

Damping Properties of a Superconductor Bearing in a 35 kWh Class Superconductor Flywheel Energy Storage System

B. J. Park^{*}, S. Y. Jung, S. C. Han, S. J. Han, D. H. Lee, Y. H. Han

KEPCO Research Institute, Smart Energy Laboratory, Daejeon, Korea

Hankook engineering, Daejeon, Korea

(Received 10 August 2012; revised 17 August 2012; accepted 20 August 2012)

35 kWh급 플라이휠용 초전도 베어링의 댐핑 특성평가

박병준^{*}, 정세용, 한상철, 한상진, 이대화, 한영희

Abstract

Superconductor flywheel energy storage system (SFESs) is an electro-mechanical battery with high energy storage density, long life, and good environmental affinity. SFESs have been developed for application to a regenerative power of train, the storage of distributed power sources such as solar and wind power, and a power quality improvement. As superconductor bearing is completely passive, it is not necessary to control a system elaborately but accurate analysis in mechanical properties of the HTS bearing is very important for application to SFESs. Stiffness and damping properties are the main index for evaluation the capacity of HTS bearings and make it possible to adjust rotordynamic properties while operating the rotor-bearing system. The superconductor bearing consists of a stator containing single grain YBCO bulks, a ring-type permanent magnet rotor with a strong magnetic field that can reach the bulk surface, and a bearing support for assembly to SFESs frame. In this study, we investigated the stiffness and damping properties of superconductor bearings in 35 kWh SFESs. Finally, we found that 35 kWh superconductor bearing has uniform stiffness properties depend on the various orientations of rotor vibration. We discovered total damping coefficient of superconductor bearing is affected by not only magnetic damping in superconductor bulk but also external damping in bearing support. From the results, it is confirmed that the conducted evaluation can considerably improve energy storage efficiency of the SFESs, and these results can be used for the optimal capacity of superconductor bearings of the SFESs.

Keywords : Superconductor bearing, Stiffness, Damping, Rotor

I. Introduction

초전도 플라이휠 에너지 저장장치 (Superconductor Flywheel Energy Storage System, SFESs)는 전기에너지를 회전에 의한 관성 운동 에너지로 변환하여 저장하고 저장된 운동에너지

^{*}Corresponding author. Fax : +82 42 865 5202

e-mail : hampstead@kepcoco.kr

지를 전기에너지 형태로 공급하는 저장 장치이다. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 급속 충방전이 가능하고 에너지 저장 효율이 좋으며 수명이 길어 신재생에너지의 저장 매체로서 각광을 받고 있으며 특히 풍력, 태양광 등 신재생 에너지의 출력 품질 향상, 철도의 회생전력, 스마트/마이크로 그리드 연계의 저장매체 적용에 활발한 연구가 진행되고 있다 [1]. 초전도 플라이휠에너지 저장장치는 회전 에너지를 제공하는 모터, 에너지를 저장하는 플라이휠, 플라이휠을 지지하는 초전도 베어링(Superconductor Bearing) 및 전자석 댐퍼(Active magnetic bearing, AMD)으로 크게 구성되어 있으며 진공중에 무접촉의 초전도 베어링을 사용하여 휠을 지지하기 때문에 회전에너지의 각종 마찰손실을 줄일 수 있다. 또한 고속회전중 에너지 저장효율이 높으며 저장밀도가 높다는 장점이 있다 [2]. 특히 초전도 베어링은 극저온 상황에서 동작이 되므로 급작스러운 운전실패나 무정전상황에서도 운전온도만 유지하면 휠을 안전하게 보호하며 브레이킹이 가능하다. 초전도 베어링은 수명이 반 영구적이나 일단 시스템에 장착이 되면 초기 특성 변경이 어렵다는 점에서 시스템 운전 전에 베어링의 정확한 지지 특성 파악이 필수적으로 이루어 져야 한다. 초전도 베어링은 초전도 단결정 벌크와 냉각조(cryostat)로 구성되는 고정자(stator)와 플라이휠에 일체형으로 장착되어 회전하면서 고정자에 자기력을 제공하는 회전자(rotor)로 구성이 되며 고정자와 회전자 사이의 자속(magnetic flux) 상호작용에 의해 기계적 특성이 결정되게 된다 [3]. 이러한 초전도 벌크를 이용한 초전도 베어링은 모듈 타입으로 장착되어 메인テナンス가 유리하며 구조 변경이 다른 초전도 베어링보다 용이하다는 장점을 가지고 있다 [4].

