시스템 안정성 측면에서의 플라이휠 에너지 저장장치의 설계

Design of Flywheel Energy Storage System from Stability point

*유승열 [1], 이욱륜 [2], 배용채 [2], #노명규 [1]
*S. Y. Yoo[1], U. R. Lee[2] , Y. C. Lee[2], #M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)[2]
[1] 충남대학교 메카트로닉스공학과, [2] 전력연구원

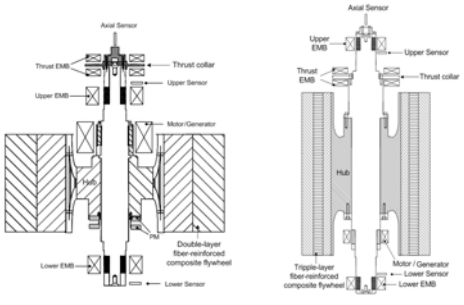
Key words : Flywheel energy storage system, Stability, Active magnetic bearings

1. 서론

최근 에너지 저장수단으로 플라이휠 시스템이 많이 연구되고 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 입력되는 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지의 형태로 변환하여 저장하고, 필요 시 저장된 회전운동에너지를 전기에너지로 변환하여 출력하는 장치로서, 무한대의 충/방전 주기와 무윤활로 인한 환경친화적 특성, 반영구적인 수명, 높은 효율 등의 장점을 가진다.[1] 플라이휠 에너지 저장장치는 효율적 측면에서 운전 중 마찰을 초소화해야 하기 때문에 비접촉 능동형 혹은 수동형 자기베어링을 사용하고, 진공환경 내에서 작동한다. 플라이휠 에너지 저장장치는 가능한 많은 에너지를 저장하기 위해서 관성모멘트 비율(I_p / I_t)을 증가시키거나 첫 번째 임계속도 근처까지 운행속도를 높이는 경우가 많다. 하지만 질량관성모멘트 비율의 증가는 에너지 저장측면에서는 유리하게 작용할 수 있으나, 시스템 제어 측면에서는 자이로스코프 효과가 커지기 때문에 오히려 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 본 논문에서는 서로 다른 질량관성모멘트 비율을 가지는 두 개의 플라이휠 회전체를 제작하고, 제어기, 자기베어링, 전류증폭기 등을 포함하는 연성회전체 모델을 이용하여 자이로스코프 효과가 에너지 저장용량과 시스템 안정성에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 시스템 개요

Fig.1 은 서로 다른 질량관성모멘트 비율을 가지는 두 개의 플라이휠 시스템 개략도이다. 두 플라이휠 에너지 저장장치는 모두 같은 극질량관성모멘트와 최고 운전속도 18,000 rpm 에서 5kWh 의 에너지를 저장하도록 설계되었다. Fig. 1 의 FESS-I 은 관성모멘트 비율이 1.35 이고, 이중구조의 섬유강화 복합재료로 이루어진 플라이휠이 장착되어 있고, 플라이휠을 포함한 회전체의 무게는 약 235kg 이다. FESS-II 는 관성모멘트의 비율이 0.5 이고, 삼중구조의 섬유강화 복합재료로 이루어진 플라이휠이 장착되어 있으며, 플라이휠을 포함한 회전체의 무게는 400kg 이다. 두 시스템의 반경방향 베어링의 부하용량은 각각 1000N, 1330N 을 가지도록 설계되었고, 제어기는 분산 PD 제어기와 교차 궤환제어기 [2]를 이용하였으며 MathWorks 사의 xPC toolbox 와 Real-Time Workshop[3]을 이용하여 구현하였다.



(a) FESS-I b) FESS-II

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

3. 시스템 모델링

본 논문에서는 유한요소법 [4]을 이용하여 연성 회전체의 모델을 구하였다. 각각 균일한 기하학적 형상과 재료 물성치를 가지는 여러 개의 요소로 나누고, 하나의 요소에 대해 빔 이론을 적용하여 동역학식을 구하여 요소간에 경계조건을 적용하면 다음과 같은 회전체 전체의 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{G}\dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{K}\mathbf{Q} = \mathbf{F} \tag{1}$$

식 (1)에서 전역 질량(M), 자이로스코프(G), 강성(K) 행렬은 각 요소 행렬들의 합으로 이루어지고, Q 는 변위 벡터이다. 능동형 자기베어링 모델은 회전체가 미소변위를 가진다고 가정하면 바이어스 선형화 방법 [5]을 이용하여 자기베어링의 선형 모델을 얻을 수 있다. 입력 전류 **u** 로부터 발생하는 힘 **F** 사이의 관계를 나타내는 자기베어링의 선형 모델은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}_x\mathbf{Q} + \mathbf{K}_a\mathbf{u} \tag{2}$$

