강인제어 기법을 이용한 대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 자이로스 코픽효과 모델링

Gyroscopic Effect Modeling for Flywheel Energy Storage System using Robust Control Technique

김정완(kjfd7@cnu.ac.kr)[1], *유승열(usyeol.@cnu.ac.kr)[1], #노명규(mnoh@cnu.ac.kr)[2]
J.W. Kim[1], *S. Y. Yoo[1] , #M. Noh[2]
[1] 충남대학교BK21 메카트로닉스 사업단 [2]충남대학교 메카트로닉스 공학부

Key words : Flywheel Energy Storagy System, Gyroscopic effect modeling

1. 서론

전력공급 환경의 안정성에 대한 과제는 전력산업의 발생과 더불어 발생한 문제점으로 하절기와 동절기, 낮과 밤 사이의 전력수요 차이로 인하여 발생하는 필수적인 문제점으로 전력환경이 불안정해짐에 따라 전력을 사용하는 시스템의 전반적인 불안정이 발생할 수 있다. [(1)]

이에 대한 문제점을 해결하기 위하여 에너지 저장장치에 대한 관심이 높아지고 있으며 일반적으로 전해물질을 이용한 화학전지를 사용한다. 그러나 화학전지는 경제적이지만 무게가 무겁고 효율이 60%정도로 낮으며[(2)] 생산 및 폐기시 유해물질을 배출하고 반복 사용시 저장할 수 있는 에너지의 양이 적어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 플라이휠 에너지 저장장치를 통해 보완할 수 있다.

본 논문에서는 기존 동역학적 모델에 의한 모델링해석과 함께 시변형성과 자이로스코프 효과를 고려한 강인제어기 설계를 위해 필요한 강인제어 기법의 모델링을 기술하였다.

2. 시스템의 동적 모델

Fig.1 은 플라이휠 에너지 저장장치의 개략도이다. 회전체의 중앙에는 이중 구조의 섬유 강화 복합재료로 만들어진 플라이휠이 장착되어 있다. 회전체의 반경방향 움직임은 상부와 하부에 위치한 능동형 자기베어링에 의해 지지되며 회전체의 반경방향 위치는 두 쌍의 센서에 의해 측정된다. 회전체의 축방향 운동은 수동형 베어링과 능동형 베어링의 조합으로 제어되는데, 수동형 베어링은 회전체의 자중을 담당하고, 능동형 베어링은 진동제어를 하며 축 방향 위치는 상부에 장착된 센서에 의해 측정된다.

플라이휠 에너지 저장 장치의 동역학적 특성 확인과 제어기 설계를 위해서는 동역학적 모델 유도가 필요하다. 플라이휠의 최대 운전속도가 1 차 굽힘모드 아래에 있다고 가정하면 회전축의 동역학적 모델[(3)]은

$$M\ddot{x} + \Omega G\dot{x} + Kx = F \tag{1}$$

와같이 표현될 수 있으며 여기서 M 은 질량행렬 Ω는 회전속도 G는 자이로스코프행렬 K는 강성행렬이다.

