

## 자기베어링 지지 모터-발전기 시스템 개발

김 종 문, 김 춘 경, 김 국 현  
한국전기연구소 발전제어사업팀

### Development of An Active Magnetic Bearing-based Motor-Generator System

Kim, Jong-Moon, Kim, Choon-Kyung, and Kim, Kook-Hun  
Power Plant Control Team, KERI

**Abstract** - In this paper, an active magnetic bearing-based motor-generator(M-G) system is designed and controlled by using DSP devices.

Several experiments including start-up test, impulse test, whirl test, and generator load test are conducted using digital PID algorithm and AC power of about 58Hz, 100V, 0.8A can be generated from the M-G set.

#### 1. 서 론

최근 회전기계의 회전축의 비접촉지지 베어링인 자기베어링에 대한 관심이 크게 일어나고 있다. 기존의 구름베어링 등은 기계적 마찰이 있어서, 마모가 크고, 초고속으로 구동하기 힘들며, 윤활 장치를 필요로 하여 오염문제가 있고, 사용 온도범위가 매우 좁아 극한 지역에서는 사용이 불가능하다. 그리고, 부하와 회전속도에 따른 베어링 강성 및 감쇠특성을 가변시킬 수 없어서 회전축의 공진주파수를 통과할 수 없다는 단점이 있다.

한편, 자기 베어링[1]은 비접촉으로 회전축을 지지하므로 초고속으로 회전할 수 있고, 마모가 없고, 보수 및 유지가 필요없어 수명이 영구적이다. 또한, 윤활장치 및 밀봉이 불필요하여 오염문제가 없는 장점이 있다. 그리고, 베어링 강성 및 감쇠를 회전수에 따라서 온라인으로 조절하므로써, 회전체의 위험속도를 쉽게 피할 수 있다.

자기 베어링의 용용분야는 밀링 스판들, 터어빈, 플라이휠, 원심분리기 등 다양하며 각 용용분야에 따라서 용량 및 회전속도가 다르다.

본 논문에서는 기존의 M-G 세트를 대체하는 새로운 개념의 자기 베어링 지지 M-G 시스템을 개발하고자 한다. 제작된 M-G 시스템에 대해 초기부상 실험, 임펄스 실험, 훨 실험 및 발전기 부하 실험을 하였다. 제어 알고리즘은 디지털 PID 제어이고, 발전기 출력단자에서는 100V, 0.8A의 교류 전압이 발생할 수 있다.

#### 2. 시스템 설계 및 제어실험

먼저, 자기베어링 시스템의 1자유도 모델[2]에

대한 모델링을 하고, M-G 시스템을 구성하는 각 요소에 대한 설계 및 제작에 대해 언급하고, 제어 시스템으로서, 디지털 제어보드 및 PWM 파워 앤프에 대해 설명한다. 또한 제어실험 및 발전기 특성실험에 대한 결과도 보인다.

#### 2.1 시스템 모델링

그림 2.1은 레이디얼 베어링의 고정자로, 부상력  $f$  와 전류  $i$  및 공극  $g$  사이의 관계는 식 (2.1)과 같다.

$$f = k_1 \left( \frac{i}{g} \right)^2 \quad (2.1)$$

여기서,  $k_1$ 은  $\cos(22.5) \mu_0 N^2 A / 4$ 이고,  $\mu_0$ 는 공기 중의 투자율( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $N$ 은 코일 권선수,  $A$ 는 자극 단면적( $m^2$ )이 된다. 식 (2.1)은 마그네트 하나에 대한 부상력이므로 자기베어링의 서로 마주보는 한 쌍의 마그네트에 대한 부상력의 벡터 합이 결국 수직방향의 전체 힘이 된다. 즉,

$$f_z = f_1 - f_2 = k_1 ((i_1/g_1)^2 - (i_2/g_2)^2) \quad (2.2)$$

여기서, 상위 마그네트에 흐르는 전류  $i_1$ 와 하위 마그네트에 흐르는 전류  $i_2$ 는 식 (2.3) 같이 공칭전류  $i_{o1}, i_{o2}$ 와 미소전류  $\Delta i$ 의 합과 차로 표현되고, 공극  $g_1$ 과  $g_2$ 는 공칭공극  $g_o$ 와 미소공극  $\Delta g$ 의 합과 차로 표현된다.