식 (2)에서 베어링 강성행렬 $\mathbf{K}_x$ 와 구동기(자기베어링) 게인 행렬 $\mathbf{K}_a$ 는 극단면적, 극당 권선수 초기공극 등과 같은 자기베어링의 설계 변수로부터 구해진다. 상태 벡터를 $\mathbf{x} = [\mathbf{Q}\ \dot{\mathbf{Q}}]^T$ 와 같이 정의하고 식 (1)와 (2)를 합하면 두 개의 자기베어링으로 지지되는 회전체의 상태방정식을 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K}+\mathbf{K}_x) & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} \end{bmatrix}\mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_a \end{bmatrix}\mathbf{u} \tag{3}$$

센서와 제어기는 각각 전달함수 형태로 모델링될 수 있다.

제어기와 센서, 자기베어링과 회전체 모델을 포함하는 시스템 모델을 modal truncation[6] 을 이용하여 가장 영향이 큰 모드만을 포함하도록 시스템 차수를 낮출 수 있다. 이렇게 구한 시스템 모델을 검증하기 위하여 실험적으로 시스템 전달함수를 측정하였다. 제어기 출력단에 일정한 주파수를 가지는 정현파 신호를 입력하고 회전체의 응답신호를 측정하면 주파수 분석 기법을 이용하여 주파수 응답함수(FRF)를 구할 수 있다. Fig. 2 은 FESS-I 의 주파수 응답 함수(FRF)를 나타낸 것이다. 유한요소법을 이용하여 구한 시스템 모델과, modal truncation 을 이용한 모델, 실험을 통해 구한 모델이 첫번째 굽힘모드를 포함하면서 일치함을 알 수 있다. Fig. 3 는 FESS-II 의 주파수 응답함수를 나타내며, 세가지 모델 모두 잘 일치하는 시스템 특성을 보여주고 있다. 이렇게 실험적으로 검증된 모델을 이용하여 관성모멘트 비율에 따른 시스템의 효율과 안정성에 대하여 살펴보겠다.

4. Discussion

두 시스템은 18,000rpm 에서 동일한 에너지 저장 용량을 가지지만, 횡질량관성모멘트와 회전체 질량이 다르기 때문에 서로 다른 관성모멘트 비율과 에너지 저장밀도을 가지

