

Stiffness Evaluation of High Temperature Superconductor Bearing Stiffness for 10 kWh Superconductor Flywheel Energy Storage System

B. J. Park^a, S. Y. Jung^a, J. P. Lee^a, B. C. Park^a, C. H. Kim^a,
S. C. Han^a, S. G. Du^a, T. H. Sung^b, Y. H. Han^a

^aGreen Growth Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, , Daejeon, Korea

^bDepartment of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received 11 August 2009; revised or reviewed 18 September 2009; accepted 22 September 2009)

10 kWh급 초전도 플라이휠 베어링의 강성 평가

박병준^a, 정세용^a, 이정필^a, 박병철^a, 김철희^a, 한상철^a, 두승규^a, 성태현^b, 한영희^a

Abstract

A superconductor flywheel energy storage(SFES) system is mainly act an electro-mechanical battery which transfers mechanical energy into electrical form and vice versa . SFES system consists of a pair of non-contacting High Temperature Superconductor (HTS) bearings with a very low frictional loss. But it is essential to design an efficient HTS bearing considering with rotor dynamic properties through correct calculation of stiffness in order to support a huge composite flywheel rotor with high energy storage density. Static properties of HTS bearings provide data to solve problems which may occur easily in a running system. Since stiffness to counter vibration is the main parameter in designing an HTS bearing system, we investigate HTS bearing magnetic force through static properties between the Permanent Magnet(PM) and HTS. We measured axial / radial stiffness and found bearing stiffness can be easily changed by activated vibration direction between PM and HTS bulk. These results are used to determine the optimal design for a 10 kWh SFES.

Keywords : SFES, HTS, PM, stiffness

I. Introduction

고온 초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장시스템(Superconductor Flywheel Energy

Storage System)은 전기에너지를 플라이휠 회전에 의한 운동에너지 형태로 저장하는 녹색 에너지 형태이므로 환경보호 효과가 타 에너지 저장시스템에 비해 월등히 뛰어난 시스템이다. 또한 자기력에 의한 무 접촉 베어링이기 때문에 마찰로 인한 손실이 거의 없어 저장효율이 매우 높으며 에너지 저장밀도가 높다는 장점이

*Corresponding author. Fax: +82 42 865 5337

e-mail: hampstead@kepri.re.kr

있다 [1-2]. 초전도 베어링은 영구자석 회전자와 고온 초전도체의 상호관계에 의하여 그 특성이 결정되며 가동 중 특별한 운전조작 없이 냉각만으로 회전자를 지지할 수 있으며 이것이 다른 플라이휠과 비교되는 중요한 특징 중 하나이다 [3]. 초전도 베어링에 있어서 기계적 특성은 주변 자장변화와 관련이 깊지만 초전도체와 관련된 자장 및 강성에 의한 정확한 해석이 현재 확립되지 않아 플라이휠 운전 중에 문제 발생시 그 주변 부속품에게 파괴 및 고장 등 심각한 영향을 초래할 수 있다. 또한 초전도 베어링은 회전자가 움직이는 방향이나 착자되어 있는 형태에 따라서 그 성능이 크게 변하므로 안정적인 초전도 플라이휠 운전에서 베어링의 디자인이 가장 주요한 이슈가 되고 있다. 이에 초전도 베어링이 보여주는 정적, 동적 강성 특성은 이러한 손실을 미리 예상하고 해결해주는 데 핵심 변수가 된다.

초전도 베어링은 로터를 감싸고 있는 형태에 따라 크게 내륜형과 외륜형의 베어링으로 나누어지며 그 용도에 맞게 저널(journal)과 쓰러스트(thrust) 구조의 베어링으로 나누어 진다.

본 연구에서는 10 kWh급 초전도 플라이휠에 사용되는 내륜형 초전도 저널 베어링의 강성특성을 파악하기 위하여 실제 플라이휠에서 일어날 수 있는 흔들림과 유사한 운전조건으로 강성의 변화를 알아 보았다. 또한 회전자의 운전조건에 의한 베어링 경향성을 분석하여 좀더 효율적인 베어링 설계에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행 하였다. Fig. 1은 10 kWh급 플라이휠 에너지 저장장치의 단면을 보여주고 있다.