본 연구에서는 초전도 베어링의 진동 제어 성능을 평가 하기 위하여 실제 35 kWh급 플라이휠에 초전도 베어링을 장착하여 가진상황을 제공한 후, 지지되는 지름방향 강성(stiffness) 특성을 알아 보았다. 이후 강성과 측정된 진동 감쇠 데이터를 기반으로 초전도베어링의 지름방향 각도별에 따른 댐핑 특성을 평가 하였다. Fig. 1은 설계된 35 kWh급 초전도 플라이휠의 디자인 단면을 보여 주고 있다.

본 연구에서는 대용량 초전도 베어링에 대한 강성 및 감쇠변화 경향성을 분석하여 실제 초전도 베어링 실증 적용시 최적의 로터운전(rotordynamic) 특성 유지를 위한 성능향상에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행 하였다.

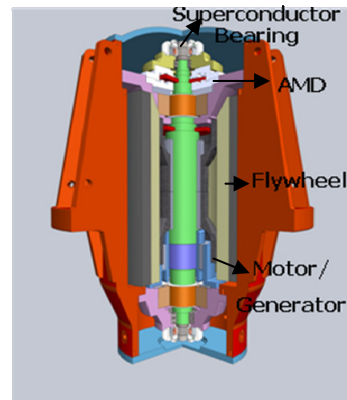


Fig. 1. Design of 35 kWh class superconductor flywheel energy storage system.

II. 제작 및 시험

35 kWh급 초전도 베어링은 단결정 초전도 벌크로 이루어진 고정자(stator)가 로터를 둘러싸고 있는 내륜형 타입으로 구성되며 기계적 강도와 열침입을 고려하여 단열소재의 베어링 지지대가 플라이휠 프레임과 조립 된다. Fig. 2는 실제 제작된 35 kWh급 초전도 베어링의 고정자를 보여 주고 있으며 Fig. 3은 35 kWh 급 SFESs에 장착된 초전도 베어링 회전자(rotor)의 조립단면을 보여 주고 있다.

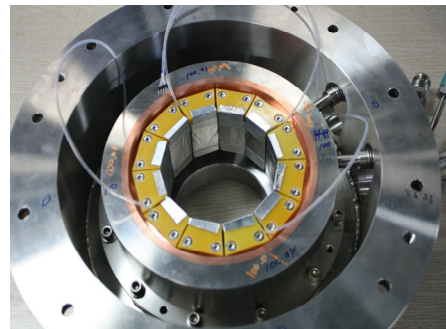


Fig. 2. Stator of 35 kWh superconductor bearing.

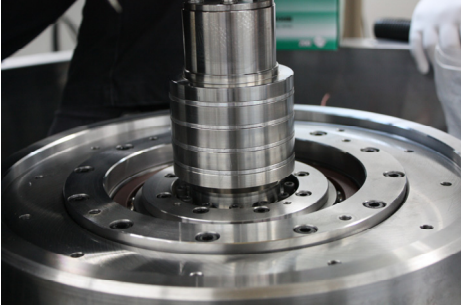


Fig. 3. Rotor of 35 kWh superconductor bearing.

이때 평가에 사용된 초전도 단결정 벌크는 Sm seed를 이용한 YBCO(23*28*12 mm)로 제작되었으며 자기 플럭스가 균일하게 주입될 수 있도록 직경 88.8 mm, 표면자장 0.5T인 Nd-Fe-B 영구자석을 이용하여 회전자를 제작하였다. Fig. 4는 SFESs에 장착된 초전도 베어링 시스템의 장착 사진을 보여 주고 있다.

