

5kWh Flywheel 에너지 저장장치 시스템의 설계 및 제어

Design and control of 5kWh flywheel energy storage system

*#박철훈¹, 최상규¹, 함상용¹, 이성휘¹, 윤동원¹, 한영희²

*#C. H. Park(parkch@kimm.re.kr)¹, S. K. Choi¹, S. Y. Ham¹, S. H. Lee¹, D. W. Yun¹, Y. H. Han²

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, ² 한국전력연구원 전라기술연구소

Key words : FESS(Flywheel energy storage system), AMB(Active Magnetic Bearing), Rotor dynamics, Imbalance Response

1. 서론

최근 화석에너지 고갈과 기후변화 협약에 대응하고 환경친화적이며 안정적인 에너지 자원을 확보하기 위해 풍력발전 시스템이 주목을 받고 있다. 풍력발전은 출력 변동율이 크기 때문에 에너지 저장장치를 연계하여 계통을 안정화시키고 풍력발전의 운전효율을 극대화 시킬 필요가 있다. 이러한 에너지 저장장치의 필요성에 의해 5kWh 급 FESS가 개발되었다. 15,000rpm 에서 사용 가능한 에너지의 출력이 5kWh 가 되도록 시스템을 설계, 제작 후 동작 실험을 완료하였다. 에너지 저장장치의 특성상 회전 손실을 최소화 하기 위하여 진공 챔버 내에서 플라이휠이 회전하며, 자기 베어링을 사용하여 회전 축을 지지한다. 본 논문에서는 안정적인 플라이휠 회전축계의 구동을 위한 FESS의 설계/제작 사례, 회전 구동 실험을 통한 자기 베어링 제어기와 회전축계의 안정성 평가 결과를 제시한다.

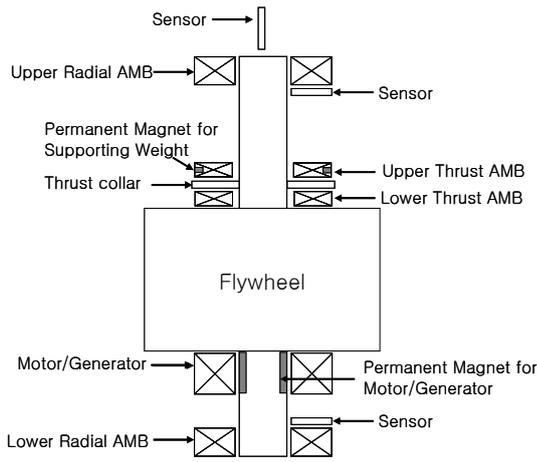


Fig. 1 Schematic diagram of FESS

2. FESS의 설계와 제작

Fig. 1은 설계된 FESS의 개략도이다. FESS는 회전 손실을 최소화하기 위하여 일반적으로 전자석을 이용한 자기 베어링(AMB)을 사용하여 회전축을 지지한다. 전자석베어링에 의한 에너지 손실을 최소화하기 위해서는 불평형 응답에 대한 제어입력을 최소화하여야 한다. 따라서, 플라이휠의 형상이 $I_p/I_t = 0.5$ 가 되도록 설계하여 3~4,000rpm 이하의 회전속도에서 강제모드를 모두 통과한 후 동작속도에서 불평형 응답이 최소화 되도록 하였다. 축 방향의 자기베어링은 1mm의 간격에서 플라이휠의 무게를 지탱할 수 있는 자력의 영구자석을 상부 축 방향 액츄에이터의 중간에 삽입한 Hybrid double acting 방식으로 설계하여 전자석 베어링의 축방향 제어입력이 최소화되도록 하였다.

목표속도인 15,000rpm에 해당하는 250Hz 이상에서 AMB의 응답성과 제어기 설계의 자유도를 확보하기 위하여 회전축의 1차 굽힘 모드 주파수가 450Hz 이상에 위치할 수 있도록 설계하였다. 이를 위해 무거운 thrust collar에 의한 부가질량의 영향이 최소화 되도록 최대한 축의 중앙부에 가깝게 위치시켰으며, 모터용 영구자석의 위치를 회전축하부로 이동시켜 부가질량에 의한 부담을 회전축 상하부

에 고르게 분산시켰다. 회전축의 재질은 가격이 저렴하고 가공이 쉬운 SUS304를 사용하였으며, 플라이휠의 재질은 원심력에 의한 인장을 견딜 수 있도록 복합재를 사용하였다. Fig. 2에 설계된 플라이휠의 상세한 구조를 나타내었다.