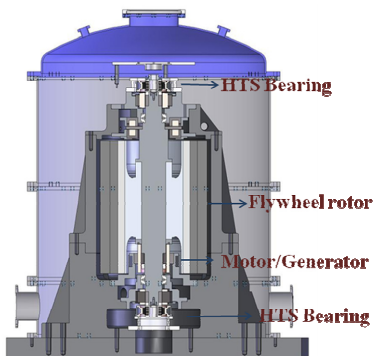


Fig. 1. Design of 10 kWh superconductor flywheel energy storage system.

II. 제작 및 시험

Fig. 2에서와 같이 10 kWh급 초전도 베어링은 8개의 고온 초전도 벌크로 이루어 지는 cryostat 고정자와 초전도체에 강한 자장이 도달할 수 있도록 구성된 영구자석(Permanent Magnet)회전자, 냉각 중 열 침입을 최소화 하도록 하는 베어링 지지대로 나누어 진다.

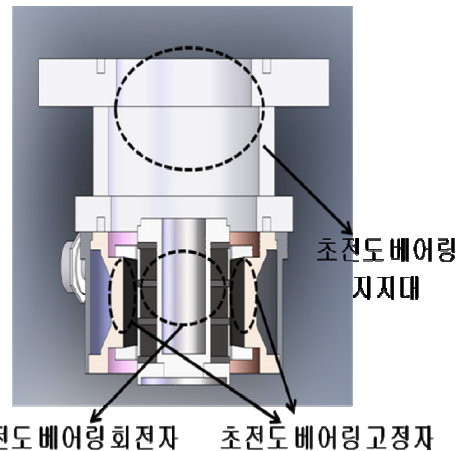


Fig. 2. Schematic design of HTS bearing for 10 kWh SFES.

본 연구에서 초전도 베어링을 냉각하기 위한 순환시스템은 액체질소를 이용하여 간접냉각이 일정하게 유지되도록 suzuki-shokan 200 W@80 K (60 Hz) cryocooler를 이용하여 자체 디자인 하였다. 초전도 벌크는 초전도 베어링 회전자와의 거리가 2 mm의 일정한 간격을 유지하며 냉각할 수 있도록 38*38*12 mm 크기로 동일하게 가공 하였다. 또한 벌크 주변을 Super-insulation으로 단열하여 복사열 전달을 줄일 수 있도록 하였다. 초전도 베어링 회전자는 유압식 인장실험기를 이용하여 상하로 진동하도록 제작하였으며 진동 과정 중 생긴 force의 변화를 로드 셀을 이용하여 관찰할 수 있도록 시스템을 구성 하였다. 또한 회전자 및 고정자가 작동되는 부분에는 대기저항을 최소화 하기 위하여 10^{-6} [torr]를 유지하는 고 진공 챔버를 제작하여 실제 10 kWh급 초전도 베어링이 작동하는 환경과 동일하게 유지 하였다. 초전도 베어링의 방향 별 강성을 효율적으로 측정하기

위하여 베어링 지지대는 강도, 열 침입을 고려하여 FRP 재질로 자체 디자인하여 조립하였으며 이때 접촉면적이 최소화 되도록 구성하여 냉각효율을 극대화 하였다. Fig. 3은 실제 10 kWh급 초전도 베어링에서 사용되는 고정자 및 회전자를 보여주고 있다.

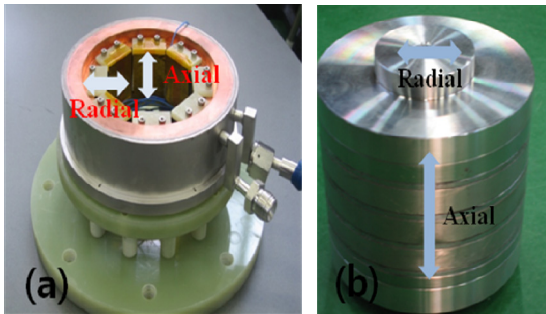


Fig. 3. Superconductor bearing (a) stator (b) rotor for 10 kWh SFES.

