

질량중심 제어기를 이용한 플라이휠 시스템의 강체모드 제어 Rigid Mode Control of Flywheel System using Center of Mass Controller

유승열* · 김정완** · 최원영* · 배용채*** · 노명규†

Seong-yeol Yoo, Jung-wan Kim, Won-yeong Choi, Young-chaee Bae and Myounggyu Noh

1. 서론

최근 기존의 에너지를 대체할 수 있는 다양한 에너지 방안으로 신·재생에너지의 필요성이 대두되고 있다. 이와 더불어 에너지 저장기술의 중요성 역시 부각되고 있는데, 에너지 저장 장치 중 플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage System)는 전기에너지를 플라이휠의 회전 운동에너지 형태로 저장하고 필요할 때 회전 운동 에너지를 다시 전기에너지 형태로 전환할 수 있는 기계적 전기[Battery]로 무정전 전원공급장치(Uninterruptible Power Supply)와 대형 전기 차량 등에 적용되고 있으며 무한대의 충방전이 가능하여 친환경적이라고 할 수 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 효율적인 측면에서 운전 중 마찰을 최소화해야 하기 때문에 비접촉 능동형 혹은 수동형 자기베어링을 사용하고 진공환경 내에서 작동한다.

본 논문에서는 강체모형을 이용하여 질량중심 좌표계에서 자기베어링을 포함하는 시스템과 PD 제어기를 모델링하였다. PD 제어기는 병진모드와 원추모드를 각각 제어할 수 있도록 제어계인을 분리하여 설계하였다. 또한 설계된 제어기에 의한 모드별 제어를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 시스템

2.1 시스템 개요

Fig.1 은 플라이휠 에너지 저장장치의 개략도이다. 회전체의 중앙에는 섬유강화 복합재료로 만들어진 플라이휠이 장착되어 있다. 회전체의 반경방향 움직임은 상부와 하부에 위치한 능동형 자기베어링에 의해 지지되며 회전체의 반경방향 위치는 두 쌍의 센서에 의해 측정된다. 축의 중앙에 위치한 고속 전동/

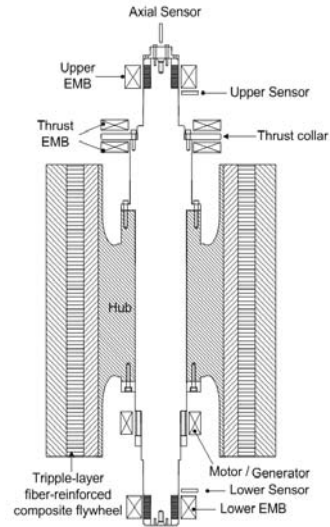


Fig. 1. A schematic view of two types of flywheel energy storage systems

발전기는 축을 운전속도까지 가속시키거나 방전시 발전기로 작동하여 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 역할을 한다. 플라이휠 시스템은 18,000rpm의 속도에서 5kWh의 사용 가능한 에너지 저장 용량을 가지도록 설계되었고 플라이휠을 포함하는 회전체의 질량은 400kg, 극질량관성모멘트와 횡질량관성모멘트는 각각 13.6 kg·m²과 27.2 kg·m²이며, 각 베어링의 부하용량은 약 1300N으로 설계되었다.

2.2 동역학적 모델

플라이휠 에너지 저장장치의 동역학적 특성 확인과 제어기 설계를 위해서 동역학적 모델 유도는 필수적이다. 플라이휠 시스템의 회전체가 강체이고, 최대 운전속도가 1 차 굽힘모드 아래에 있다고 가정하고 시스템의 동역학적 모델을 유도할 수 있다. 이 때, 질량중심에서의 미소변위를 x, y , Euler 각을 α, β 라고 하면 동역학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + G\dot{q} &= Bu_r \\ y &= Cq \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 변위벡터 q 는

† 교신저자; 충남대학교 메카트로닉스공학과

E-mail : mnoh@cnu.ac.kr

Tel : (042)821-6877, Fax : (042) 823-4919

* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

** SL 주식회사

*** 전력연구원

$$\mathbf{q} = [x \quad \beta \quad y \quad -\alpha]^T$$

이며 입력 \mathbf{u}_f 는

$$\mathbf{u}_f = [f_x^U \quad f_x^L \quad f_y^U \quad f_y^L]^T$$

이다. 또한, 질량행렬 \mathbf{M} 과 \mathbf{G} , 그리고 입출력 행렬 \mathbf{B} 와 \mathbf{C} 는

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_t \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega I_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega I_p & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ z_a^U & z_a^L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & z_a^U & z_a^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & z_s^U & 0 & 0 \\ 1 & z_s^L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_s^U \\ 0 & 0 & 1 & z_s^L \end{bmatrix}$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $z_a^{U,L}, z_s^{U,L}$ 은 무게 중심에서 상,하부에 있는 자기베어링과 센서까지의 거리이다. 그리고, 바이어스 선형화 방법을 이용하면 자기베어링의 힘은 전류이득 K_i 와 베어링 강성 K_m 을 가지는 선형 모델로 유도된다.

