

10 kWh 급 초전도 플라이휠 베어링의 강성특성 연구

Stiffness properties of Superconductor Bearing for 10 kWh Superconductor Flywheel Energy Storage System

*#박병준¹, 한영희¹, 정세용¹, 김철희¹, 한상철¹, 박병철¹, 이정필¹, 성태현¹

*#B. J. Park(hampstead@kepc.co.kr)¹, Y. H. Han¹, S. Y. Jung¹, C. H. Kim¹, S. C. Han¹, B. C. Park¹, J. P. Lee¹, T. H. Sung¹
¹ 한국전력공사 전력연구원,

Key words : Superconductor Flywheel Energy Storage System , Superconductor Bearing, Stiffness, Permanent Magnet

1. 서론

초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor Flywheel Energy Storage System)는 전기에너지를 플라이휠의 회전에 의한 운동에너지의 형태로 저장하는 형태이며 친환경적 에너지 저장을 특징으로 한다. 또한 초전도 베어링은 무접촉 베어링이기 때문에 각종 마찰손실을 줄일 수 있고, 고속회전을 가능케 하므로 에너지 저장효율이 높으며 저장밀도가 높다는 장점이 있다. 초전도 베어링(Superconductor Bearing)은 영구자석 회전자와 고온 초전도체의 상호관계에 의하여 그 특성이 결정되며 가동중 특별한 운전조작 없이 회전자를 지지할 수 있으며 이것이 다른 플라이휠과 비교되는 중요한 특징 중 하나이다.^{1,2,3} 초전도 베어링에 있어서 강성(Stiffness)은 주변 자장변화와 관련이 깊으며 이는 베어링 제작에 많은 제약요인이 된다. 또한 시스템 운전 전에 베어링의 정확한 특성이 파악되지 못하면 문제발생시 그 주변 부속품에게 파괴 및 고장 등 심각한 영향을 초래할 수 있으므로 안정한 플라이휠 운전애 고려되는 주요한 이슈가 되고 있다⁴. 이에 초전도 베어링이 보여주는 정적, 동적 강성 특성은 이러한 손실을 미리 예상하고 해결해주는 데 핵심 변수가 된다.

본 연구에서는 실제 10 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 베어링의 강성특성을 파악하기 위하여 플라이휠에서 일어날 수 있는 흔들림과 유사한 운전조건으로 강성의 변화를 알아 보았다. 또한 운전조건에 의한 베어링 경향성을 분석하여 좀더 효율적인 베어링 설계에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행하였다. Fig. 1 은 10 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 초전도 베어링의 조립 단면을 보여 주고 있다.

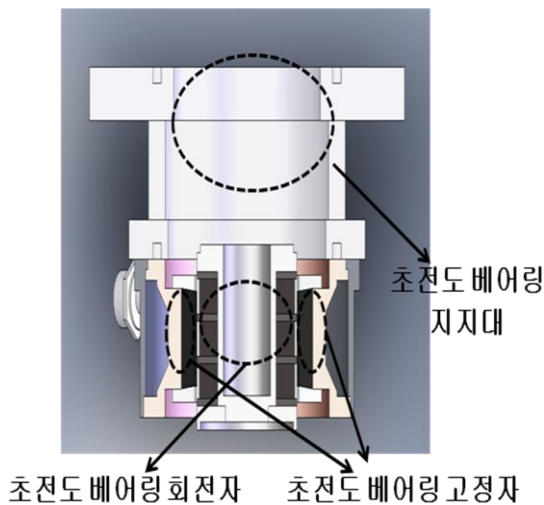


Fig. 1 Schematic design of superconductor bearing for 10 kWh SFESS

2. 제작 및 시험

Fig. 2 에서와 같이 8 개의 초전도 벌크로 구성되는 고정자(Stator)와 초전도체에 강한 magnet flux 가 도달 할 수 있도록 구성된 NdFeB-35 영구자석(Permanent Magnet) 회전자(Rotor)를 설계 제작하였다. 초전도 베어링 회전자의 진동은

유압식 인장실험기를 이용하였으며, 진공챔버를 제작하여 고진공 속에서 진동을 할 수 있도록 실험장비를 구성하였다. 초전도 베어링을 냉각하기 위한 액체질소 순환시스템은 자체 개발한 냉각시스템을 이용하여 cryostat 에 액체 질소를 공급하였으며, 초전도 베어링 주변에서 발생하는 내부 발열 및 순환계통에서 발생하는 침입열을 제거 함으로써 안정적으로 작동할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 초전도 벌크는 초전도 베어링 회전자와의 거리가 2 mm의 일정한 간격을 유지하며 냉각할 수 있도록 38*38*12 mm 크기로 동일하게 가공하였고, 벌크 주변을 Super-insulation 으로 단열하여 복사열 전달을 줄일 수 있도록 하였다. 회전자 상부에는 로드셀을 장착하여 실제 베어링에서 전달되는 강성의 힘을 알아보았고 일정한 진폭으로 3 회 이상 왕복 운동시키며 axial 방향의 베어링 특성을 각각 quasi-static 상태에서 평가 하였다.