우선 냉각이 시작되면 field cooling된 위치의 회전자를 고정하고 setting된 온도로 1 hr이상 벌크 온도가 유지되면 조건에 맞추어 test를 진행하였다. 회전자는 회전 시 초전도 벌크에 도달하는 flux 분포가 sine파와 유사하게 형성되는 것을 가정하여 진동 주파수를 설계하였다. 끝으로 10 kWh 급 초전도 베어링의 운전범위를 고려하여 회전자 움직임에 따른 베어링의 axial/radial 방향의 특성을 각각 quasi-static 상태에서 평가 하였다. 이때 나타난 힘의 변화를 변위에 따라 기록하였으며, 변위-힘의 그래프 기울기로 강성을 도출하였다. Fig. 4는 베어링의 radial 강성 테스트를 위한 회전자와 고정자의 조립된 이미지를 보여주고 있다.

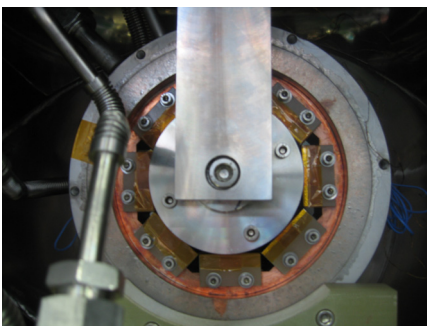


Fig. 4. Assembly of stator and rotor for radial stiffness test.

III. 실험 결과

초전도체는 일정 임계온도 하에서만 magnetic flux에 의한 pinning force가 존재하게 되며 이때 냉각온도는 강성특성을 결정짓는 주요한 인자가 된다 [4]. 본 연구에서는 고정자의 안정된 냉각을 확인 하기 위하여 5개의 초전도 벌크에 온도센서를 부착하여 실험진행 동안의 온도를 실시간으로 모니터링 하였다. 그 결과 Fig. 5에서와 같이 모든 벌크가 초전도 베어링의 특성을 최적으로 나타내 줄 수 있는 온도 구간인 68 ± 0.7 K로 냉각됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 시스템에서 설계한 10 kWh급 초전도 베어링은 극저온을 효율적으로 유지하도록 냉각 시스템이 구성 되었다고 할 수 있다

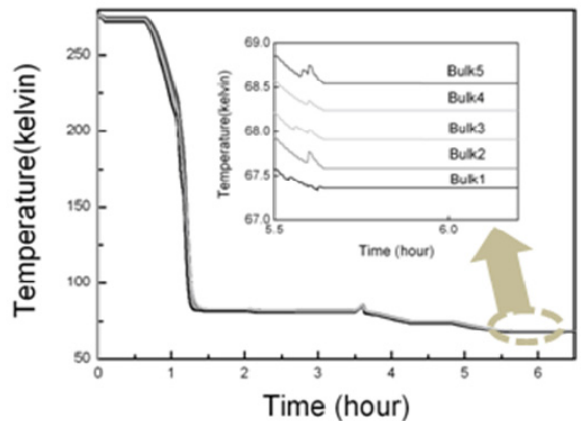


Fig. 5. Temperature of HTS bulk in stator during field cooling.

초전도 베어링에서 플라이휠을 부양시키는 힘은 axial 방향의 강성에 의하여 대다수가 결정되며 휠의 무게에 따라서 bulk의 수를 조절하여 베어링의 크기 및 위치를 결정하게 된다. Radial 방향의 강성은 플라이휠에서 흔들림이 발생시 이를 지탱해 줄 수 있는 힘과 가장 관련이 깊다. 이는 공진주파수 영역에서 가장 크며 방향 및 속도 예측이 불가하므로 안정된 플라이휠 회전을 위해서는 로터의 위치변화에 따른 초전도 베어링의 강성변화가 중요한 특성이 된다.

본 연구에서 제작된 초전도 베어링의 axial/radial 방향 강성을 알아보기 위하여 ± 1 mm구

간에서 1 Hz의 주파수로 회전자 자석을 3회 왕복하여 그 응력의 변화를 관찰하였다.

