

# 강체 운동모델에 기초한 안정성 해석에 따른 대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 최적설계

## Optimal Design of Flywheel Energy Storage System Using Stability Analysis Based on Rigid-Body Model

김정완\* · 유승열\* · 배용채\*\* · 노명규†

Jung-wan Kim, Seong-yeol Yoo, Yong-Chae Bae and Myounggyu D.Noh

### 1. 서론

최근 이산화탄소나 메탄 등의 유해 온실가스가 문제가 되어 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 다양한 에너지 방안으로 신·재생에너지의 필요성이 대두되고 있다. 이와 더불어 에너지 저장기술의 중요성 역시 부각되고 있다. 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 전지[Battery]로 무정전 전원공급장치(Uninterruptible Power Supply)와 대형 전기 차량 등에 적용되고 있으며 무한대의 충전 전이 가능하여 친환경적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 시스템 설계시 고려해야 할 구조적 형상 제약 뿐만 아니라 시스템 안정성, 외란에 대한 강인성을 포함하는 제약조건을 적용하여 플라이휠 에너지 저장장치의 최적 설계를 수행하였다.

### 2. 장치구성 및 최적설계

#### 2.1 플라이휠 에너지 저장장치의 구성

플라이휠 에너지 저장장치는 회전축의 반경방향 상하부 한쌍의 능동형 자기 베어링(AMB)에 의해 지지되고, 플라이휠을 포함하는 회전체의 하중은 시스템의 상부에 위치한 축방향 능동형 자기베어링에 의해 지지된다. 능동형 자기 베어링의 경우 개루프 불안정성을 가지기 때문에 베어링 외측에 위치한 센서들에 의해 회전체 위치가 제어입력으로 사용된다.

#### 2.2 플라이휠 에너지 저장장치의 최적설계

† 교신저자; 충남대학교 메카트로닉스 공학과  
E-mail : mnoh@cnu.ac.kr  
Tel : (042) 821-6877, Fax : (042) 823-4919  
\* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단  
\*\* 전력 연구원

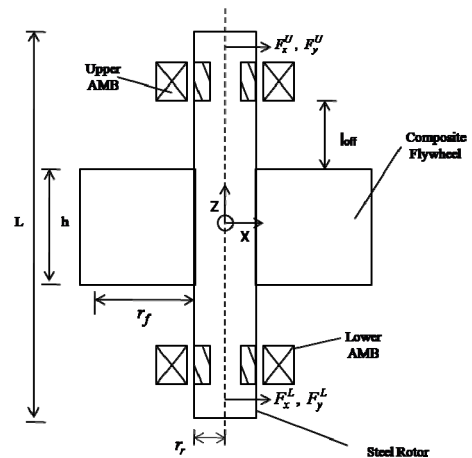


Fig.1 Schematic diagram and rotor of flywheel energy storage system and its components

최적설계의 편의를 위해 Fig.1의 시스템과 동역학적으로 동일하고 형태 면에서 단순화된 시스템을 대상으로 모델을 구하고 안정성 해석을 수행하고자 한다. Fig.1은 단순화된 플라이휠 에너지 저장장치이다. 최적설계의 목적함수와 설계 중요변수 및 제한 조건을 도출하기 위해 다음과 같이 시스템 특성을 정리할 수 있다. 극관성 모멘트는

$$I_p = \frac{1}{2} m_r r_r^2 + \frac{1}{2} m_f (r_f^2 + r_r^2) \quad (1)$$

으로 표현할 수 있고 횡관성모멘트는 아래와 같다.

$$I_t = \frac{1}{12} m_r (3r_r^2 + L^2) + \frac{1}{12} m_f (3r_f^2 + 3r_r^2 + h^2) \quad (2)$$

회전 운동에너지는 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} I_p \Omega^2 \quad (3)$$

최종적으로 플라이휠의 에너지 저장밀도는

$$\sigma = \frac{J}{m} \quad (4)$$

이다. 이와 같은 정의를 통해 저장에너지 혹은 에너지 밀도를 최대화하기 위한 FESS의 형상을 결정할 수 있다.

### 3. 시스템 모델링

시스템의 블록선도를 Fig 2.에 나타내었다. 신호  $d$ 는 질량불평형 힘으로 표현되는 입력 외란이며 측정잡음과 같은 다른 외란은 센서의 출력값에 포함되며 제어는 일반적인 PD 제어기가 사용되었다. 시스템 모델을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\Omega)x + B_r r + B_d d \\ y &= Cx + n \end{aligned} \quad (5)$$

시스템 행렬  $A(\Omega)$ 는 자이로스코프 효과에 의해 회전속도에 영향을 받는다. 시스템의 안정성과 외란에 대한 강인성을 평가하기 위해 민감도 함수를 사용할 수 있는데 민감도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$T_s(s) = (I + G_s G_p G_a G_c)^{-1} \quad (6)$$

### 4. 최적화

최적 설계를 위한 제약조건으로 굽힘임계속도, 시스템 안정성, 민감도를 고려하여 최대 회전속도를 제한할 수 있다  $I_p / I_t$  (관성비율)에 따른 형상별 수치는 모든 경우 최대회전속도 20,000rpm에서 약 5kWh의 가용에너지를 갖도록 설계되었다 이때 가용에너지는 수식(3)의 75%로 정의한다.