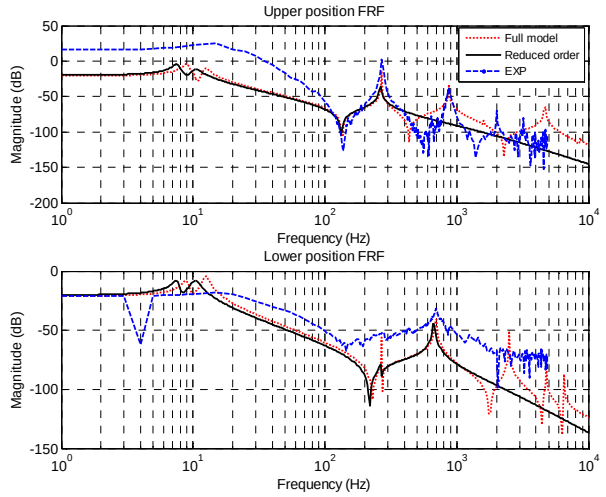


Fig. 2 Comparison of system transfer function of the system 1

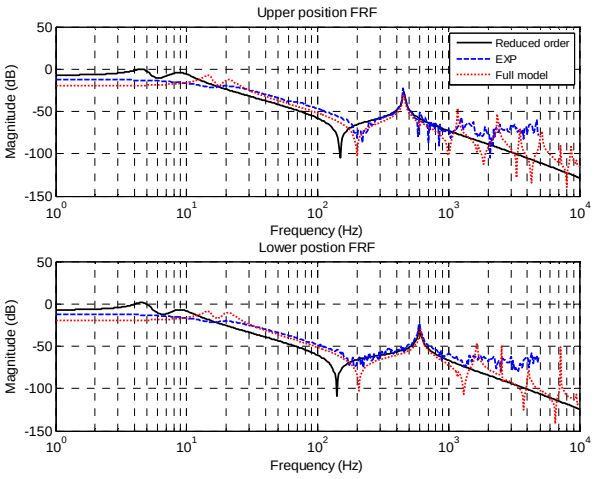


Fig. 3 Comparison of system transfer function of the system 2

게 된다. 에너지 저장밀도는 플라이휠 에너지 저장장치의 효율성을 판단할 수 있는 기준으로서 극질량관성모멘트와 회전속도에 영향을 받게 된다. Fig. 4 는 회전 속도에 따른 두 시스템의 에너지 저장밀도와 외란을 포함하는 입력에 대한 민감도를 나타낸 곡선이다. Fig. 4 에서 점선으로 표시된 그래프(오른쪽 수직축)를 보면 관성 모멘트 비율이 클수록 회전속도 증가에 따른 에너지 저장밀도의 증가율이 커지므로, 비율이 클수록 시스템의 효율이 높아지는 것을 의미한다. 반면에 실선으로 표시된 그래프(왼쪽 수직축)를 보면 회전속도가 증가 할수록 비율이 큰 시스템이 외란에 대한 민감도가 더 커짐을 알 수 있다. 시스템의 안정성은 제어측면에서 극점의 위치로서 판단할 수 있다. Fig. 5 는 회전속도에 따른 최우측 극점의 위치변화를 나타낸 그래프로서, 수직축은 복소평면의 실수축을 나타낸다. FESS-II 는 회전속도가 증가함에 따라 최우측 극점이 계속 안정한 영역에 위치하는 반면 FESS-I 은 약 9000rpm 부근에서 불안정영역으로 이동하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 두 가지 관성모멘트 비율을 가지며, 동일한 운전속도에서 동일한 에너지 저장용량을 가지는 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하고, 에너지 저장 효율성과 시스템의 제어 안정성을 비교하였다. 이를 위해, 유한요소법과 modal truncation 을 이용하여 시스템의 동역학적 모델을 구하고 실험을 통하여 검증하였다. 회전속도에 따른 에너지 저장밀도와 민감도, 최우측 극점의 위치 등의 관계를

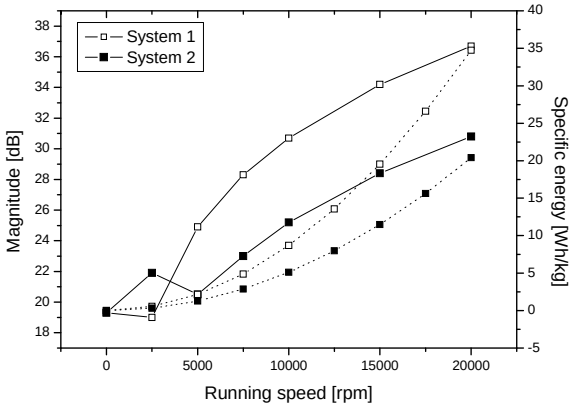


Fig. 4. Sensitivity plot (—) and specific energy density plot (---) with respect to the running speed.

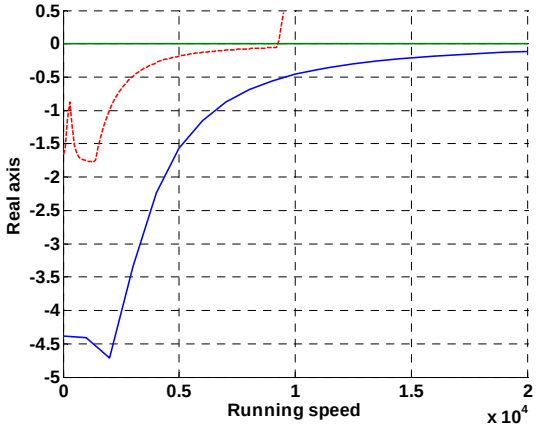


Fig. 5. Real part of the rightmost pole of the systems. (---) : FESS-I, (—) : FESS-II.

통해 시스템 효율성과 제어 안정성에 대하여 알아보았다. 검증된 시뮬레이션 모델을 통하여 플라이휠 에너지 저장장치의 관성모멘트 비율이 높을수록 효율성 측면에서 이점을 이 있으나 안정성 측면에서는 회전 속도가 증가함에 따라 민감도가 높아져서 오히려 불리한 제어 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 이를 통해 플라이휠 에너지 저장 장치를 설계 및 제작 시, 에너지 저장 효율 뿐만 아니라 운전 안정성 역시 반드시 고려되어야 하는 요소라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Koshizuk, *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, *et. al.*, “Performance of a magnetically suspended flywheel energy storage device,” IEEE Trans. on control sys. Tech., Vol.4, No.5, 1996.
3. xPC toolbox and TATLAB, The Mathworks Corporation, Cambridge, USA.
4. H. D. Nelson and J. M. Mcvaugh, “The dynamics of rotor-bearing systems using finite elements,” ASME Journal of Eng. For Ind., Vol.98, pp.593-600, 1976.
5. E. H. Maslen and D. C. Meeker, “Fault tolerance of magnetic bearings by generalized bias current linearization,” IEEE Trans. Magnetics, Vol.31, pp.2304-2314, 1995.
6. D. Childs, “Turbomachinery rotordynamics,” New York : John Wiley & Sons, 1993.