$$\mathbf{u}_f = -K_m \mathbf{q}_b + K_i \mathbf{i} \quad (2)$$

이 때 \mathbf{q}_b 는 베어링 좌표계에서의 변위이며, $\mathbf{i} = [i_x^u \quad i_x^l \quad i_y^u \quad i_y^l]^T$ 이다. 하지만, 베어링좌표계와 질량중심좌표계에서의 변위는 차이가 있기 때문에 베어링 좌표계를 질량중심 좌표계로 변환시키면 다음과 같다.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 1 & z_a^U & 0 & 0 \\ 1 & z_a^L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_a^U \\ 0 & 0 & 1 & z_a^L \end{bmatrix} \mathbf{q}_b = \mathbf{B}^T \mathbf{q}_b \quad (3)$$

3. 제어기 설계 및 시뮬레이션

질량중심 좌표계의 x -axis 에서 필요한 제어힘을 F_c 라고 하고, ϕ -axis 에서 필요한 제어힘을 T_c 라고 하면 필요한 제어힘은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_i^U i^U + K_i^L i^L = F_c$$

$$-K_i^U z_a^U i^U - K_i^L z_a^L i^L = T_c \quad (4)$$

위 식으로부터 제어전류는

$$\begin{bmatrix} i_x^L \\ i_x^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_i^L & K_i^U \\ -K_i^L z_a^L & -K_i^U z_a^U \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{cx} \\ T_{cx} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{K_i^L K_i^U (z_a^U - z_a^L)} \begin{bmatrix} K_i^U z_a^U & K_i^U \\ -K_i^L z_a^L & -K_i^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{cx} \\ T_{cx} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 때, 각 강체모드에 대하여 제어기를 적용하면, 필

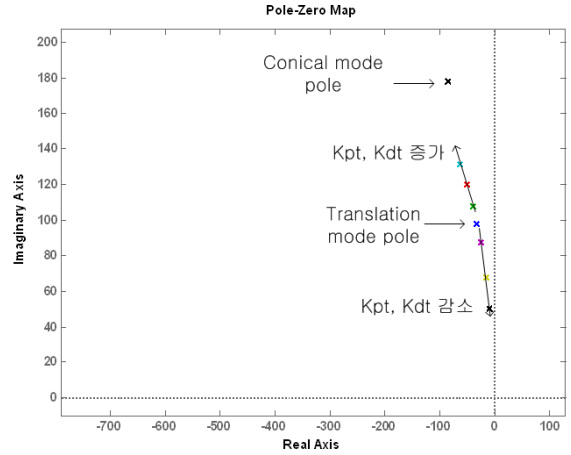


Fig. 2. Change of the translation pole location with respect to translation mode control gain variations

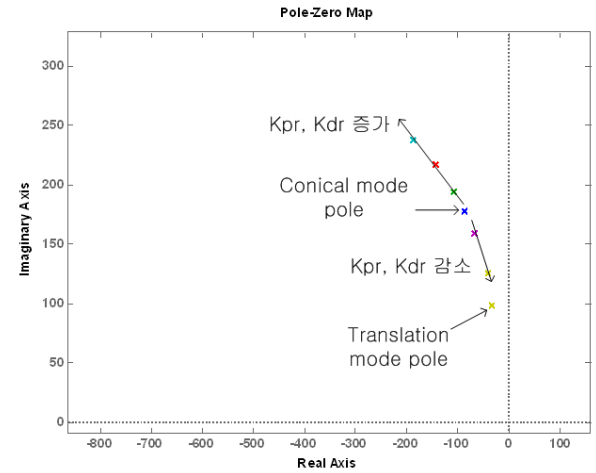


Fig. 3. Change of the translation pole location with respect to translation mode control gain variations

요한 제어힘은 다음과 같이 유도된다.

$$F_{cx} = -K_{px} x - K_{dx} \dot{x}$$

$$T_{cx} = -K_{p\phi} \phi - K_{d\phi} \dot{\phi} \quad (6)$$

Fig. 3, 4 는 위에서 설계된 제어기의 제어게인을 각 강체모드 별로 변화시키면서 각 모드의 극점의 위치 변화를 살펴 본 것이다. 병진모드와 원추모드에 관계되는 제어게인이 변화할 때 각 모드들도 함께 변화하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 자기베어링 좌표계에서 설계되는 자기베어링 모델을 회전체의 질량중심 좌표계로 변환하여 회전체 모델을 유도하였고, 질량중심 좌표계에서 PD 제어기를 설계하였다. 그리고 각 모드별로 제어할 수 있도록 제어기를 설계하였고, 이를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.