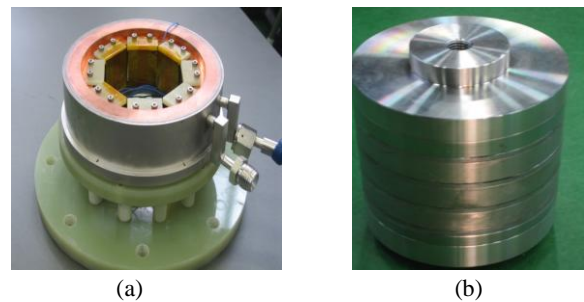


Fig. 2 Superconductor bearing (a)stator (b)rotor for 10 kWh SFESS

3. 실험결과

초전도 베어링 고정자에 부착된 초전도체는 일정한 임계 온도 이하에서만 pinning force 에 의한 강성을 보여주며 온도에 따라서 민감하게 변하므로 안정적인 냉각이 무엇보다도 중요하다. 그러므로 베어링 고정자 및 지지대가 열침입 및 단열에 효율적이지 못하면 베어링 성능을 저하하는 주요 원인이 된다.

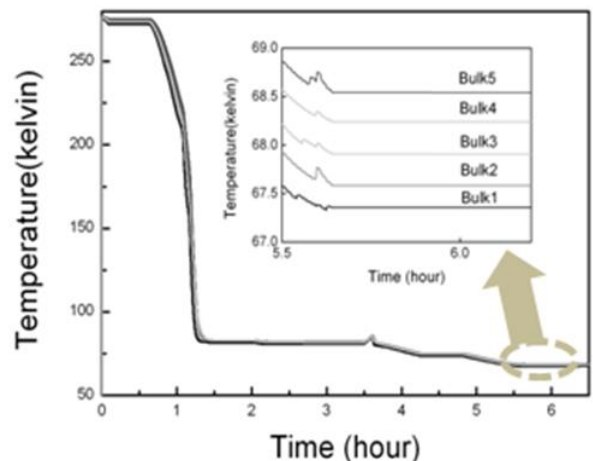


Fig. 3 Temperature of superconductor in stator during field cooling

본 연구에서 설계된 10 kWh 급 초전도 베어링이 효율적으로 냉각이 되는지 확인하기 위하여 초전도 베어링 벌크의 여러 위치에 온도 센서를 부착하여 온도 변화를 관찰하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 초전도체는 68 ± 0.7 K으로 안정적으로 냉각됨을 확인 할 수 있었으며 이는 초전도 베어링의 운전조건에 적합한 온도범위이다. 따라서 본 시스템에서 설계한 10 kWh 급 초전도 베어링은 극저온을 효율적으로 유지하도록 냉각시스템이 구성 되었다고 할 수 있다.

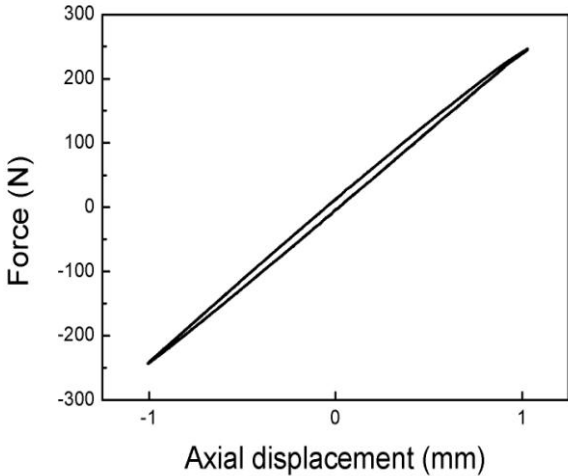


Fig. 4 Force variation of superconductor bearing according to displacement

초전도 베어링의 Axial 방향의 강성은 플라이휠을 부양시키는 힘과 가장관련이 깊으며 이때 초전도 벌크의 개당 강성을 기준으로 베어링의 크기 및 위치를 결정하게 된다.