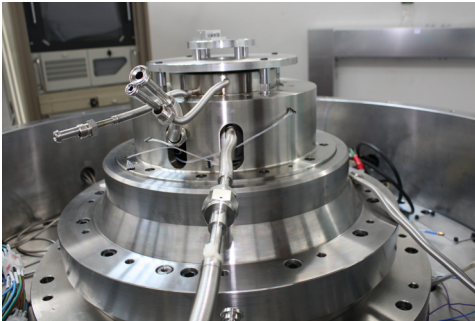


Fig. 4. 35 kWh superconductor bearing system.

본 연구에서는 초전도 베어링의 진동제어 특성을 평가하기 위하여 실제 35 kWh급 SFESs를 조립 후, 플라이휠 회전축을 지름방향 AMD로 가진하여 진동과 동시에 보이는 자유 응답 특성을 분석하여 강성과 댐핑을 평가 하였다. 평가에 사용된 AMD는 회전체의 상하부에 장착되어 있으며 X, Y의 반경방향 센서를 통해 회전체의 위치를 측정하여 제어입력으로 받아 회전체에 힘을 가하게 된다. 35 kWh급 초전도 플라이휠 운전시 코니컬 모드 진동크기를 고려하여, 0.2 mm 진폭을 주어진 지름방향 각도의 벌크 위치로 당겨 로터를 위치하였다. 이후 AMD의 자기력을 제거하고 초전도 베어링에 의해 지지되는 플라이휠 로터의 자유응답

특성을 파악 하였다.

III. 실험 결과

Fig. 5는 0°방향에서 AMD를 통해 35 kWh 급 SFESs 회전체를 당긴 후 힘을 제거했을 때, 시간에 따라 변하는 회전체의 지름방향 변위를 보여 주고 있다.

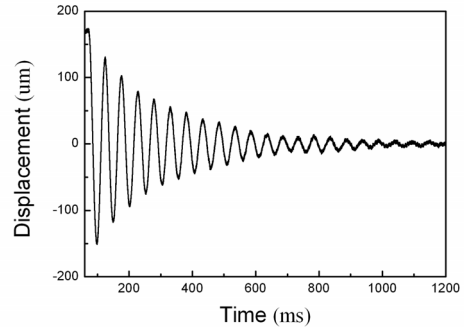


Fig. 5. Response of an underdamped system.

실험결과, 초전도 베어링에 의하여 1.6 ton의 무게를 가지는 플라이휠 로터가 약 1.2 sec 안에 진동의 대다수 성분이 제어 된 것으로 평가 됐다. 이때 플라이휠 로터는 외팔보처럼 움직이게 되어 회전운동을 하지만, 35 kWh급 회전축이 2 m가 넘는 것을 감안하면 극히 미량이므로, 회전체의 움직임을 직선 운동 한다고 가정하여 수식 (1)과 같이 운동방정식을 유도 할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{X_1}{X_{N+1}} \right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{\delta/2\pi}{\sqrt{1+(\delta/2\pi)^2}} \quad (3)$$

이때 m 은 질량, x 는 변위, c : 감쇠계수, k : 강성계수, δ : 대수 감쇠율, ξ : 감쇠비, N : 주기, X : 진폭을 나타낸다.

35 kWh급 초전도 플라이휠은 고속운전상태의 회전체의 안정성 및 제어를 위하여 비교적 저속인 2,000 rpm 이하에서 회전체 모드에서 가장 큰 1X 병진모드와 코니컬 모드가 이루어지도록 설계되어 있다. 이때의 진동 방향은 불규칙하므로, 베어링의 등방성에 의해 강하게 제어되어야 하며, 진동을 감쇠 하지 못하면 시스템 파괴에 큰 영향을 미칠 수 있다. 제작된 35 kWh급 초전도 베어링 강성의 등방성을 확인하기 위해 회전체를 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 270°, 315°방향에서의 가진에 따른 자유응답 특성을 파악하였다.

