단결정 초전도 벌크 최적화를 통한 10 kWh 급 초전도 베어링 특성향상

Improvement of superconductor bearing by single crystal YBCO bulk optimization in 10 kWh class superconductor flywheel energy storage system

*#박병준 [1], 정세용 [1], 두승규 [1] 김철희 [1], 이정필 [1], 박병철 [1], 한상철 [1], 한영희 [1]

*#B. J. Park(hampstead@kepco.co.kr)[1], S. Y. Jung[1] , S. G. Du[1], C. H. Kim[1], J. P. Lee[1], B. C. Park[1], S. C. Han[1], Y. H. Han[1]

[1] 한국전력공사 전력연구원

Key words : Superconductor Flywheel Energy Storage System , YBCO, superconductor bearing, bulk, stiffness

1. 서론

초전도 플라이휠 에너지 저장장치 (Superconductor Flywheel Energy Storage System, SFESS)는 기계식 전기 충 · 방전장치로서 회전에 의한 운동에너지를 모터를 통하여 저장하고 발전기를 통하여 저장된 운동에너지를 전기에너지 형태로 공급하는 장치이다. 초전도 플라이휠은 고속회전 에너지를 제공하는 모터, 복합재로 구성된 플라이휠을 지지하는 초전도 베어링(Superconductor Bearing), 회전에너지를 전기 에너지로 바꾸어 주는 발전기로 크게 구성되어 있으며 급속 충방전이 용이하며 수명이 길며 친환경적 전력저장장치라는 장점을 가지고 있다.[1] 특히 무 접촉식의 초전도 베어링은 로터에 의한 회전에너지의 각종 마찰손실을 줄일 수 있고 고속회전을 가능케 하므로 에너지 저장효율이 높으며 저장밀도가 높다는 장점이 있다.[2] 초전도 베어링은 초전도 벌크로 이루어지는 초전도 베어링 고정자와 영구자석으로 이루어진 회전자로 이루어 지며 임계온도하에서 보여주는 고유의 초전도체 특성인 pining force 에 의하여 플라이휠을 지지하게 된다. 또한 passive type 으로 가동 중 특별한 운전조작 없이 회전자를 지지할 수 있고 수명이 반 영구적이지만 일단 장착이 되면 설계 변경이 어렵다는 점에서 시스템 운전 전에 베어링의 정확한 기계적 특성 파악이 필수적이다.[3,4] 이러한 기계적 특성 중에서 강성은 초전도 플라이휠을 지지하는 주요한 인자가 되고 있으며 초전도 벌크 각각의 자기강성은 이러한 지지력이 유지되도록 구성 된다. 초전도 베어링은 극저온 환경으로 인하여 진공 중에 장착되며 특별한 유지 관리가 필요 없지만 베어링 제작 전 에 삽입된 초전도 베어링 회전자와 초전도 벌크의 자기배열이 기계적 특성을 크게 변화 시킬 수 있으므로 회전자와 고정자의 최적구조배열이 플라이휠에 장착된 초전도 베어링의 성능을 향상시키는 주요한 해결 수단이 될 수 있다.

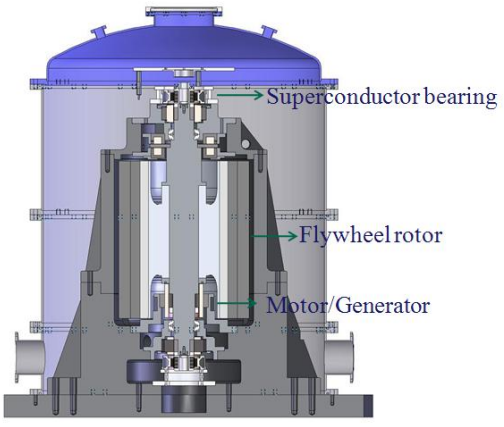
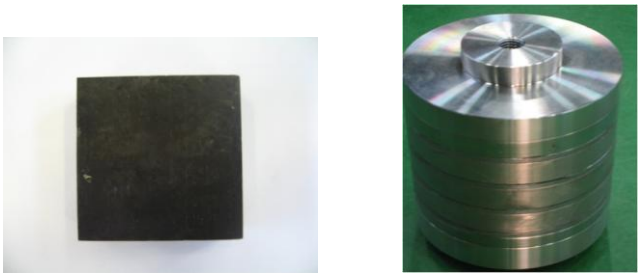


Fig. 1 Schematic design of 10 kWh SFESS

본 연구에서는 이러한 초전도 베어링 고정자와 회전자의 최적 디자인을 위하여 실제 10 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 초전도 베어링 영구자석 로터와 초전도 베어링 벌크에 따른 자기강성의 특성에 대하여 살펴 보았다. 초전도 베어링 내에서 벌크 크기를 최적화 하여 좀더 효율적인 시스템 유지에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행하였다. Fig. 1 은 실제 설계된 10 kWh 급 초전도 플라이휠의 디자인 단면을 보여 주고 있다.

