

고속 회전용 자기 베어링 제어를 위한 파워 앰프 및 제어기 설계

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

Power Amplifier & Controller Design for Active Magnetic Bearing

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

Abstract

본 논문에서는 고속 회전기의 자기 베어링을 위한 새로운 파워 앰프(Power Amplifier) 구성 방법에 대하여 논하고자 한다. 그리고 이를 위한 새로운 PWM 구현 방법을 제안한다. 제안된 방법은 6개의 IGBT로 구성된 3개의 암(Arm)을 내장한 파워 모듈(Power Module)을 이용한다. 제안된 방법을 통해 필요한 파워 모듈의 숫자를 줄이면서도 자기 베어링 코일에 효과적으로 전압을 인가할 수 있음을 보인다. 또한 자기 베어링 1자유도 모의 실험 장치를 구성하여 제안된 방법의 실효성을 검증한다.

1. 서 론

펌프, 압축기, 가스 터빈(Turbine) 등에 사용되는 소형 터보(Turbo) 기계는 고속 회전으로 인한 손실을 최소화하고 전체 시스템의 크기를 줄이기 위해 고 효율화, 경량화 등이 추진되고 있으며, 재료, 가공, 그리고 DSP 기술의 발달이 이를 뒷받침하고 있다. 소형 터보 기계의 경우 증속기를 없애는 것이 설치하기에 쉽고 크기 면에서도 유리하며, 특히 소형 터보 블로워(Blower)는 유체력이 크게 작용하여 이로 인한 진동이 크고 축 방향 하중으로 인해 발생하는 손실이 매우 크므로 자기 베어링의 도입이 필수적이다. 자기 베어링의 장점은 다음과 같다. 우선 자기 베어링은 기계적인 접촉 없이 전자기력으로 회전체를 부상시키는 기계 요소이므로 축과 베어링 사이의 마찰로 인한 손실을 줄일 수 있고, 윤활제를 사용하지 않으므로 고온, 진공 환경에서도 사용할 수 있다. 또한 자기 베어링은 능동적인 제어가 가능하기 때문에 기존 베어링의 위험 속도에서도 안정된 회전기운전을 가능하게 하며, 회전축의 변위를 측정하기 때문에 회전기 운전상태 진단 및 감시가 가능하다.

자기 베어링 시스템은 전류를 흘림으로써 전자기력을 만들게 될 코일과 이 코일에 전압을 인가할 파워 앰프(Power Amplifier), 그리고 이 파워 앰프의 출력 전압을 제어함으로써 원하는 전류를 코일에 흐르게 하는 제어기로 나누어 볼 수 있다. 본 논문에서는 범용 IGBT 파워 모듈을 사용하여 파워 앰프를 구성하는 새로운 방법과 이를 위한 PWM 방법에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 자기 베어링의 기본 원리

그림 1은 자기 베어링의 기본 원리를 설명하는 간단한 전자기 회로를 나타내고 있다. 이 회로에서 전류에 의한 자속 밀도는 수식(1)과 같고, 저장된 에너지는 수식(2)로 표현할 수 있다. 이때 전류와 힘의 관계는 수식(3)~(4)로 나타낼 수 있다. 힘의 방향은 공극을 줄이는 방향으로 작용하게 된다.

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

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

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

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

일반적인 자기 베어링 시스템의 경우, 그림 2에 나타난 바와 같이 두 개의 코일을 사용하여 하나의 축을 제어한다. 바이어스 전류로부터 변위 전류를 빼고 더한 것만큼의 전류를 두 코일에 각각 흐르게 하여 두 코일에 흐르는 전류의 합이 일정하도록 할 때, 축에 작용하는 힘 f_x 는 수식 (5)와 같이 나타내어진다. 수식 (5)를 $(i_x, x) = (0, 0)$ 부근에서 테일러 시리즈를 이용하여 선형화하면 수식 (6)과 같이 나타내어진다. 이를 자기 베어링 선형화 방법 중 가장 기본적인 방법인 통합 정전류 제어법(Constant Current Sum)이라 한다[1].

$$f_x = k \left(\frac{(i_0 + i_x)^2}{(s_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(s_0 + x)^2} \right) \quad (5)$$

$$\approx \frac{4k i_0}{s_0^2} i_x + \frac{4k i_0^2}{s_0^3} x = k_i i_x + k_x x \quad (6)$$

수식 (6)에서 보는 바와 같이 변위 x 를 측정하여 각 코일에 흐르는 전류량을 제어함으로써, 하나의 축에 가해지는 힘을 제어하게 된다.

