

100 kWh 급 초전도 베어링의 지름방향 특성 Radial Direction Characteristics of 100 kWh Class Superconductor Bearing

*#정세용¹, 박병준¹, 한영희¹, 김철희¹, 성태현¹

*#S.Y. Jung(shammon@kepri.re.kr)¹, B.J. Park¹, Y.H. Han¹, C.H. Kim¹, T.H. Sung¹

¹ 한국전력공사 전력연구원

Key words : 100 kWh, SFES, superconductor bearing, flywheel, energy

1. 서론

초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템(SFES, Superconductor Flywheel Energy Storage System)은 전기를 이용하여 플라이휠을 회전시켜 전기 에너지를 운동 에너지로 저장하는 기계식 축전지이다. SFES는 무접촉식 고온초전도 베어링, 고에너지밀도의 복합재 플라이휠, 고효율 전동/발전기 그리고 공기저항을 최소화할 수 있는 진공챔버로 구성되어 있다. 회전하는 플라이휠의 에너지 저장 손실을 최소화하기 위하여 무접촉식 초전도 베어링이 사용되며, 이는 초전도체와 영구자석 간의 자기 고정력(pinning force)으로 자석을 부양시키는 기술이 적용된 것이다. SFES는 전자석 플라이휠 에너지 저장 시스템과 달리 능동제어 없이도 고속 회전하는 플라이휠을 안정적으로 부양시킬 수 있는 이점이 있어 개발이 많이 이루어지고 있고^{1,2}, 앞으로 무정전전원 공급(UPS, Uninterruptible Power Supply), 에너지 재생, 부하 평준화 등 광범위한 분야에 적용될 전망이다.

100 kWh 급 SFES의 효율적인 운영을 위하여 무접촉식 고온초전도 베어링이 사용될 예정이다. 이러한 초전도 베어링은 수십 개의 YBCO 고온초전도체 벌크가 장착된 고정자와 여러 개의 축방향으로 착자된 영구자석링이 조립된 회전자로 구성된다. 회전자 자석의 자장을 이용하여 고정자의 초전도체 벌크를 자력 냉각(field cooling)하여 회전자의 부양 위치를 설정하게 되고, 이 때 전도 냉각되는 초전도체 벌크의 온도와, 자력 냉각 시 초전도체 벌크와 자석 간의 거리는 베어링의 성능에 큰 영향을 미치게 된다^{3,4}. 본 연구에서는 100 kWh 급 초전도 베어링의 분할모델을 이용하여 초전도체 벌크의 냉각 온도와 자력 냉각 시 초전도체 벌크와 자석 간의 거리에 따른 초전도 베어링의 지름방향 특성을 평가하였고, 100 kWh 급 SFES에 초전도 베어링을 적용하기 위한 조건을 분석하였다.

2. 100 kWh 급 초전도 베어링의 구성

100 kWh 급 SFES용 초전도 베어링은 Fig. 1과 같이 고온초전도체 벌크가 고정되어 있는 고정자와 영구자석링이 다층으로 조립된 외륜 회전자로 구성되어 있다. 고정자의 초전도체는 베어링 모듈에 4개씩 고정되어 있고, 베어링 모듈은 초전도체 벌크에 충분한 고정력을 제공하면서 냉각 시 서로 다른 열팽창계수에 따른 초전도체의 파손이 발생하지 않도록 설계되어 있다. 또한, 초전도체가 효율적으로 냉각될 수 있도록 열전도율이 뛰어난 재료를 사용하여 모듈을 제작하였다. 크라이오스테트는 과냉시킨 액체질소를 순환하여 냉각시키게 된다.

회전자의 영구자석링은 축방향으로 착자되어 반대극이 서로 마주보도록 조립되어 있다. 자석링 사이에는 투자율이 높은 재질의 링을 끼워 고정자의 초전도체에 강한 자력이 도달하도록 유도하였다. 자력 냉각 시 고정자와 회전자의 상대적인 위치, 즉, 초전도체와 자석 간의 지름 및 축방향 거리는 초전도 베어링의 특성을 결정짓는 중요한 요인이 된다.