자유응답 특성 평가중에 측정된 로터의 동심도는 ±0.02 mm 이내였으며 온도 편차는 Fig. 6에서 확인 할 수 있듯이 ±2.5 kelvin 이내에서 평가 되었다. 이후 얻어진 실험 결과를 수식 (1) ~ (3)의 운동방정식을 통해 계산하여 Fig. 7, Fig. 8에 각각 강성과 댐핑의 결과를 도식화 하였다.

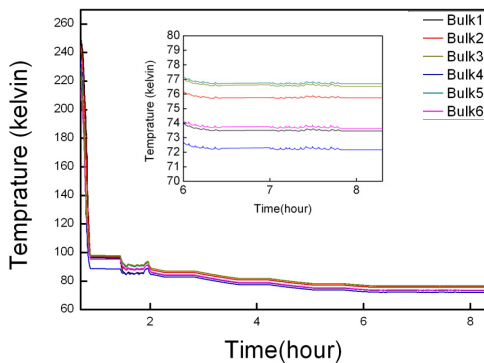


Fig. 6. Cooling temperature results of 35 kWh superconductor bearing.

Fig. 7에서도 확인 할 수 있듯이 제작된 초전도 베어링은 각 제어 각도에 따라 강성이 340,000 N/m ~ 351,000 N/m 로 ± 2 % 이내의 편차를 보이며 균일한 지지 특성을 가지는 것을 확인 하였다. 특히 135°방향을 기준으로 양 방향으로 강성이 비슷하게 좌우 대칭으로 변화하고 있음을 확인 할 수 있었다.

이는 회전자 및 단결정 벌크 사이의 균일한 pinning flux 형성, field cooling 시의 정확한 동심 위치, 벌크 냉각 온도 편차에 따른 영향이라고

판단할 수 있다. 초전도 제조 공정상 100% 동일한 자기특성을 갖는 벌크를 제조하기 힘든 것을 감안하면 본 연구에서 제작된 35 kWh급 초전도 베어링은 균질한 지지력이 요구되는 회전체 적용에 있어 적합한 강성 특성을 갖는다고 말할 수 있다. 특히 ± 2 %의 지름방향 강성 편차는 냉각 온도의 편차를 최소화 함으로써 더욱 향상시킬 수 있을 것이라 사료 된다.

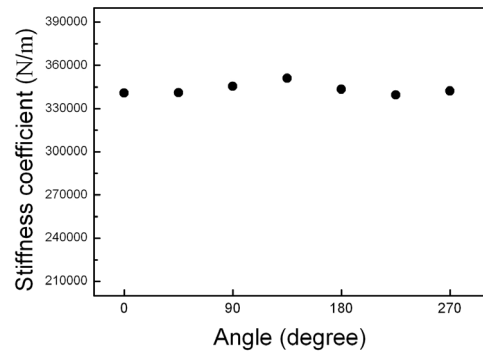


Fig. 7. Stiffness coefficient results of 35 kWh superconductor bearing.

전자식으로 제어하는 베어링은 능동형 제어 (active control)로 갑작스러운 진동이나 damage에 시스템이 불안해져 백업 베어링에 접촉하면 오히려 중심을 잡으려는 제어력이 가진의 원인을 제공하여 시스템에 큰 파괴를 일으킨다. 하지만 초전도 베어링과 같은 피동형 제어 (passive control) 베어링은 시스템의 갑작스러운 손상에서도 field cooling 된 위치로 강성 및 댐핑을 균일하게 제공할 수 있는 것이 가장 큰 장점이나 진동 제어력이 튜닝을 통해 향상 어렵기 때문에 진동감쇠와 같은 주요 지표에 대한 정확한 초기 평가 정보가 필요하다. 진동감쇠의 대표 지표인 댐핑은 강성의 제공근에 비례하며 강성이 월등히 큰 환경속에서는 강성증가에 따른 댐핑효과를 기대할 수 있다. 그러나 초전도 플라이휠과 같이 큰 시스템에서는 회전자 크기 증가로 인하여 지지 해야 하는 플라이휠 자체 무게 및 크기도 증가하여 회전체 지지에 큰 부담이 되며, 회전체의 벤딩모드를 유발시킬 수 있는 위험요소로 작용 할 수 있다. 따라서 제한된 공간에 있어 큰 댐핑효과를 보여주는 것이 가장 중요하다.