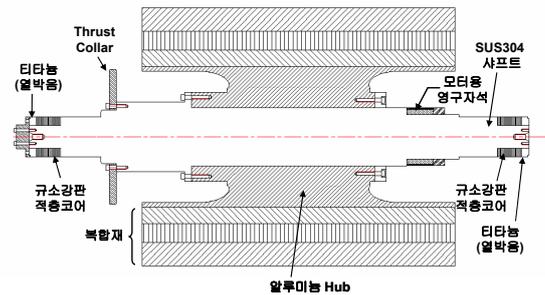


Fig. 2 Detailed Configuration of Flywheel

Table 1 Specification of Flywheel

항목	내용
재질	SUS304
질량[kg]	407
길이[mm]	1119
직경[mm]	580
I_p/I_t	0.51

3. FESS의 회전 구동 실험 결과

Fig. 3에 제작된 플라이휠과 FESS의 사진을 나타내었다. FESS의 제어기를 설계하고 적절한 필터를 설계하기 위해 swept sine 방법으로 플라이휠 회전축, 전자석 베어링 액츄에이터, 파워 앰프와 센서의 동특성을 포함한 AMB의 주파수 응답을 측정하였다.

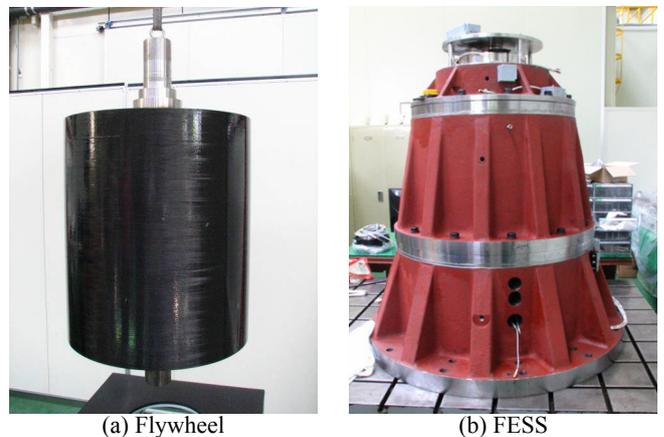


Fig. 3 Manufactured flywheel and FESS

상부와 하부 AMB의 주파수 응답을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 상하부 AMB의 주파수 응답을 살펴보면 610Hz에 1차 굽힘 모드가 존재한다는 것을 알 수 있다. 목표속도인 15,000rpm에 해당하는 250Hz는 1차 굽힘 모

드 주파수인 610Hz 에 대해 강제모드만 고려하여 제어할 수 있을 만큼 충분히 멀리 떨어져 있다. 주파수응답 측정을 통해 파악된 AMB 의 동특성을 바탕으로 PD 제어기의 게인을 선정하였고, 1 차 굽힘 모드를 자극하지 않도록 하기 위해 시스템의 오픈 루프 보테 상에서 1 차 굽힘 모드의 크기가 -15dB 이하가 되도록 노치필터를 설계하였다.

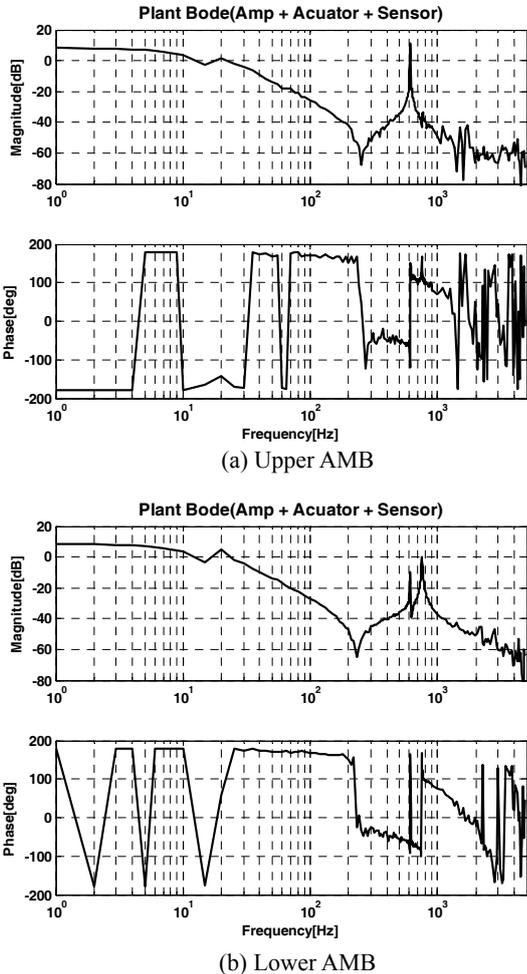


Fig. 4 Frequency response function of AMBs

제작된 FESS 와 제어기를 사용하여 목표속도인 15,000 rpm 까지 회전속도를 증가시키면서 구동 실험을 진행하였다. Fig. 5 에 15,000rpm 에서 상부와 하부 회전축의 런아웃에 대한 orbit plot 을 도시하였다. 1x 이외의 런아웃 성분은 거의 존재하지 않고, 직경 약 20um 이내의 orbit 을 형성하며 안정적으로 동작함을 알 수 있다. 회전축과 300um 의 간격을 가지고 설치되어있는 터치다운 베어링과 충분한 반경방향의 여유를 가지면서 AMB 가 동작하고 있으며, 회전축과 AMB 는 만족할 만한 성능을 발휘하고 있다는 것을 확인하였다.