2. 제작 및 시험



(a) (b)

Fig. 2 Superconductor bearing (a) bulk (b) rotor

Fig. 2 에서도 확인할 수 있듯이 초전도체에 충분한 magnet flux 가 도달 할 수 있도록 Φ88.8 0.5T NdFeB-35 영구자석(Permanent Magnet) 회전자(Rotor)를 반발식으로 설계 제작하였다. 초전도 베어링에 사용된 초전도체는 YBCO 단결정 벌크를 이용하였다. 벌크의 냉각은 자체 지그를 이용하여 액체질소에 직접 담구어 77 K 으로 냉각하였다. 이후 로드셀을 이용한 유압 강성측정장치를 이용하여 shaft 에 로터를 고정 한 후 4 ㎜/sec 의 속도로 벌크 seed 면이 접촉할 때가지 누르면서 zero field cooling 평가를 진행하였다. 초전도 베어링 벌크의 초기 크기는 40*40*12.5 ㎣ 크기로 가공하였고, 가공은 수분의 영향을 최소화 하도록 건식법을 사용한 기계적 가공을 적용하였으며 평가시 로터중심부와 벌크 seed 부분위치를 기준점으로 로터위치에 의한 자기영향을 최소화 하였다.

3. 실험결과

10 kWh 급 초전도 베어링의 기계적 특성은 초전도체 제조시에 나타나는 자기적 특성에 의해 지배되며 이러한 특성은 베어링 조립시에도 동일한 영향을 받는다. 하지만 최종적으로 운전시에 초전도 벌크와 회전자 배열에 베어링의 강성은 민감하게 변할 수 있으므로 자석과 초전도체간의 자기력 상호관계가 중요한 데이터가 된다. 10 kWh 급 초전도 베어링에 장착되는 벌크의 반발강성을 평가하기 위하여 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 20 ㎜ 구간에서 zero field cooling 을 평가하였다. 실험 결과 contact 면에서 maximum force 는 140 N 을 나타내었으며 실제 초전도 베어링이 착자되는 1 ㎜구간에서의 기울기를 분석하여 반발강성을 계산한 결과 46.5 N/㎜을 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 제작된 10 kWh 급 초전도 베어링 벌크는 거리에 따라서 고유한 양질의 반발자기특성을 소유하고 있음을 확인 할 수

있었다.

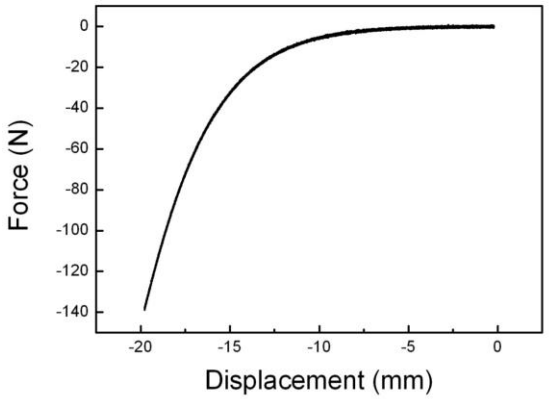


Fig. 3 Force variation of superconductor bulk depend on displacement

10 kWh 급 초전도 베어링에 사용된 초전도체는 장착 및 냉각의 효율을 위하여 3 개의 벌크를 유지하는 모듈 type 으로 고정자에 조립이 되며 초전도 베어링의 강성은 벌크의 수에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 가지고 있다. 초전도 베어링 고정자 모듈은 초전도 베어링 회전자의 길이에 따라 비례적으로 증가되며 많은 초전도 벌크 개수가 구성되면 베어링 자체 강성은 증가하지만 제작비 및 크기가 증가되어 적용에 큰 어려움이 생길 수 있다. 하지만 초전도 벌크의 폭은 모듈의 폭을 구성하는 주요 변수이자 로터 주변으로부터 자기력선을 효율적으로 구성하는 주요 변수가 될 수 있다. 이에 대한 영향을 살펴 보기 위하여 본 연구에서는 초전도 벌크 폭에 따른 강성변화를 살펴 보았다.