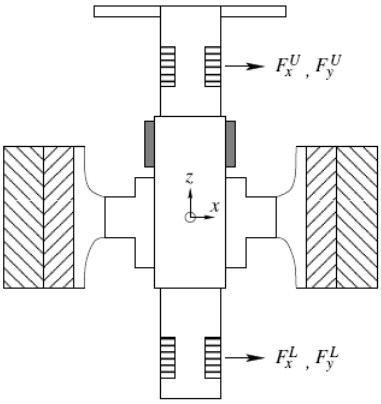

Fig1. Schematic diagram of a flywheel energy storygy system

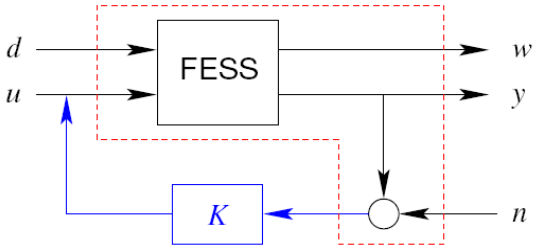

Fig2. Block diagram of the dynamic model

식(1)을 상태방정식으로 표현하면

$$\dot{x} = A(\Omega)x + B_u u + B_d d \tag{2}$$

$$w = u \tag{3}$$

$$z = y + n = C_y x + n \tag{4}$$

이다. 여기서 u 는 제어 입력, d 는 외란, y 는 센서출력, n 은 잡음 신호이며, $A(\Omega)$ 는 회전속도에 따라 변하는 동역학 특성을 포함한다. Fig. 2 는 식(2), (3), (4)의 시스템 모델과 제어기를 그림으로 나타낸 것이다.

3. 강인제어 기법 모델링

플라이휠 시스템의 성능을 확보하기 위해서는 속도에 따른 시스템 안전성과 자이로스코프 효과에 대한 제어기의 보상이 필요한데 본 논문에서는 회전속도의 변화를 시스템의 불확실성으로 간주하여 모델을 구하고자 한다. 이러한 모델은 강인제어 방법을 이용하여 속도변화에 대응하는 최적제어기 설계를 가능하게 할 것이다. 회전속도를 기준속도 Ω_0과 그로부터의 차이 δ_Ω로 표현하면

$$\Omega = \Omega_0 + \delta_\Omega \tag{5}$$

시스템의 기준속도에서의 동적특성과 그로부터의 차이를 나누어 표현하기 위해

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -\Omega_0 M^{-1}G \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\delta_\Omega M^{-1}G \end{bmatrix} \tag{7}$$

를 정의하면 식(2)의 상태 방정식은 아래와 같이 변형해서 표기할 수 있다.

$$\dot{x} = A_0 x + \delta A x + Bu \tag{8}$$

식 (8)을 새로운 상태 방정식으로 변환하기 위해 새로운 신호 ω 와 υ를 아래와 같이 정의 한다.

$$\omega = C_\omega x \tag{9}$$

$$\upsilon = \Delta \cdot \omega \tag{10}$$

$$\Delta = \frac{1}{\Omega_0}\begin{bmatrix} \delta_\Omega & 0 \\ 0 & \delta_\Omega \end{bmatrix} \tag{11}$$

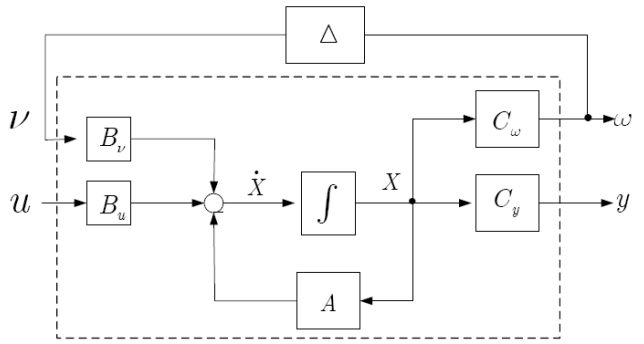

Fig3.block diagram of robust control model

이를 이용하여 식(8)을

$$\dot{x} = Ax + B_\nu \nu + B_u u \qquad (12)$$

와 같이 쓸 수 있으며 B_ν 와 C_w 는

$$B_\nu \Delta C_w = \delta A \qquad (13)$$

를 만족하여야 한다. 식(13)를 만족하는 B_ν 와 C_w 는 무수히 많을 수 있으며 그 중 하나로

$$B_\nu = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (14)$$

$$C_\omega = \frac{I_P}{I_t}\Omega_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (15)$$

를 사용하여 시스템 모델을

$$\dot{x} = Ax + B_\nu \nu + B_u u \qquad (16)$$
$$y = C_y x \qquad (17)$$
$$w = C_w x \qquad (18)$$
$$\nu = \Delta w \qquad (19)$$

와 같이 표현할 수 있다. Fig 3 은 이를 블록 선도로 나타낸 것이고 이를 이용하여 제어기 설계에 사용할 수 있다.