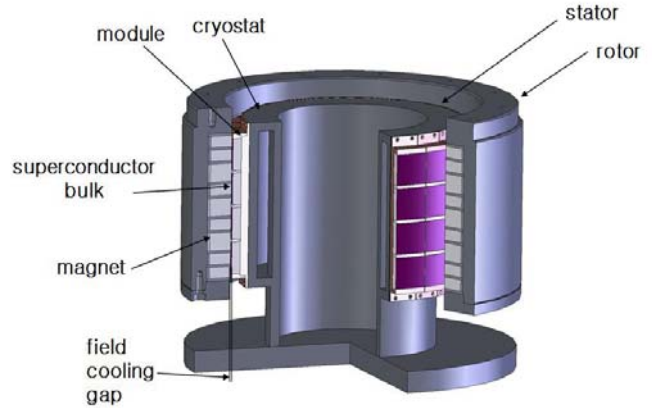


Fig. 1 Cross section of 100 kWh class superconductor bearing

3. 실험장치

3.1 저온 냉동기 및 인장시험기

본 연구에서 초전도 베어링의 냉각온도에 따른 지름방향 특성을 분석하기 위하여 Fig. 2(a)와 같은 냉동기를 사용하였다. Fig. 2(a)의 냉동기는 120W@77K 용량의 GM cryocooler 3기, 액체질소를 순환시켜주는 펌프, 냉동기에서 초전도 베어링 분할모델까지 액체질소를 운반하는 단열관 그리고 액체질소의 온도를 제어하는 히터 등으로 구성되어 있다. 초전도 베어링 분할모델의 부하는 10W 이하이지만, 냉동기 자체와 단열관에서의 열침입, 그리고 기타 열침입 요소를 감안하여 충분한 용량의 냉동기를 사용하였다.

초전도 베어링의 지름방향 강성을 측정하기 위하여 Fig. 2(b)와 같은 인장시험기(Instron 8871)에 특수 제작된 진공 챔버를 장착하여 사용하였다. 인장시험기는 초전도 베어링 분할모델의 고정자 및 회전자 위치와 거리를 조절하여 변하는 고정력을 측정하여 초전도 베어링 분할모델의 강성을 측정하였다. 모든 실험이 진공챔버 내에서 이루어져 온도 유지가 가능하였고, 건조한 환경을 유지시켜 초전도체 벌크의 성능 저하를 방지하였다.

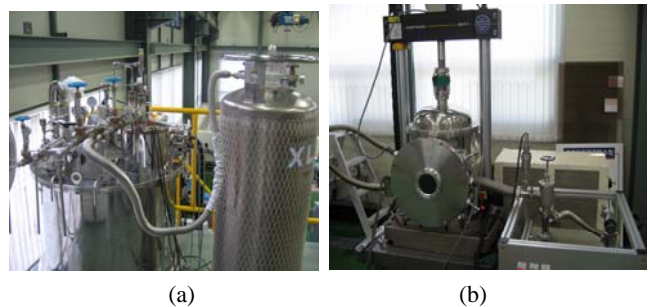


Fig. 2 (a) Refrigerator with three GM cryocoolers, (b) Universal testing machine(Instron 8871) equipped with vacuum chamber

3.2 100 kWh 급 초전도 베어링 분할모델의 구조

본 연구에서 초전도 베어링의 지름방향 특성 평가가 정확하고 용이할 수 있도록 Fig. 3 과 같이 분할모델을 제작하였다. 초전도 베어링 분할모델은 Fig. 1 의 100 kWh 급 초전도 베어링 고정자의 모듈 1 개를 단열 받침대에 장착해서 구성하였고, 인장시험기의 이동방향을 고려하여 초전도체의 방향을 고정하였다. 초전도 베어링에 PT-100 저항 온도 센서를 부착하여 냉각온도를 확인하였고, 자력 냉각 시 특수 제작한 spacer 를 사용하여 초전도 베어링 분할모델의 고정자와 회전자 간의 자력 냉각 거리를 정확하게 유지시켰다.