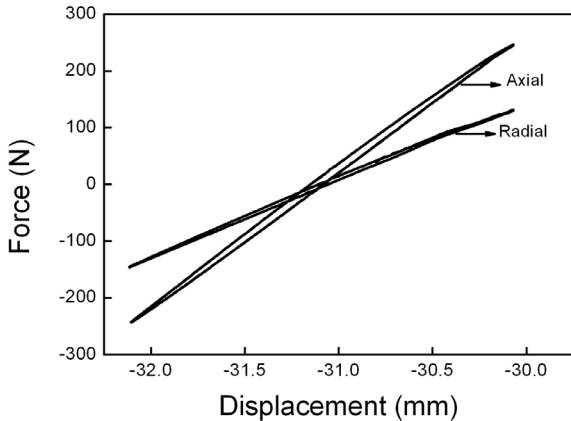


Fig. 6. Stiffness variation of HTS bearing according to axial / radial direction .

그 결과 Fig. 6에서와 같이 영구자석과 초전도체 간의 상호자장에 의하여 초전도체 고유의 pining force가 나타남을 알 수 있었으며 그 크기가 axial 강성은 247.5 N/mm, radial 방향의 강성은 140 N/mm를 나타내었다. 측정된 강성은 변위구간인 ± 1 mm 구간에서 선형으로 변한다고 가정하고 계산되었다. 특히 초전도 베어링의 radial방향 강성이 axial 방향 강성에 비해 57% 수준으로 현저히 저하되는 정량적 변화를 확인할 수 있었다. Axial 방향의 강성은 8개의 단결정 벌크 모두가 pining flux 방향이 동일한 위치 /변위로 자장변화를 일으키고 있는 반면에 radial의 경우 각각의 벌크에 trap된 자장이 로터의 진동에 따라서 각기 불 균일하게 움직이기 때문에 이러한 큰 차이를 보이는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 이러한 radial 강성 저하의 주요 원인을 좀더 자세히 살펴보기 위하여 로터의 진동방향과 평행하게 착자된 양쪽 2개의 벌크만을 장착시킨 상태에서 강성을 측정하였다.

측정 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 양쪽 벌크에서 작용하는 강성은 7 N/mm 미만의 아주 작은 pining force를 보여 주었다. 이는 착자된 벌크의 자장 방향이 회전자의 변위 방향과 동일하고 로터의 변위 또한 자장변화를 일으키기 부족한 크기이므로 베어링 강성에 거의 참

여하지 못한 것으로 사료 된다. 이러한 결과는 대량의 초전도 벌크를 이용한 베어링 강성이 어느 한 위치의 벌크 강성으로 계산되어 대변할 수 없음을 지적하며 정확한 베어링 성능 예측을 위해서는 각 벌크 위치 별 평가가 우선 되어 져야 함을 보여 준다.

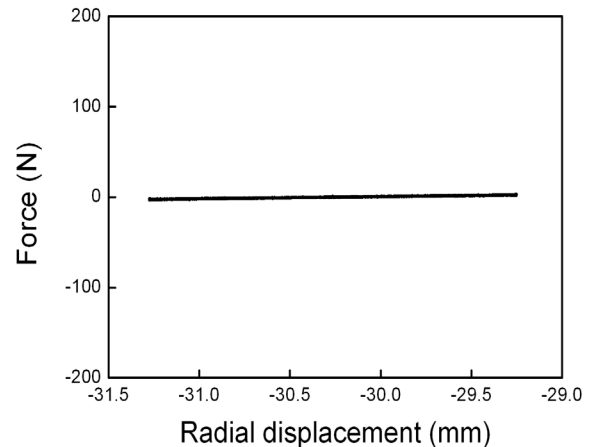


Fig. 7. Force variation of parallel HTS bulks with rotor vibration direction in radial stiffness test.