4. 제어기 설계 및 시뮬레이션

능동형 자기 베어링은 개루프 상태에서는 불안정하기 때문에 폐루프 궤환제어가 필요하다 제어기는 Fig.3 에서 y 신호를 받아 제어신호 u 를 생성해 내는데 예를들어 PD 제어기의 경우

$$\frac{u}{y} = C(s) = K_P + \frac{K_D S}{\tau_D s + 1} \qquad (20)$$

과 같은 전달함수 형태로 표현할 수 있다. 식(20)에서 K_P 는 비례이득, K_D 는 미분이득, τ_D 는 미분기의 대역폭을 제한하기 위한 시상수이다.

Fig.4 는 참고문헌 (3)의 플라이휠 시스템의 동적모델을 (16)~(19)로 구하고 식 (20)의 제어기를 적용하였을 때 시스템의 근궤적을 회전속도에 따라 그린것이다. 또한 Fig.5 는 회전속도에 따라 시스템의 위험속도(Critical speed)변화를 보여 준다. Fig.5 의 결과는 실험을 통해 관측된 결과와 일치한다.

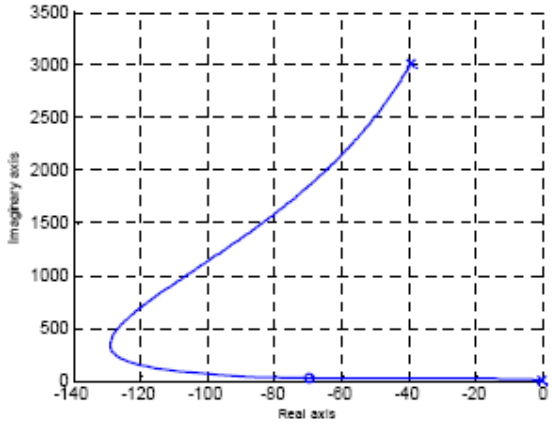

Fig4. Pole location of the system from zero to maximum speed

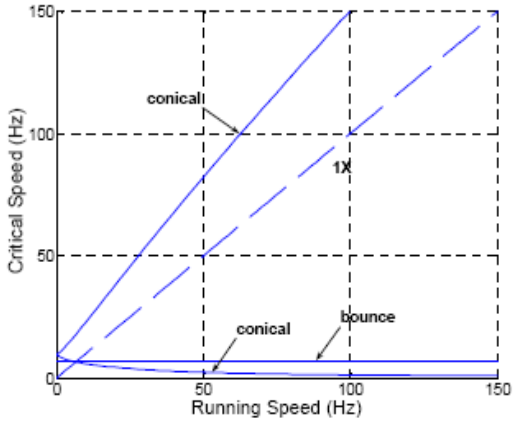

Fig5. Rigid body modes with respect to the running speed

5. 결론

본 논문에서 플라이휠 에너지 저장장치의 동역학적 모델을 구함에 있어 회전속도를 불확실 인자로 가정하여 기준모델에 불확실성을 포함하는 방법을 이용하였다. 이러한 모델은 잘 정립한 강인제어 기법을 적용하여 최적제어기를 설계하는데 매우 유용하다. 추후, 본 논문의 모델을 활용하여 회전속도의 변화에 따른 자이로스코픽 효과를 보상하는 제어기를 설계하고 구현하고자 한다.

참고문헌

1. Hwan-Myoung Jeoung, Jeoung, Jae-Wook Yeon, Jae-Ho Choi, Chang-Seop Koh, “Development of a Flywheel Energy Storage System using Superconducting Magnetic Bearing,” KIPE, vol 4, No 5, pp. 433~441, 1999.

2. Itaru Andoh, Akira Moriyama, Isao Takahashi, “Development of a high efficiency Flywheel UPS using 3 Arms Inverter/Converter,” T. IEE Japan, vol. 116- D, No. 11, 1996.

3. 유승열, 모상수, 최상규, 이정필, 한영희, 노명규, “자기부상형 플라이휠 에너지 저장 장치의 자기베어링 시스템 설계,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집, 963-967, 2007.