

# 플라이휠 에너지 저장 장치에서의 교차 되먹임 제어의 성능 연구 Performance of Cross Feedback Control for Flywheel Energy Storage System

\*유승열<sup>1</sup>, 모상수<sup>2</sup>, 최상규<sup>3</sup>, 이정필<sup>4</sup>, 한영희<sup>4</sup>, 노명규<sup>5</sup>

\*S. Y. Yoo<sup>1</sup>, S. M. Mo<sup>2</sup>, S. K. Choi<sup>3</sup>, J. P. Lee<sup>4</sup>, Y. H. Han<sup>4</sup>, M. G. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)<sup>5</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, <sup>2</sup>충남대학교 대학원, <sup>3</sup>한국기계연구원, <sup>4</sup>한국전력연구원, <sup>5</sup>충남대학교

Key words : Flywheel energy storage system(플라이휠 에너지 저장장치), Active magnetic bearing(능동형 자기베어링), Cross feedback control (교차 되먹임 제어)

## 1. 서론

최근 지구 온난화 문제가 심각한 사회적 이슈로 부각되는 가운데, 기존의 화석 연료를 대체할 수 있는 환경 친화적 대체 에너지 개발에 관심이 집중되고 있다. 지구 온난화의 주범인 온실가스 배출의 감축을 위해서는 화석연료를 사용하고 있는 기존 산업시설을 환경 친화적으로 만들어야 하는데, 전력 생산 부문에서 화석연료 의존도가 높은 우리나라의 경우 많은 어려움이 예상된다. 전력 생산 부문에서의 에너지 대체의 어려움을 극복하기 위해서는 변동하는 전력수요에 유연하게 대응할 수 있는 환경 친화적 전력 생산 및 저장 시스템을 개발, 활용하는 방안이 필요하다. 현재 태양광, 풍력 등 대체 에너지 생산 기술들이 개발되어 있지만, 실질적으로 발전된 에너지의 양이 일정하지 않아 바로 활용하기에는 어려움이 있다. 이러한 이유로 새로운 대체 에너지 수단이 필요한데, 충/방전이 신속, 유연하고 고효율이면서 환경친화적 에너지 저장기술인 플라이휠 에너지 저장기술의 개발이 적당한 해결책이라 하겠다. 플라이휠 시스템은 양수발전, 압축공기 저장방식과 함께 기계적 에너지 저장방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하여 흔히 기계전지(Electro-mechanical Battery) 또는 플라이휠 전지(Flywheel Battery)라고 불리며, 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 변환하여 저장하고 필요 시 전기에너지로 출력하는 장치이다. 플라이휠 에너지 저장 시스템은 다른 에너지 저장 시스템에 비해 단위 무게당 저장 에너지의 양이 많으며, 반복 사용에 대한 반영구적인 수명, 그리고 환경 친화적이라는 장점을 가지고 있다[1]. 플라이휠 에너지 저장 시스템의 효율은 전동기의 전기적 손실과 베어링의 손실에 의해 결정되는데, 베어링의 손실을 최소화하기 위하여 자기 부상형 베어링이 사용된다. 자기 부상형 베어링으로는 초전도체를 이용한 수동형 자기 베어링과 전자석을 이용한 능동형 자기 베어링이 있다. 하지만 초전도 베어링만으로는 댐퍼의 역할을 할 수 없기 때문에 초전도 베어링은 회전축 부상의 역할만을 수행하고, 주로 능동형 자기 베어링이 댐퍼로 이용된다. 본 논문에서는 초전도베어링과 능동형 자기베어링을 동시에 가지는 플라이휠 시스템에서 능동형 자기베어링의 설계 과정과 제어기 설계에 대해 기술하고자 한다. 시스템의 신뢰도를 높이기 위해 초전도베어링이 없다고 가정하여 능동형 자기베어링의 성능 요구 조건을 도출하였다. 또한, 회전축의 동역학적 모델로부터 자기베어링의 제어기 설계가 이루어졌다.

## 2. 시스템의 동적 모델

### 2.1 시스템 개요

Fig.1 은 플라이휠 에너지 저장장치의 개략도이다. 플라이휠이 축에 부착되어 회전하며 에너지를 저장하며 플라이휠은 하부의 영구자석으로 부상되며, 상부의 축방향 능동형 액츄에이터로 축방향 위치가 제어된다. 또, 상부에 반경 방향 능동형 자기 베어링이 장착되어 있으며, 전동발전기가 장착되어 에너지의 충/방전을 수행한다. 플라이휠은 에

너지 충전 시 외부 전기 에너지를 전동기를 통해 플라이휠의 기계에너지로 변환하고, 방전 시 발전기를 통해 플라이휠의 기계 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 플라이휠의 하부에 역시 한 개의 반경 방향 능동형 자기 베어링이 장착되어 반경 방향 위치를 제어하게 된다.