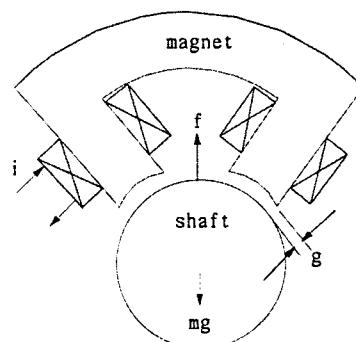


그림 2.1 레이디얼 베어링의 고정자

$$i_1 = i_{o1} + \Delta i, \quad i_2 = i_{o2} - \Delta i \quad (2.3)$$

$$g_1 = g_o + \Delta g, \quad g_2 = g_o - \Delta g \quad (2.4)$$

부상력  $f_z$ 를 공칭공극  $g_o$ 와 공칭전류  $i_o$ 에 대해 테일러 급수에 의한 선형화를 하면 식 (2.5)를 얻는다.

$$f_z = f_o + k_z \Delta z + k_i \Delta i \quad (2.5)$$

여기서,  $k_z = 2k_1(i_{o1}^2/g_o^3 + i_{o2}^2/g_o^3)$  ( $N/m$ )는 위치강성계수이고,  $k_i = 2k_1(i_{o1}/g_o^2 + i_{o2}/g_o^2)(N/A)$ 는 전류강성계수이다.

한편, 베어링 마그네트의 전기회로에 대한 관계식은 식 (2.6)의 전압 방정식에 의해 결정된다.

$$v(t) = R_i(t) + \frac{d}{dt}(L(g, i)i(t)) \quad (2.6)$$

여기서,  $v(t)$ ,  $i(t)$ 는 각각 입력전압과 전류이고,  $R$ ,  $L$ 은 각각 저항 및 인덕턴스이다.

식 (2.6)에 대한 선형화 과정을 거치면 전압과 전류의 관계는  $1/(Ls+R)$ 으로 된다.

## 2.2 시스템 설계 및 제작

그림 2.2는 자기베어링 지지 모터-발전기 시스템으로서 밀링 베드 위에 네 개의 레이디얼 베어링, 한 개의 스러스트 베어링 그리고 레이디얼 베어링 사이에 모터와 발전기가 각각 위치하고 있다. 모터 축과 발전기 축은 플렉서블 커플링으로 연결하였다.

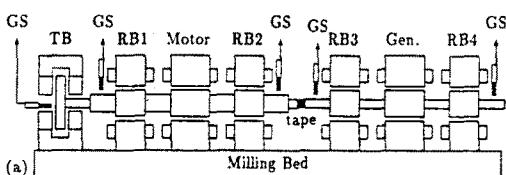


그림 2.2 자기베어링지지 M-G 시스템

레이디얼 베어링은 축을 지지하며, 외전류 손실을 줄이기 위해 두께 0.35mm의 규소강판(SE14C)으로 방전가공을 하여 제작하였다. 베어링 공극은 0.5mm, 전자석의 단면적은  $800 \text{ mm}^2$ , 권선수는 600, 전자석 자극 배치는 NNSSNNSS로 하였다.

스러스트 베어링은 축방향 운동을 제어하며, 고정자와 회전자 모두 통체로 제작하였고, 베어링 한 쪽의 권선수는 250, 공극은 0.6mm이다. 회전축은 기계적 강도가 큰 탄소강재인 SM20C로 하였다.

