

플라이휠 시스템의 저전력 제어 Low Power Control of Flywheel System

*유승열¹, 박병철², #노명규³

*S. Y. Yoo¹, B. C. Park², #M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)³

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단 기계공학과, ²전력연구원, ³충남대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Low power control, Flywheel system, Active magnetic bearings

1. 서론

에너지 부족 현상이 심화되고 있는 현시점에서 에너지 효율의 향상은 매우 큰 중요성은 지닌다. 특히 에너지 효율이 가장 중요한 설계조건이 되는 플라이휠 에너지 저장 장치나 기계적 인공 장기, 인공위성, 무정전 전원 공급기(UPS) 등의 경우 전력최소화(Power minimization)는 필수적인 설계요소라 할 수 있다.

자기부상형 플라이휠 시스템이나 자기부상형 인공 심장에 사용되는 능동형 전자기 액추에이터는 동적 성능 보장, 선형 제어기 사용 등을 위해 일정한 전력이 항상 소비된다. 플라이휠 에너지 저장 장치의 경우 자기 베어링을 사용함으로써 접촉 마찰로부터 초래되는 에너지 손실 문제와 진공상태에서 발생하는 윤활제의 Outgassing 문제를 해결함으로써 플라이휠 에너지 저장 시스템의 에너지 저장효율을 90%이상으로 끌어 올리는 견인차 역할을 하고 있다. 하지만 자기 베어링의 지속적인 유지와 시스템 제어장치 운전 등에 따른 에너지 효율 저하로 시간 당 최소 1%, 즉 하루에 저장된 에너지의 약 25% 이상이 손실되는 실정이다. 본 논문에서는 시스템의 동적 성능을 보장하면서 적은 전력으로 플라이휠 시스템을 제어하는 방법을 제시하고 이를 모델링하여 시뮬레이션을 통하여 구현하고, 설계된 제어기의 소비전력은 광범위하게 사용되는 비례적분제어기(Proportional-Derivative controller)의 소비전력과 시뮬레이션을 통하여 비교, 검증하였다.

2. 시스템 개요

Fig.1 은 플라이휠 에너지 저장장치의 개략도이다. 시스템의 중앙에는 이중구조의 섬유강화 복합재료로 이루어진 플라이휠이 장착되어 있고, 플라이휠을 포함한 회전체의 무게는 약 400kg 이다. 회전체의 관성모멘트 비율(I_p / I_r)은 0.5 이며 두 개의 능동형 자기베어링이 회전체 상부와 하부에 장착된다. 능동형 자기베어링시스템은 개루프 불안정성

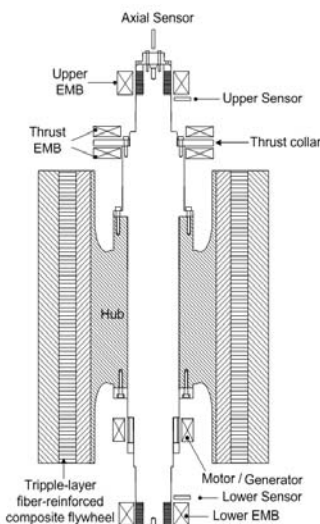


Fig. 1. A schematic view of two types of flywheel energy storage systems

을 가지기 때문에 상,하부 반경방향 변위가 와전류형 센서를 통하여 제어기로 전달된다. 상,하부 능동형 자기베어링의 부하용량은 1330N 이며 제어기는 H_∞ 제어기를 적용하였으며 Matlab 을 이용하여 설계하였다. 그리고 축방향 제어를 위해 영구자석을 포함하는 하이브리드형 능동형 전자기 액추에이터가 장착된다. 마지막으로 전동발전기가 장착되어 에너지의 충/방전을 수행한다.

3. 저전력 제어 알고리즘

3.1 바이어스 선형 제어

일반적인 자기베어링의 모델은 자기베어링의 자기회로 모델로부터 구할 수 있다. 이는 자기베어링 각 극의 전류와 자기베어링의 힘과의 상관 관계(식 1)를 나타낸다. 이 관계는 기본적으로 이차식의 형태를 가지고 있는데, 제어기의 설계를 위해 이 관계를 선형화할 필요가 있다. 8 개의 극을 가지고 있는 자기베어링에서 2 극 씩 짝을 지어 직렬로 연결하고, 제어방향에 따라 일정한 전류(bias current)에 제어전류를 더하는 방식의 bias linearization [1]제어 방법을 사용하면, 액추에이터의 선형 모델을 근사화할 수 있다.