### 2.2 회전 축의 동적 모델

플라이휠 에너지 저장 장치의 동역학적 특성 확인과 제어기 설계를 위해서는 동역학적 모델 유도가 필요하다. 플라이휠의 최대 운전 속도가 1 차 굽힘모드 아래에 있다고 가정하고, 바이어스 선형화 방법을 이용하면 회전축의 동

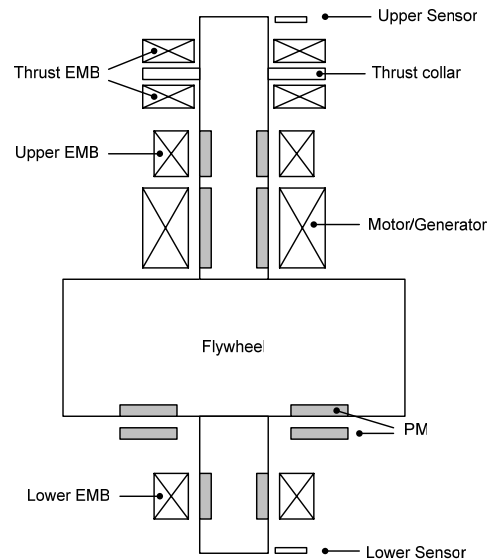


Fig. 1. Schematic diagram of a flywheel energy storage system showing its components.

역학적 모델은 변위에 대한 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$m\ddot{x} = -(2k_m + k_{pm})x - [k_m(z^U + z^L) - k_{pm}z^{PM}] \theta_y + k_i(i_{px}^U + i_{px}^L) \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = -(2k_m + k_{pm})y + [k_m(z^U + z^L) - k_{pm}z^{PM}] \theta_x + k_i(i_{py}^U + i_{py}^L) \quad (2)$$

$$I_i \ddot{\theta}_x = k_m(z^U + z^L + z^{PM})y - k_m(z^{U^2} + z^{L^2} + z^{PM^2}) \theta_x - I_p \Omega \dot{\theta}_y + k_i(-z^U i_y^U + z^L i_y^L) \quad (3)$$

$$I_i \ddot{\theta}_y = -k_m(z^U + z^L + z^{PM})x - k_m(z^{U^2} + z^{L^2} + z^{PM^2}) \theta_y + I_p \Omega \dot{\theta}_x + k_i(z^U i_x^U - z^L i_x^L) \quad (4)$$

이 때, 강성계수  $K_m$  과 액츄에이터 게인  $K_i$  는 다음과 같다.

$$K_m = -\frac{\mu_0 A_g N^2 I_b^2}{g_0^3} \quad (5)$$

$$K_i = \frac{\mu_0 A_0 N^2 I_b^2}{g_0^2} \quad (6)$$

식(11)-(14)은 상태 방정식으로 정리될 수 있다.

$$\dot{x} = A(\Omega)x + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

### 3. PD 제어기의 한계

능동형 자기 베어링은 개루프(open-loop) 상태에서 불안정하기 때문에 폐루프 제어가 필요하다. 제어기는 일반적으로 사용되는 PID 제어기가 이용될 수 있다. Fig. 2는 유도한 시스템의 동역학적 모델을 이용하여 Campbell diagram을 그려본 것이다. PD 제어기의 문제는 상부 원추 모드가 외란에 대하여 아주 작은 땀샘을 가지기 때문에 시스템 진동이 상부 원추 모드와 가까운 범위의 주파수에서 커질 수 있다는 것이다. 그리고 플라이휠 에너지 저장 장치는 Gyroscopic 효과를 가지는데, 본 논문에서 설계한 시스템은 반경 방향에 대한 축 방향 관성 모멘트 비율이 1보다 크기 때문에 시스템 안정성의 문제가 발생할 수 있다[2]. 그렇기 때문에 Gyroscopic 효과를 고려한 제어기가 필요하며 그러한 제어기 설계에 대하여 다음 장에서 기술하도록 하겠다.

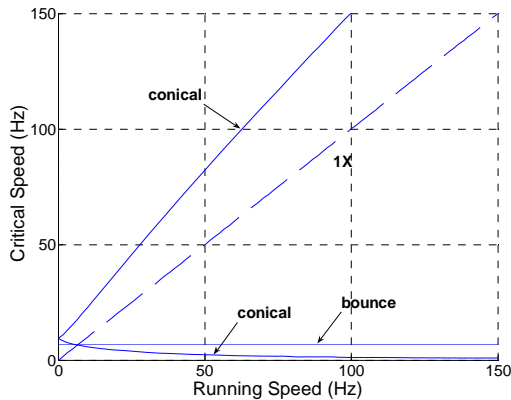


Fig. 2. Rigid body modes with respect to the running speed (simulation).