2.2 스위칭 파워 앰프 구성

회전축의 자유도는 5이므로, 자기 베어링 시스템이 회전축의 균형을 잡기 위해서는 5축을 제어하여야 한다. 각 축을 제어하기 위해 2개씩의 코일을 사용하므로, 파

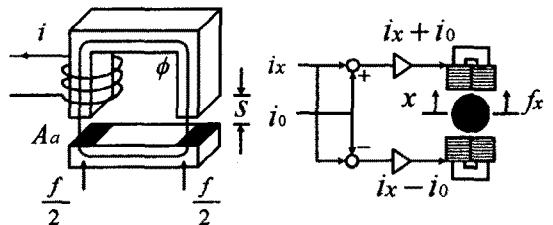


그림 1. 간단한 자기 회로

i : 전류, n : 코일 감은 수

ϕ : 자기 flux, s : 공극

A_a : flux 경로의 단면적, f : 힘

그림 2. Constant Current Sum

i_x : 변위 전류

i_0 : bias 전류, s_0 : 평균 공극

x : 변위, f_x : 힘

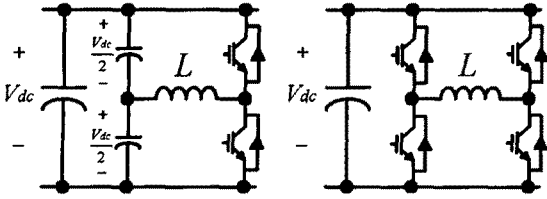


그림 3. Half Bridge

그림 4. Full Bridge

위 앰프는 총 10개의 코일을 구동하여야 한다. 본 절에서는 스위칭 소자를 사용하여 파워 앰프를 구성하는 기존의 방법을 살펴보고, 새로운 구성 방법을 제안한다.

2.2.1 기존의 스위칭 파워 앰프

그림 3과 그림 4는 기존의 반파제어(Half Bridge : HB) 방식과 전파제어(Full Bridge : FB) 방식을 사용하는 경우를 나타내고 있다. HB 방식의 경우 10개의 코일을 구동하기 위해서는 최소 10개의 암(Arm)을 필요 하므로 최소 4개의 파워 모듈을 사용하여야 하며, FB 방식의 경우 최소 20개의 암을 필요 하므로 최소 7개의 파워 모듈을 사용하여야 한다. HB 방식이 보다 적은 소자를 필요로 한다는 점에서 FB 방식에 비해 가격면에서 유리하지만, 코일에 인가할 수 있는 전압의 종류와 크기가 FB방식에 비해 제한적이므로 FB 방식에 비해 전류 리플이 크다는 단점이 있다.

2.2.2 제안된 스위칭 파워 앰프

그림 5는 본 논문에서 제안하는 새로운 파워 앰프 구성 방법과 PWM 방법을 나타내고 있다. 표 1은 각 스위칭 소자의 온-오프 상태와 각 코일에 인가되는 전압과의 관계를 나타내고 있다. 이 방법은 3개의 암을 사용하여 2개의 코일을 구동하기 때문에 5개의 파워 모듈로 전체 코일을 구동할 수 있어 7개의 파워 모듈을 사용하는 FB 방식보다 가격면에서 유리하고, +V_{DC}, 0, -V_{DC} 세 전압을 구현할 수 있기 때문에 +V_{DC}/2, -V_{DC}/2 두 전압만을 구현할 수 있는 HB 방식에 비해 전류 리플 면에서 유리하다. 하지만 이 방법은 그림 6에서 확인할 수 있듯이 FB 방식에 비해 1, 3사분면에서 사용할 수 있는 전압 영역이 다소 감소하게 되는 단점이 있다. 그러나 실제 자기 베어링 시스템의 경우 2, 4사분면의 전압을 주로 사용하게 되므로 이러한 단점이 문제가 되지는 않는다. 표 2에서 앞서 설명한 세 방식을 비교하고 있다. 그림 6은 제안된 PWM 방법을 사용하였을 때의 인가할 수 있는 전압의 동작 영역을 나타낸 그림이고, 표 3은 각 섹터 구분 방법과 섹터 별 극전압(Pole Voltage) 지령치를 나타내 것이다.