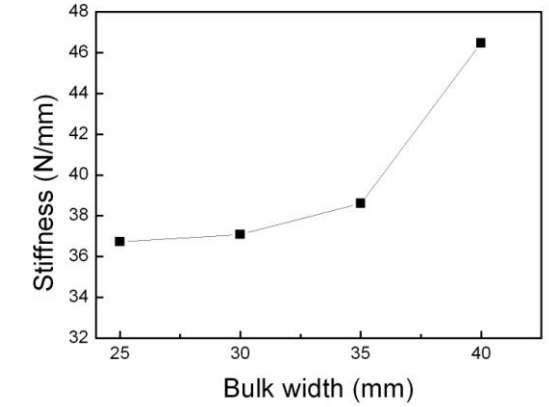


Fig. 4 Stiffness variations of superconductor bulk depend on bulk width

Fig. 4 에서도 확인 할 수 있듯이 초전도 벌크의 폭이 작아짐에 따라서 강성은 점진적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 이때 40 ㎜, 35 ㎜, 30 ㎜, 25 ㎜ 벌크폭은 각각 46.5 N/㎜, 38N/㎜, 37.3N/㎜, 36.7 N/㎜ 의 강성을 나타내었다. 이 결과를 토데로 실제 10 kWh 급 초전도 베어링 고정자 Φ 90 의 내경을 고려하여 6 층의 초전도 벌크 모듈을 지니는 초전도 베어링의 강성을 계산하였다. 25 ㎜폭을 가진 초전도 벌크는 총 66 개로 이루어 지며 약 2,422 N/㎜를 나타내며 40 ㎜ 폭을 가진 초전도 벌크는 42ea 로 이루어지며 1,953 N/㎜를 나타낸다. 결론적으로 초전도 벌크 폭을 최적화 하여 초전도 베어링의 강성을 약 24 % 특성 향상을 가져올 수 있다는 결과를 말해주고 있다. 이는 자기력 강성을 보여주는 초전도 벌크에서 pining flux area 가 uniform 하지 않고 seed 주변에 좀더 많은 자기력선을 pining 시키는 특성이 주요 영향을 미친것으로 사료 된다. 이러한 결과는 수백개의 초전도 벌크로 이루어진 대용량 초전도 베어링을 구성함에 있어 효율적으로 지지강성을 향상시키고 원가를 절감할수 있는 주요한 결과가 될 수 있다.

4. 결론

10 kWh 급 초전도 베어링 벌크의 최적화를 위하여 벌크 조건에 따른 강성 특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 10 kWh 급 초전도 베어링 고정자를 구성하는 초전도 벌크는 양질의 자기반발특성을 보여 줌을 확인 하였다.
2. 초전도 베어링 벌크폭에 따라 강성을 평가한 결과 폭의 넓이에 따라 벌크의 강성이 민감하게 변화함을 확 인 할 수 있었다.
3. 초전도 벌크의 폭을 조절하여 초전도 베어링의 강성을 최대 24 % 까지 효율적으로 증가 시킬 수 있음을 확인 하였다.

이러한 결과를 이용하여 10 kWh 급 초전도 플라이휠 운전에 따른 베어링 강성을 최적화 하여 효율적으로 플라이휠을 부양시킬 수 있으며, 안정적인 플라이휠을 제작하는데 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

This research was supported by a grant from Korea Institute of Energy Technology Evaluation & Planning (KETEP), Republic of Korea.

참고문헌

1. B. J. Park, S. C. Han, Y. H. Han, J.P. Lee, S. Y. Jung, C. H. Kim, B. C. Park and T. H. Sung, “ Static properties of high temperature superconductor bearings for a 10 kWh class superconductor flywheel energy storage system,” Physica C 470, pp. 1772-1776, 2010
2. T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, N. Murakami et al, “Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10 kWh-Class Flywheel Energy Storage System,” IEEE Tran. Vol.15, No.2, 2005
3. Coombs, T. et al., “Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels” IEEE Trans. Applied Supercon. vol.9, pp. 968-971, 1999
4. R. Shiraishi, K. Demachi, M. Uesaka, R. Takahata, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 p 2279, 2003.