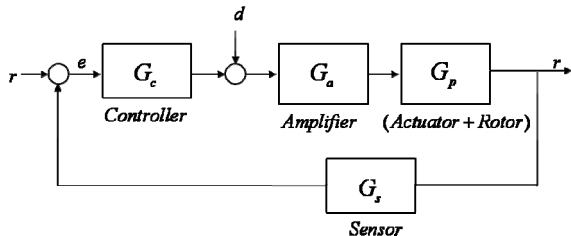


Fig. 2 Block diagram of the system model

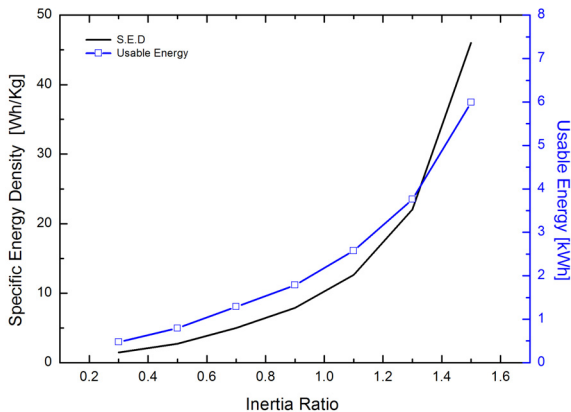


Fig. 3 Specific energy density and usable energy of FESS considering the limiting speeds by bending margin

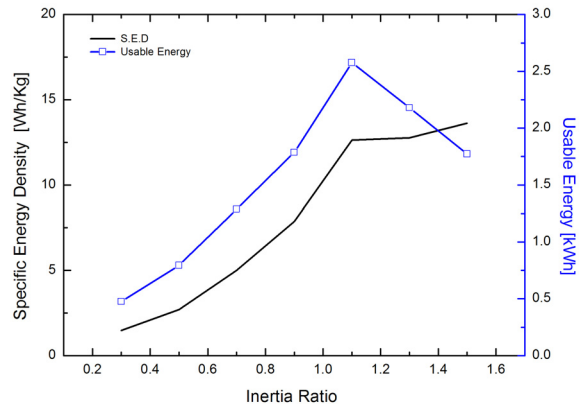


Fig. 4 Specific energy density and usable energy of FESS considering all limiting speeds by bending margin, by stability and by peak sensitivity

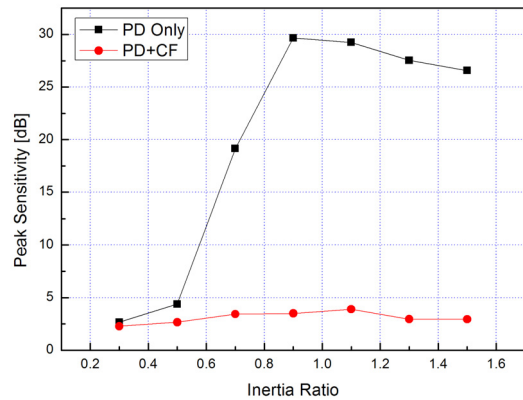


Fig. 5 Peak sensitivities with PD controller and with PD plus cross feedback controller

첫번째 제약조건으로 굽힘 여유도를 20%로 설정하면 굽힘여유도에 의한 최대속도를 이용하여 관성비율에 따른 가용 에너지와 에너지 밀도를 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 식(6)으로 표현된 시스템 민감도 함수를 이용하여 시스템 극점위치가 복소평면의 좌평면에 위치하는지를 확인하면 시스템 안정성을 확인할 수 있고 외란 'd'에서 센서출력 'y'에 대한 시스템 민감도함수를 살펴보면 제어 강인성 제약 조건을 파악할 수 있다. 이를 고려한 관성비율별 에너지 밀도와 가용 에너지를 Fig.4에 나타내었다. 이때 관성비율 1.1 시스템에서 최대 가용 에너지를 갖는다.

Fig. 5를 통해 PD 제어기와 함께 교차궤환 제어를 사용하면 시스템의 안정성과 최대민감도에 따른 제약조건을 완화되는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

능동형 자기베어링 제어에 있어 PD 제어기를 사용할 경우 교차궤환제어가 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.