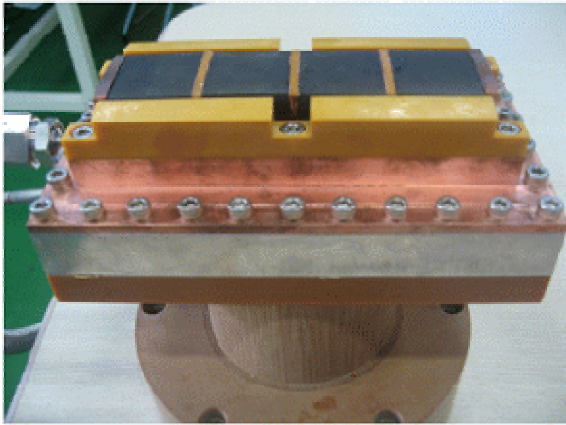


Fig. 3 Partial model of 100 kWh class superconductor bearing

4. 실험결과

4.1 온도에 따른 지름방향 특성의 변화

초전도 베어링 분할모델 고정자의 초전도체 온도가 77 K, 74 K, 71 K 그리고 68 K 일 때 고정자와 회전자 간 거리에 따른 지름방향 고정력은 Fig. 5 와 같다. 거리가 증가할 때와 감소할 때 이력현상(hysteresis)으로 인해 곡선의 모양이 서로 다르다. 초전도체의 온도가 증가할수록 이력현상이 더 두드러지고 그만큼 초전도 베어링 강성에 변화가 있어서 성능이 떨어진다고 볼 수 있다. 또한, Fig. 5 의 우측하단에 있는 그래프를 보면 온도 77 K, 74 K, 71 K, 68 K 에서 강성이 각각 3.89 kgf/mm, 4.25 kgf/mm, 4.58 kgf/mm, 4.67 kgf/mm 임을 알 수 있다. 즉, 온도가 감소할수록 강성이 증가하고, 온도가 77 K 에서 68 K 로 감소함에 따라 강성은 약 20% 증가하였다.

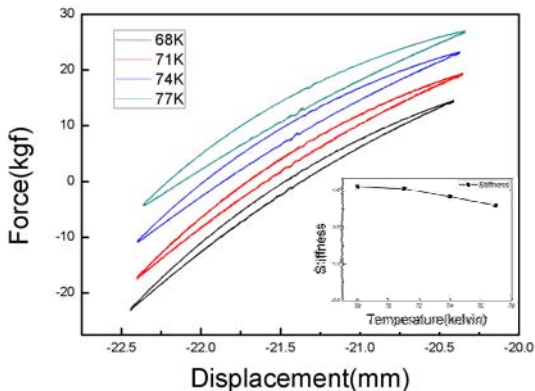


Fig. 5 Pinning force in radial direction according to displacement

4.2 자력 냉각 거리에 따른 특성의 변화

초전도 베어링 분할모델 고정자와 회전자 간의 거리에 따른 지름방향 강성은 Fig. 6 과 같다. 거리가 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm 일 때 초전도체 벌크당 강성은 각각 4.67 kgf/mm, 3.35 kgf/mm, 2.4 kgf/mm, 1.72 kgf/mm 이다. 고정자와 회전자 간의 거리가 5 mm 에서 2 mm 로 감소함에 따라 강성은 약 172% 증가하였다. 초전도체의 온도 제어가 용이하지 않음을 감안하면 고정자와 회전자 간의 거리를 조절하여 초전도 베어링의 강성을 증가시키는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.

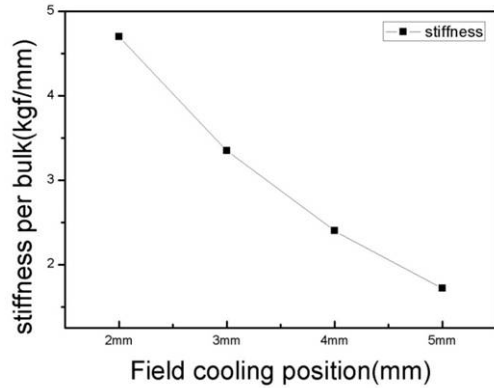


Fig. 6 Stiffness in radial direction per bulk according to field cooling position

5. 결론

100 kWh 급 초전도 베어링의 특성을 최대한 향상시켜야 100 kWh 급 SFES 의 효율적인 운영이 가능하다. 초전도 베어링의 초전도체 벌크 온도와 자력 냉각 거리는 초전도 베어링 특성을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 100 kWh 급 초전도 베어링 분할모델을 제작하여 온도와 자력 냉각 거리에 따른 베어링 특성의 변화를 분석하였다. 초전도체 온도가 9K 감소하면서 지름방향 강성이 20% 증가하고, 자력 냉각 거리가 3mm 감소하면서 지름방향 강성이 172% 증가함을 확인할 수 있었다. 자력 냉각 거리를 최소로 할 수 있도록 최적화된 초전도 베어링을 설계하면 고효율의 100 kWh 급 SFES 개발이 가능할 것이다.

후기

This research was supported by a grant from Electric Power Technology Evaluation and Planning Center funded by the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea.

참고문헌

1. Nagaya, S. et al., "Study on high temperature superconducting magnetic bearings for 10 kWh flywheel energy storage system," IEEE Trans. Applied Supercon., 11, 1649-1652, 2001
2. Coombs, T. et al., "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels," IEEE Trans. Applied Supercon., 9, 968-971, 1999
3. Tseng, Y. et al., "Levitation force relaxation in YBCO superconductors," Physica C, 411, 32-34, 2004
4. Yang, W. et al., "The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process," Physica C, 398, 141-146, 2003