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{4} \left(\frac{I_1^2}{(g_0 - x)^2} - \frac{I_2^2}{(g_0 + x)^2} \right) \begin{cases} I_1 = \max(I_b + i_p, 0) \\ I_2 = \max(I_b - i_p, 0) \end{cases} \quad (1)$$

자기베어링의 힘과 전류에 관한 식을 Taylor's series 를 이용하여 선형화하면 다음과 같은 선형화된 모델을 얻을 수 있다.

$$F_x \approx -K_m x + K_i i_{px} \quad (2)$$

여기서 액추에이터의 강성계수 K_m 과 게인 K_i 는 식(3)과 같이 정의된다.

$$K_m = \frac{\mu_0 A_g N^2 I_b^2}{g_0^3} \quad K_i = \frac{\mu_0 A_g N^2 I_b}{g_0^2} \quad (3)$$

위에서 얻어진 선형 자기베어링 모델은 제어기 모델과 결합하여 제어기모형을 이루게 된다. 이 때 자기베어링의 선형화 모델을 얻기 위해 사용된 바이어스 전류는 자기베어링의 상시 소모전력으로 작용하게 되어 시스템의 효율을 감소시키는 결과를 가져온다.

3.2 비선형 저전력 제어

기존의 자기베어링 제어기는 바이어스 전류를 이용하여 선형화된 모델을 이용하여 능동형 자기베어링에 인가되는 전류를 제어하는 방식이지만, 비선형 제어방법을 이용하면 선형화를 하지 않기 때문에 바이어스 전류를 사용하지 않는다. Fig.2 는 1 자유도 자기베어링의 저전력 제어 개념도이다. Fig.2 의 기준선의 왼편(I_1 가 흐르는 액추에이터 방향)으로 발생하는 힘의 방향을 양(+)으로 정의하면 외란 F_d 가 양의 방향으로 작용하면, 외란을 상쇄시키기 위해 음의 방향 액추에이터가 작동하여 외란을 상쇄시킨다(Case 1). 외란이 음의 방향으로 작용하면 Case 1 과 반대로 양의 방향 액추에이터가 작동하여 외란을 상쇄시킨다. 비선형 제어는 Fig.2 에서와 같은 방법으로 전류를 제어하지 않고 식(4)의 힘과 전류, 공극간의 비선형 관계를 이용하여 회전체

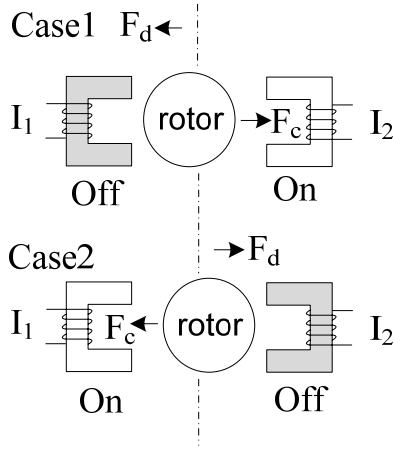


Fig. 2. Concept of nonlinear control law of 1 d.o.f active magnetic bearing

를 제어하며 아래와 같은 비선형 제어법칙을 사용하게 된다[2, 3].

$$f_c \geq 0 \begin{cases} I_1 = i_c \\ I_2 = 0 \end{cases} \quad i_c = (X_0 - x)\sqrt{\frac{f_c}{k}} \quad (1)$$

$$f_c < 0 \begin{cases} I_1 = 0 \\ I_2 = i_c \end{cases} \quad i_c = (X_0 + x)\sqrt{\frac{-f_c}{k}}$$

이 때 $k = \mu_0 N^2 A_g / 4$, X_0 는 공극, x 는 변위이다.

비선형 제어를 위해 H_∞ 제어기를 Matlab 을 이용하여 설계하였다.

4. 시스템 모델링

플라이휠 시스템의 동역학적 특성과 제어기 설계를 위해서는 동역학적 모델이 필요하다. 플라이휠의 최대 운전속도가 1 차 급힘모드 아래에 있다고 가정하면 회전축의 동역학적 모델을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$m\ddot{x} = F_x^d + F_x^U + F_x^L$$

$$m\ddot{y} = F_y^d + F_y^U + F_y^L \quad (2)$$

$$I_t \ddot{\theta}_x + \Omega I_p \dot{\theta}_y = (-F_y^U + F_y^L) z_a$$

$$I_t \ddot{\theta}_y - \Omega I_p \dot{\theta}_x = (F_x^U - F_x^L) z_a$$

여기서 m 은 질량, $F_{x,y}^{U,L}$ 은 상,하부의 x,y 방향 힘이며 I_p, I_t 는 각각 극질량관성모멘트, 횡질량관성모멘트를 의미하고 Ω 는 회전속도, z_a 는 무게중심으로부터 자기베어링까지의 거리이며 상하부 동일한 거리에 위치한다고 가정한다. 이를 Fig.3의 제어블럭선도와 같은 형태로 강인제어기법을 이용하여 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = \mathbf{A}(\Omega)x + \mathbf{B}_u u + \mathbf{B}_d d + \mathbf{B}_n n$$

$$\begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{C}x + \mathbf{D}[u \ d \ n]^T, \quad w = u \quad (3)$$