구동모터는 1.5kW, 2극, 3상 농형 유도전동기, 발전기는 2극 단상 브러쉬리스 발전기를 사용하였다. 발전기의 회전자는 두 개의 영구자석, 계자권선, 저항 및 다이오드가 있으며 고정자에는 콘덴서 권선과 주권선이 감겨 있다.

## 2.3 제어 하드웨어 및 제어기 설계

디지털 PID 제어 알고리즘을 구현하기 위해 TI사의 TMS320C31 칩[3]을 채택한 제어보드를 설계하였다. 이 보드에는 14채널의 AD 변환기, 8채널의 DA 변환기, EPFLD, 1MB SRAM, 2kB EEPROM, 32kB EPROM 및 4채널의 fiber-optic 회로가 있으며, M-G 세트를 제어하기 위해 두 장의 DSP 보드를 사용하였다.

1자유도 모델에 대한 PID 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{t_i s + 1} + \frac{K_d s}{t_d s + 1} \quad (2.7)$$

여기서,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 각각 비례이득, 적분이득 및 미분이득이고,  $t_i$ ,  $t_d$ 는 각각 적분상수 및 미분상수이다. 제어주파수는 5.2kHz이고, 아날로그 전달함수  $G_c(s)$ 를 bilinear 변환하여 디지털로 구현하였다. 그림 2.3은 1자유도 자기베어링의 PID 폐루프 제어블록다이아그램이다.

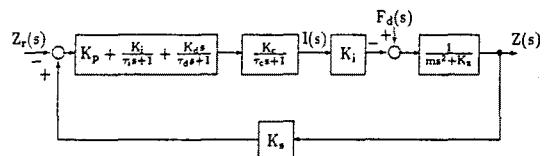


그림 2.3 자기베어링의 PID 폐루프 제어

## 2.4 특성실험

### 2.4.1 초기부상 실험

그림 2.4는 초기 부상시의 레이디얼 베어링의 각 공극  $g_{M1}$ ,  $g_{M3}$ ,  $g_{M5}$ ,  $g_{M7}$ 을 보여 준다. 부상할 때에 수직방향의 응답은 약간의 오버슈트가 있어서 잘 수렴하고, 수평방향의 변위는 거의 변화가 없다. 이때, 초기공극은 0.8mm이고, 최종공극은 0.5mm가 된다.

### 2.4.2 임펄스 실험

임펄스 신호로서, DSP 보드의 DAC에서 1.8msec동안 10V를 내보내는 방법으로 구현하여, 한쪽 레이디얼 베어링에 임펄스를 가한 후에 이 충격이 반대쪽 베어링에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보았다.

그림 2.5는 수평방향의 마그네트  $M_3$ 에 임펄스를 가할 때의 실험결과로서, 마그네트  $M_3$ 의 공극이 변하더라도 반대쪽 수평공극  $g_{M7}$ 에 영향을 거의 주지 않는다.

### 2.4.3 회전 실험

그림 2.6은 모터를 5400rpm (90Hz)까지 구동할 때의 레이디얼 베어링의 공극  $g_{M1}$ 과  $g_{M3}$ 의 궤적으로서, 1200rpm (20Hz) 부근까지 서서히 크기가 증

가하다가 1800rpm (30Hz) 근방에서 수평축의 공진이 일어나서 궤적의 크기가  $\pm 40\mu\text{m}$  까지 증가하였으나, 수직방향의 크기는  $\pm 20\mu\text{m}$  이내로 유지되었다. 2400rpm (40Hz) 이후에는 위상이 바뀌어 수직방향의 궤적크기는 증가하나 오히려 수평방향의 크기는 감소하게 된다. 그 이후로는 수평방향과 수직방향 모두 공진을 지났기 때문에 궤적의 크기는  $\pm 20\mu\text{m}$  이내에서 제어가 된다.

