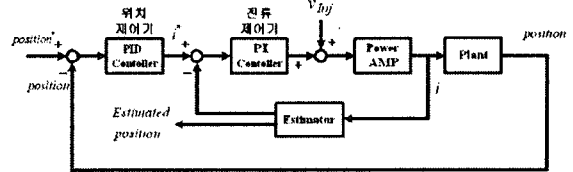


그림 8. 전체 시스템 블록도

3. 결 론

본 논문에서는 자기 베어링의 센서리스 제어를 위한 고주파 신호 주입 회전축 위치 추정 방법을 제안하였고, 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 차후에 추정된 위치 정보를 실제로 제어에 활용하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, Alfons Traxler, "Active Magnetic Bearings : Basics Properties and Applications of Active Magnetic Bearings", vdf Houschulverlag AG der ETH Zurich, 1994
- [2] 정대용, "오프셋 전압에 의한 3상 전압형 인버터 PWM 방식의 일반적 해석", 서울대학교 박사학위논문, 2000년

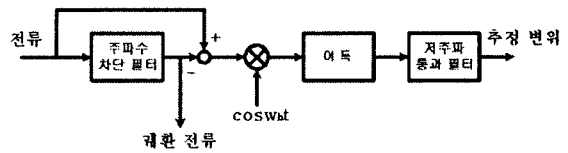


그림 9. 변위 추정기 블록도

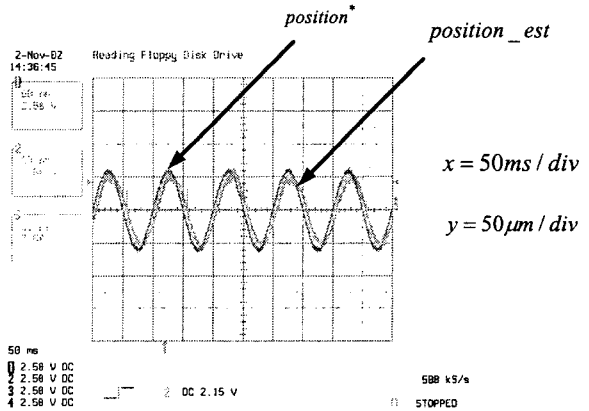


그림 10. 위치 추정 결과