런아웃 성분의 대부분을 차지하는 것은 1x 성분인데, 1x 성분의 대부분은 회전체의 불평형에 대한 응답이다. 이 불평형 응답은 회전체의 진동 모드를 반영하면서 크기가 변한다. 정지 상태에서부터 회전 속도 15,000rpm 사이에서 회전 속도에 대한 상부 1x 성분의 변화를 Fig. 6 에 도시하였다. 병진위험속도가 1,200rpm, 원추위험속도가 3,000rpm 에 위치하고 있다는 것을 명확하게 볼 수 있으며, 회전속도가 병진위험속도를 통과할 때도 제로-투-피크 런아웃의 크기가 17um 이하이고, 원추위험속도를 통과한 후에는 크기 10um 이내의 런아웃을 보이며 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

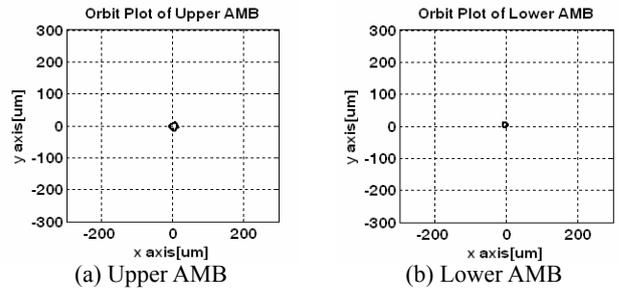


Fig. 5. Orbit plot of AMBs at 15,000rpm

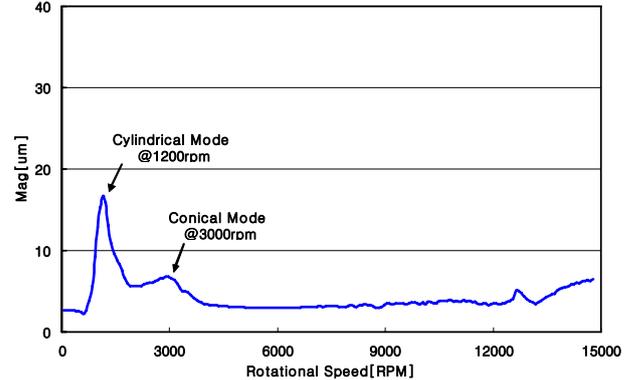


Fig. 6. Magnitude of 1x component for the rotational speed in upper AMB

4. 결론

본 논문에서는 자기베어링을 사용한 5kWh FESS 를 개발하는 과정에서 설계에 고려되었던 사항들을 소개하고, 회전 구동 실험을 통해 목표속도인 15,000rpm 까지 안정적으로 동작하였음을 보였다. 회전축의 1 차 굽힘 모드 주파수를 올리기 위한 설계가 실제 플라이휠의 제작 후 측정된 주파수응답을 통해 효과적이었음을 확인하였다. 플라이휠의 형상을 $I_p/I_f = 0.5$ 이 되도록 설계한 것이 플라이휠의 불평형 응답을 최소화하여 자기베어링의 제어입력을 줄이는데 효과적임도 확인하였다. 1 차 굽힘 모드 주파수와 불평형 응답에 대한 충분한 여유를 가지도록 설계/제작된 플라이휠에 대해서는 단순 PD 제어기와 노치필터만으로도 15,000rpm 의 회전속도에서 직경 20um 이내 크기의 런아웃을 가지는 만족할 만한 성능을 얻을 수 있다.

후기

본 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Park, C.H., Choi, S.K., Lee, J.P. and Han, Y.H., "On the Dynamic Behavior of a 5kWh FESS Mounted on AMBs", The 11th International Conference on Mechatronics Technology, 416-420, 2007.
2. Vance, J. M., "RotorDynamics of TurboMachinery," A Wiley-Interscience Publication, 116-130, 1988
3. Ahrens, M., Kucera, L. and Larsonneur, R., "Performance of a magnetically suspended flywheel energy storage device," IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 5, 404-502, 1996.