#### 2.4.4 발전기 특성실험

그림 2.7은 인버터의 출력주파수가 변할 때, 유기된 발전기의 출력전압의 크기를 보여 준다. 저속에서는 유기전압이 작으나, 정격속도인 3600rpm 부근까지 증가하면, 기하급수적으로 증가함을 알 수 있다.

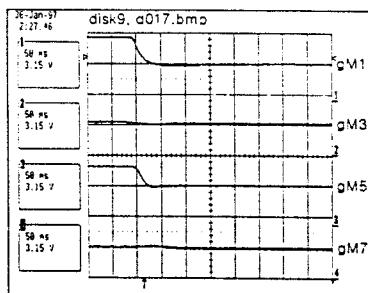


그림 2.4 초기부상 실험결과

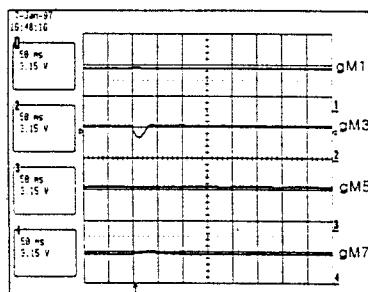


그림 2.5 임펄스 실험결과

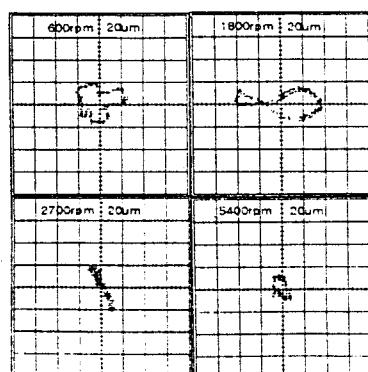


그림 2.6 휠 실험결과

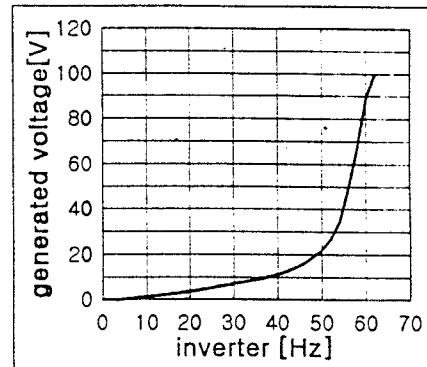


그림 2.7 발전기 특성 실험결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 자기베어링 지지 모터-발전기 시스템에 대한 여러 특성실험의 결과를 보였다. 먼저, 한쪽 제어루프를 구성할 때, 다른 제어루프의 상태변수도 피드백하는 global 제어기법으로 인해 레이디얼 베어링 간의 간섭이 적어, 전동 특성이 좋아 졌다. 또한 자기베어링 지지 모터-발전기 시스템의 발전 및 부하실험을 통하여 공극 0.5mm, 회전속도 3600rpm,  $\pm 40\mu\text{m}$  이내의 회전성능을 갖는 비접촉 지지로 발전기 양단에서 58Hz, 전압 100V, 전류 0.82A의 발전이 가능함을 확인하였다. 이 모터-발전기 시스템은 비접촉 지지로 소음이 매우 적고, 회전으로 인한 손실을 현저하게 줄일 수 있는 장점이 있다.

자기베어링의 회전속도가 증가하면, 고유진동수가 변하게 되어 시스템의 안정도 또한 변하게 된다. 따라서 넓은 운전영역에 걸쳐 안정된 지지 특성을 유지하려면, 회전속도에 따라 제어 파라미터를 자동적으로 변화시킬 수 있는 게인-스케줄링 제어를 구현하는 것이 필요하다.

### (참 고 문 현)

- [1] Schweitzer,G., et al, Active Magnetic Bearing, ETH, Zürich, 1994
- [2] Matsumura, F., et al, " System Modeling and Control Design of a Horizontal-Shaft Magnetic Bearing System", IEEE Trans. on Magnetics, vol.22, no.3, pp197-, May, 1986.
- [3] TMS320C31 User's Guide, Texas Instruments, 1994.