2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

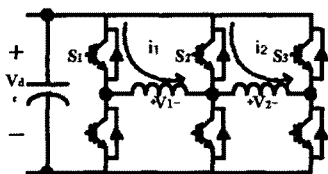


그림 5. 제안된 PWM 방법

S1	S2	S3	V1	V2
0	0	0	0	0
0	0	1	0	-V _{dc}
0	1	0	-V _{dc}	V _{dc}
0	1	1	-V _{dc}	0
1	0	0	V _{dc}	0
1	0	1	V _{dc}	-V _{dc}
1	1	0	0	V _{dc}
1	1	1	0	0

표 1. 스위칭 상태와 코일에 인가되는 전압

그림 7은 제안된 PWM 방법을 이용하여 전류 제어 성능을 확인한 시뮬레이션 결과이다. 5kHz 스위칭, 10kHz 샘플링을 가정하였으며, 코일의 인덕턴스는 40mH로 가정하였다. 전류 제어기는 PI 제어기를 사용하였으며, 전류 제어기 대역폭은 500Hz이다. 2개의 코일에 500Hz의 변위 전류 지령치를 주고 두 코일의 전류 합이 1A가 되도록 제어하고 있으며, 이 때 각 축의 전류 제어가 독립적으로 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8은 동일한 조건 아래에서 실험을 수행한 결과이다.

2.3.1 자기 베어링 1자유도 모의 실험

그림 9는 제안된 파워 앰프의 실효성을 시험하기 위한 자기 베어링 1자유도 모의 실험장치이다. 이 실험장치는 양쪽 코일의 전류를 제어함으로써 수평 빔의 평형을 유지한다. 이 때의 힘과 전류, 변위의 관계식은 식 (1)~(6) 에서 유도한 자기 베어링의 식과 일치한다 [3]. 그림 10은 위 실험 장치 전체 시스템의 블록도이다. 위치 제어기로는 PD 제어기를 사용하였으며, D 제어기에는 실제 위치 정보의 미분치를 넣는 대신 2차의 상태 관측기를 구성하여 추정한 위치 미분의 상태를 사용하였다. 그리고 PD 제어기로 인해 생기는 정상상태 오차는 전향(Feedforward) 보상하였다. 전류 제어기는 위에서 사용한 것과 같은 PI 제어기를 사용하였으며, 파워 앰프 역시 위와 동일하게 설정하여 사용하였다. 제어기로는 TI의 TMS320VC33 DSP를 사용하여 디지털로 구성하였다. 그림 11은 제단 위치 지령에 대한 위치 응답 특성과, 그 때의 전류 지령 및 실제 전류 응답 특성을 나타내고 있다. 제단 위치 지령에 대한 위치 제어가 잘 이루어지고 있으며, 전류 제어가 제대로 이루어지고

	코일 1개당 암의 개수	필요한 파워 모듈의 개수	구현 가능한 전압
HB	1개	4개	-V _{dc} /2, V _{dc} /2
FB	2개	7개	-V _{dc} , 0, V _{dc}
제안된 방식	1.5개	5개	-V _{dc} , 0, V _{dc}

표 2. FB, HB, 제안된 방식의 비교

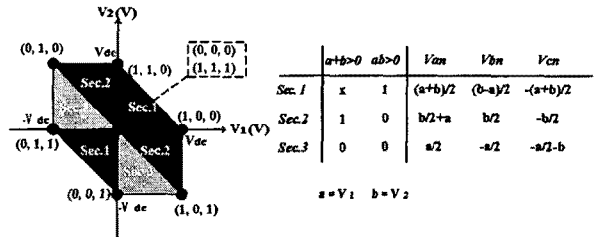


그림 6. 제안된 PWM 방식의 동작 영역

표 3. 섹터 구분과 섹터별 폴전압 지령치

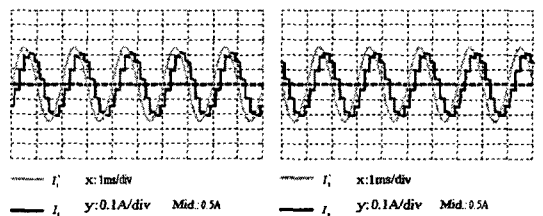


그림 7. 제안된 PWM방식을 이용한 전류제어 응답성 (시뮬레이션)