본 연구에서는 강성이 일정한 상황에서 Fig. 8에서와 같이 지름방향 각 각도별로 댐핑값을 평가 하였다. 평가 결과 초전도 베어링의 댐핑은 $\pm 5\%$ 이내의 편차를 보여 주었으며 최대 1,320 N/m에서 최소 1,210 N/m의 값을 나타 내었다. 평가된 베어링의 댐핑은 각도별로 강성에 비례하여 선형적으로 변화될 것이라고 추측 하였으나 편차가 강성 보다 큰 값을 보여 주었다. 이는 초전도 베어링의 댐핑이 주로 회전자 자석의 자장을 단결정 벌크 종자 부분에 집중화 시켜 자기 flux pinning에 인한 고유의 댐핑을 제공하는 것 이외에 초전도 베어링의 프레임에 지지하고 있는 베어링 지지대의 영향을 크게 받는다는 것을 나타낸다. 즉 pinning된 자기 플럭스의 댐핑과 이를 지지하는 지지대 구조물에 의한 external damping의 상호작용에 의해 최종 초전도 베어링의 댐핑이 구성되는 것이다. 따라서 회전체의 안정적인 운전을 위해서는 제한된 크기의 벌크에 flux pinning을 극대화 하는 것 이외에 베어링 지지대의 변경으로 인하여 상당한 댐핑을 보상할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

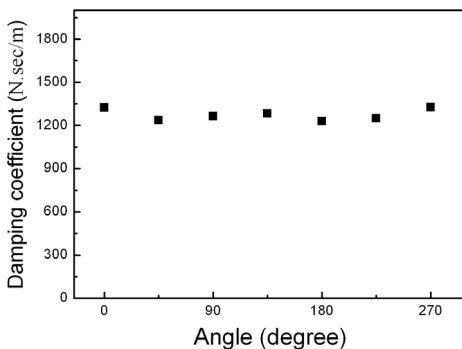


Fig. 8. Damping coefficient results of 35 kWh class superconductor bearing.

III. 결 론

35 kWh급 초전도 베어링의 회전체 제어 특성을 지름방향 각도 별로 평가하였다.

그 결과는 다음과 같다.

1. 35 kWh급 SFESs에 장착된 초전도 베어링은 1.6 ton의 무게를 가지는 플라이휠 로터가

약 1.2 sec 안에 자유 진동의 대다수 성분을 제거 하는 것으로 평가 됐다.

2. 제작된 35 kWh급 초전도 베어링은 지름방향 각도에 따라 강성이 340,000 N/m ~ 351,000 N/m 로 $\pm 2\%$ 이내의 편차를 보이는 것으로 확인하였다.

3. 35 kWh급 초전도 베어링의 지름방향 댐핑은 $\pm 5\%$ 이내의 편차를 보여 주었으며 최대 1,320 N/m에서 최소 1,210 N/m의 값을 나타 내었다.

4. 초전도 베어링은 초전도 벌크에 의한 pinning flux 로부터 부여된 고유 댐핑과 이를 지지하는 초전도 베어링 지지대에 의한 external damping의 상호작용에 의해 최종 베어링의 댐핑이 구성되는 것으로 사료된다.

Acknowledgments

We express our sincere thanks to the contributors to this journal. This work was financially supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning.

References

- [1] T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey, R. Weller, "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels" IEEE Trans. Applied Supercon., 9, 968-971 (1999).
- [2] Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung, and Kwangsoo No, "Design and characteristics of a superconductor bearing" IEEE Tran, 15, 2249-2253 (2005) .
- [3] L. Kuehn, M. Mueller, "Static and Dynamic Behavior of a Superconducting Magnetic Bearing Using YBCO Bulk Material", IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 2079
- [4] B. J. Park, S. Y. Jung, T. H. Sung, Y. H. Han "Static properties of superconductor journal bearing substator for superconductor flywheel energy storage system", Progress in Superconductivity, 10, 55-59, (2008).