일반적으로 초전도 베어링의 회전자 진동변위는 자장을 변화시키는 주요 변수가 된다. 따라서 다양한 변위에서 강성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1 mm ~ 4 mm의 진폭 조건에 따른 힘의 변화를 살펴보았다. 진폭을 고려하여 radial 방향은 초전도 베어링과의 충돌위험이 있으므로 axial 방향의 강성을 측정하였으며 이때의 주파수 진동은 1 Hz로 고정하였다.

Fig. 8에서도 확인할 수 있듯이 진폭이 증가함에 따라 강성이 더욱 불안정하게 변하는 것을 알 수 있으며 hysteresis loop 모양이 이러한 양상을 잘 대변해 준다.

결과적으로 1 mm 이상의 큰 진폭에서는 베어링 강성에 주요한 영향을 미치는 magnetic flux가 급격하게 감소하여 결국 초전도 베어링의 강성이 저하될 수 있다는 점을 보여 주고 있다. 또한 강성변화를 선형변화로 가정하고 그 크기를 도식화한 결과 최대 247.5 N/mm에서 208 N/mm으로 16%의 강성 저하를 보여 주었다. 이러한 변화는 회전자의 흔들림의 정도에 따라 초전도 베어링 강성이 크게 감소할 수 있으므로

안정적인 지지를 위해서는 진폭이 우선적으로 고려 되어 할 주요인자임을 지적 하고 있다.

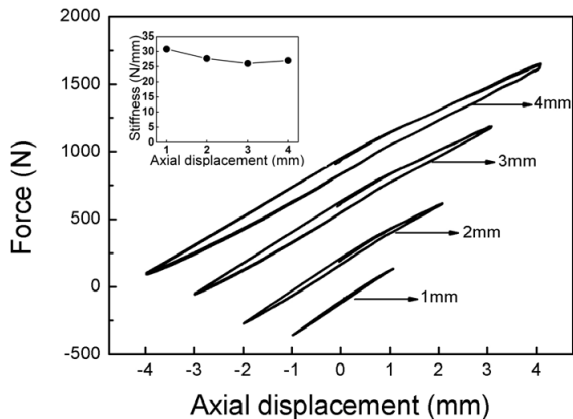


Fig. 8. Force variation of superconductor bearing according to different displacements.

III. 결론

10 kWh급 초전도 베어링의 강성 특성을 axial/radial 방향으로 나누어 각각을 평가 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제작된 내륜형 10 kWh급 초전도 베어링은 69 K 이하까지 효율적으로 냉각될 수 있도록 설계되었음을 확인할 수 있었다.
2. 본 연구에서 제작된 초전도 베어링의 axial 방향 강성은 247.5 N/mm, radial 방향의 강성은 140 N/mm를 나타내었다.
3. Radial 강성평가 에서 로터의 진동방향과 평행하게 착자 되어 있는 양쪽 2개의 벌크는 7 N/mm 미만의 아주 작은 pinning force를 보여 주었으며 이는 착자된 벌크자장 변화가 미세하기 때문에 베어링 강성에 거의 참여하지 못한 것으로 사료 된다

4. 저 주파수 영역(1 Hz)에서 1mm 이상의 진폭 변화는 강성에 영향을 주는 주요 변수임을 확인하였으며 진폭이 증가함에 따라 hysteresis loop 변화 정도가 크게 증가 하였다.

이러한 결과 및 수치는 10 kWh급 초전도 플라야휠 베어링의 성능을 최적화하여 안정적인 시스템을 유지하는데 크게 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgments

"This research was supported by a grant from Korea Institute Energy Technology Evaluation and Planning, Republic of Korea

References

- [1] Coombs, T. et al., "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels" IEEE Trans. Applied Supercon. vol.9, pp. 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. Vol.15, NO. 2 (2005).
- [3] N. Kosizuka, "R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems", *Physica C* 445-448, pp. 1103-1108 (2006).
- [4] Lars Kuehn, Matthias Mueller, Rainer Schubert, Christoph Beyer, Oliver de Haas, and Ludwig Schultz, "Staic and Dynamic Behavior of a Superconducting Magnetic Bearing Using YBCO Bulk Material" IEEE Tran. Vol.17, NO.2 (2007).