음을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 PWM 방식을 이용한 파워 앰프가 실제 자기 베어링의 통합 정전류 제어법에 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 새로운 PWM 방법을 적용한 자기 베어링 코일 구동용 파워 앰프를 제안하였다. 제안된 PWM 방법은 기존의 FB 방식에 비해 가격면에서 유리하고, HB 방식에 비해 전류 리플이 적다는 장점을 가진다. 전류 제어 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 PWM 방법이 두 개의 코일을 독립적으로 구동할 수 있다는 사실을 확인하였다. 그리고 자기 베어링 1자유도 모의 실험장치를 통해 제안된 PWM 방법을 이용한 파워 앰프가 실제 자기 베어링의 통합 정전류 제어법에 적용될 수 있음을

(참 고 문 헌)

- (1) Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, Alfons Traxler, "Active Magnetic Bearings : Basics Properties and Applications of Active Magnetic Bearings", vdf Hochschulverlag AG der ETH Zurich, 1994
- (2) 정대웅, "옴셋 전압에 의한 3상 전압형 인버터 PWM 방식의 일반적 해석", 서울대학교 박사학위논문, 2000년
- (3) Jeffrey D. Lindlau, Carl R. Knospe, "Dynamic Force Biasing of Active Magnetic Bearings via Feedback Linearization", ROMAC Report No.435, UVA Report No. UVA/643092/MAE99/535, May 1999

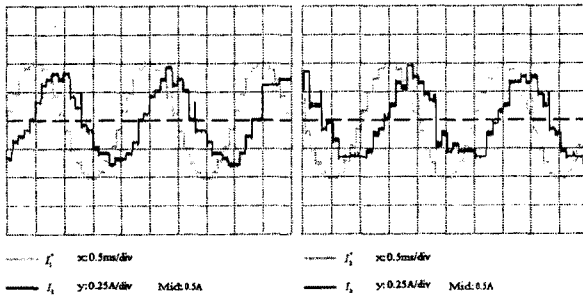


그림 8. 제안된 PWM 방식의 전류제어 응답성 (실험)

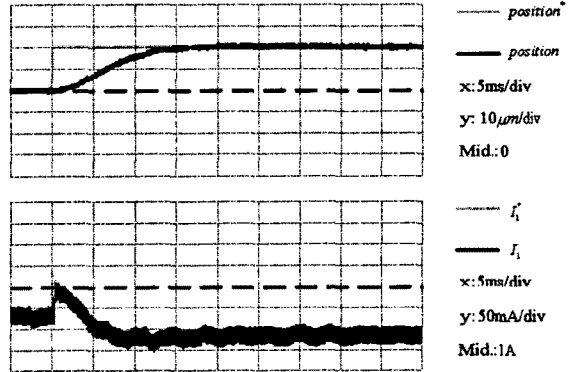


그림 11. 계단 위치 지령에 대한 위치와 전류의 응답 특성 실험

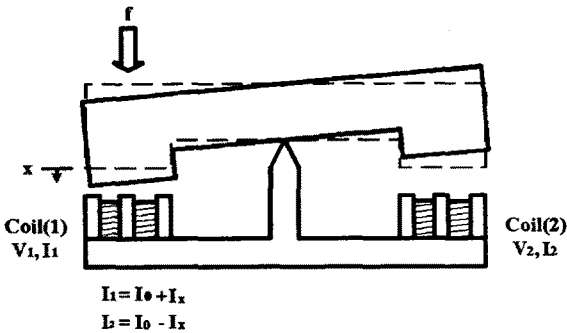


그림 9. 자기 베어링 1자유도 모의 실험 장치

길이 : 329mm, 빔(beam)의 무게 : 11.31kg
 평균 공극 : 0.3mm, 포화 자속 : 1.5T
 코일의 평균 인덕턴스 : 25mH

확인하였다.

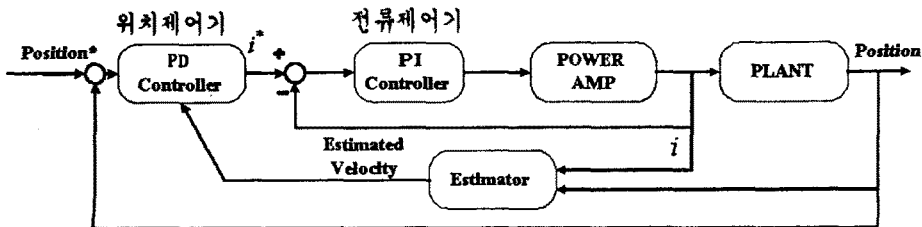


그림 10. 자기베어링 1자유도 모의 실험 전체 블럭도