### 4. 교차 되먹임 제어

플라이휠 에너지 저장 시스템은 Gyroscopic 효과 때문에 일반적인 PD 제어기로는 안정화 될 수 없다. 그러므로 Gyroscopic 효과를 고려한 제어기가 필요한데, 본 논문에서는 교차 되먹임 제어(Cross feedback control)를 이용하였다. 교차 제어기 되먹임 제어 모델은 다음과 같다.

$$I_x^U = -(k_x X_U + k_v \dot{X}_U) + k_c (\dot{Y}_L - \dot{Y}_U) \quad (7.a)$$

$$I_x^L = -(k_x X_L + k_v \dot{X}_L) - k_c (\dot{Y}_L - \dot{Y}_U) \quad (7.b)$$

$$I_y^U = -(k_x Y_U + k_v \dot{Y}_U) + k_c (\dot{X}_U - \dot{X}_L) \quad (7.c)$$

$$I_y^L = -(k_x Y_L + k_v \dot{Y}_L) - k_c (\dot{X}_U - \dot{X}_L) \quad (7.d)$$

위 식에서  $\theta_x = Y_L - Y_U$ ,  $\theta_y = X_U - X_L$ 이며,  $k_x, k_v$ 는 각각 PD 제이다. 그리고,  $X, Y$ 는 베어링으로부터 축까지의 변위이다. 식(1)~(4)와 식(7)을 이용하여  $X, Y$  축에 대하여 Gyroscopic 효과가 커플링되어 있는 항들을 소거시키기 위한  $k_c$ 를 구하면 아래와 같다.

$$k_c = C_{ani} \frac{\Omega I_p}{k_i (2z_b)^2} \quad (8)$$

식(8)에서  $C_{ani}$ 는 교차 되먹임 감쇠상수이고, 이 상수로부터 교차 되먹임 보상이 이루어지게 된다.

### 5. 시뮬레이션 결과

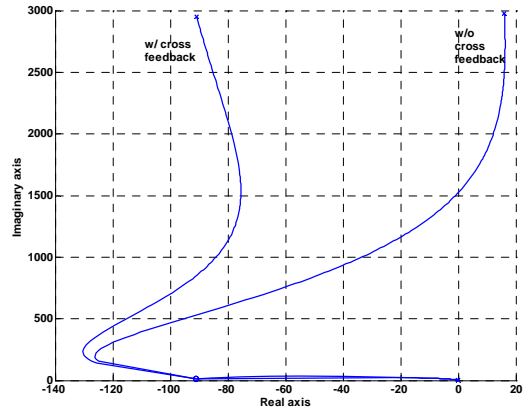


Fig. 3. Pole location of the system with cross feedback and without cross feedback

시스템 특성을 알아 보기 위하여 앞에서 유도한 동역학적 모델을 이용하여 시뮬레이션을 해 보았다. 설계한 제어기에 교차 되먹임 제어를 추가하여 Gyroscopic 효과의 영향을 줄였다. Fig. 3은 교차 되먹임 제어가 추가된 제어기와 기존의 제어기를 이용하였을 때의 시뮬레이션 결과이고, 같은 제어 게인이 사용되었고, 운전속도는 0~20,000rpm이다. 그림에서 알 수 있듯이 교차 되먹임 제어가 추가되었을 때, pole의 움직임이 안정한 영역으로 움직이는 반면 기존의 제어기를 사용하였을 때, pole의 궤적은 우평면으로 이동하여 시스템이 불안정한 상태로 접어들음을 알 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 영구자석을 이용한 플라이휠 에너지 저장 장치의 동역학적 모델을 유도하고, 시스템의 안정성 여부를 판단하였다. 그리고 플라이휠 에너지 저장 장치의 특성상 나타날 수 밖에 없는 Gyroscopic 효과 문제를 해결하기 위한 방법으로 교차 되먹임 제어를 사용하였고, 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 교차 되먹임 제어는 운전 속도가 높아짐에 따라서 그 성능이 잘 나타났으며 시스템도 안정적으로 제어가 됨을 알 수 있었다. 향후에는 본 논문에서 시뮬레이션을 통해 확인한 교차 되먹임 제어를 실험을 통하여 확인하는 작업이 필요하다.

### 참고문헌

1. Koshizuka *et al.*, "Present status of R&D on superconducting magnetic bearing technologies for flywheel energy storage system," *Physica C*, vol. 378-381, pp. 11-17, 2002.
2. M. Ahrens, L. Kucera and R. Larsonneur, "Performance of a magnetically suspended flywheel energy storage device," *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, vol. 4, pp. 494-502, Sept. 1996.