4. 시뮬레이션

3 장의 비선형 제어 알고리즘을 이용하여 H_∞ 제어기를

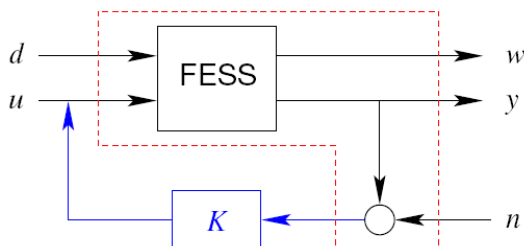


Fig. 3 Block diagram of the dynamic model

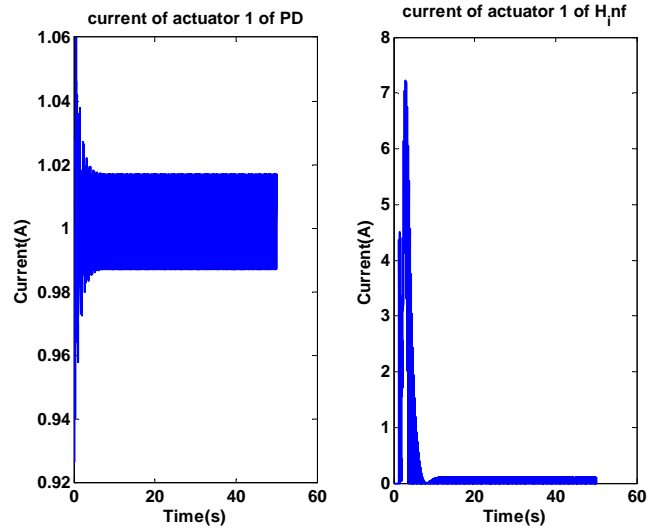


Fig.4 Currents of Actuator 1 for PD and H_∞ controller

포함하는 시뮬레이션모델을 구축한 뒤, 일정속도에서 회전속도에 동기하는 외란이 작용하였을 때, 자기베어링에 인가되는 전류를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

Fig.4는 회전속도가 10,000rpm 일 때 $1.8 \times 10^{-4} kgm$ 의 불평형 질량에 의한 원심력이 작용하였을 때 한 쪽 자기베어링에 인가되는 전류의 파형이며 PD 제어기에서 사용한 바이어스 전류는 1A 이다. 이미 10,000rpm 으로 회전하는 것으로 가정하면, 안정화가 되었을 때의 전류가 외란에 대한 제어전류이며, 일정 시간에 대하여 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$P = (i_{c1}^2 + i_{c2}^2)R \quad (4)$$

자기베어링에 권선되어 있는 코일의 저항을 2.5Ω 이라고 가정하면 PD 제어기의 경우 약 255W 의 전력이 소비되고, 비선형 제어기의 경우 56.8W 의 전력이 소비되는 것으로 나타났다. 이는 항상 소모전력인 바이어스 전류가 자기베어링의 소비전력 중 큰 비중을 차지하고 있음을 의미한다.

4. 결론

본 논문에서는 강제모델을 기반으로 한 플라이휠 에너지 저장장치의 동역학적 모델을 강인제어기법을 이용하여 모델링하였다. 그리고 기존에 일반적으로 사용되는 바이어스 전류 선형화 방법을 이용하지 않고 자기베어링을 비선형적으로 모델링하였다. 이를 이용하여 비선형 강인제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통하여 제어전류를 확인하였다. 또한 일반적으로 널리 사용되는 비례적분제어기의 소비전력을 계산하여 비교함으로써 본 연구에서 적용한 제어 알고리즘과 제어기가 보다 적은 전력을 소비하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 추후과제로 실험을 통한 시뮬레이션결과와 검증이 남아있다.

참고문헌

1. E. H. Maslen, et. al., "Fault tolerance of magnetic bearing by generalized bias current linearization," IEEE Trans. Magnetics, Vol.31, pp2304-2314, 1995.
2. K. Nonami, et. al, " Zero bias H_∞ control of active magnetic bearings for energy storage flywheel systems," 9th ISMB 2004.
3. K. Nonami, et. al, " Flywheel zero bias AMB system with force base switching servo backstepping control," 9th ISMB, 2004.