본 연구에서는 영구자석과 초전도체 간의 상호자장에 의하여 영구자석 회전자를 고정시키는 초전도체 고유의 pinning force를 알아보고자 ± 1 mm구간에서 1 Hz의 주파수로 회전자 자석을 3회 왕복하여 그 응력의 변화를 관찰하였다. 실험 결과를 나타낸 Fig. 4와 같이 작동 변위에서 hysteresis loop가 생성됨을 확인할 수 있었으며 이때의 강성은 벌크당 30.77 N/mm를 나타내었다. 측정된 강성은 변위구간인 ± 1 mm구간에서 선형으로 가정하고 계산 되었다. 일반적으로 1 Hz 미만의 저속영역에서는 강성에 영향을 줄 수 있는 자장의 변화 속도가 적으므로 본 연구에서 측정된 강성이 10 kWh 급 초전도 베어링의 quasaic-static 특성을 가장 잘 대변 준다고 할 수 있다.

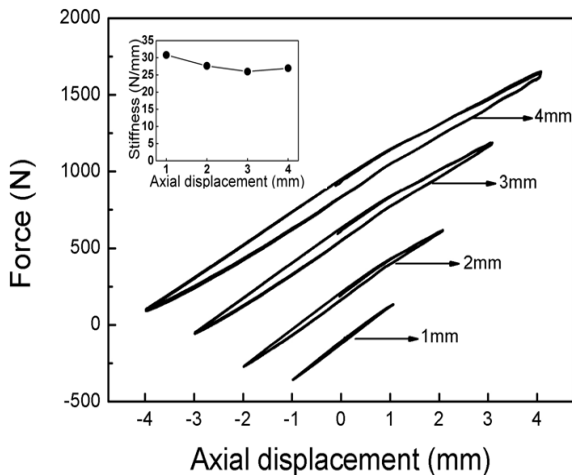


Fig. 5 Force variation of superconductor bearing according to different displacements

초전도 플라이휠 시스템은 고속 회전이 이루어지며 이때 회전자 진동에 의한 강성 변화는 베어링의 특성을 결정하는 주요한 변수가 된다. 따라서 실제 플라이휠 운전상태에서 흔들림의 변화가 강성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1 mm~4 mm의 진폭조건에 따른 강성의 변화를 살펴보았다. 이때의 주파수 진동은 1 Hz로 고정하였으며 진폭 이외에 모든 조건은 동일시 하여 그 영향을 살펴 보았다. Fig. 5에서도 확인할 수 있듯이 진폭이 증가함에 따라 강성이 더욱 불안정하게 변하는 것을 알 수 있으며 hysteresis loop shape가 이러한 양상을 잘 대변해 준다. 이는 1 mm이상의 큰 진폭에서는 베어링 강성에 주요한 영향을 미치는 magnetic flux가 급격하게 감소하여 결국 초전도 베어링의 강성이 저하될 수 있다는 점을 보여 주고 있다. 또한 강성 변화를 선형변화로 가정하고 그 크기를 도식화한 결과 최대 30.77 N/mm에서 25.97 N/mm으로 16%의 강성 저하를 보여 주었다. 이러한 변화는 플라이휠 흔들림의 정도에 따라 초전도 베어링 강성이 크게 감소할 수 있으므로 안정적인 지지를 위해서는 진폭이 우선적으로 고려 되어 할 주요인자임을 지적하고 있다.

4. 결론

10 kWh 급 초전도 베어링의 강성 특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 10 kWh 급 초전도 베어링의 냉각테스트 결과 부착된 벌크 온도가 모두 69 K 이하까지 효율적으로 냉각됨을 확인할 수 있었다.
2. 1 Hz의 진동주파수에서 시행한 quasi-static 상태의 초전도 베어링 강성은 ± 1 mm 구간에서 bulk 당 30.77 N/mm를 나타내었다.
3. 저 주파수 영역(1 Hz)에서 1 mm 이상의 진폭변화는 강성에 영향을 주는 주요 변수임을 확인 하였으며 진폭이 증가함에 hysteresis loop 변화 정도가 크게 증가하였다.

이러한 결과를 응용하여 10 kWh급 초전도 플라이휠 베어링의 성능을 최적화하여 효율적으로 플라이휠을 부양시킬 수 있으며, 안정적인 시스템을 설계하는데 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

This research was supported by a grant from Electric Power Industry Technology Evaluation & Planning (ETEP), Republic of Korea.

참고문헌

1. T. H. Sung, S. C. Han, Y. H. Han, J. S. Lee, N. H. Jeong, S. D. Hwang and S. K. Choi, "Dsighns and analysis of flywheel energy storage system using High-Tc superconductor bearings," Cryogenics 42, pp. 357-362, 2002
2. 한영희 외, "초전도 베어링을 이용한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발," 초전도와 저온공학 7 권 2 호, pp.17-20, 2005
3. Coombs, T. et al., "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels" IEEE Trans. Applied Supercon. (1999) vol.9, pp. 968-971
4. 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