

복합형 고온초전도 저어널베어링의 플라이휠 에너지 저장장치 응용

이주성, 성태현, 한상철, 한영희, 정상진
대전광역시 유성구 문지동 103-16, 한전전력연구원 전력계통연구소

Application of Hybrid-type High-T_c Superconductor Journal Bearings to Flywheel Energy Storage Device

Jun-Sung Lee, Tae-Hyun Sung, Sang-Chul Han, Young-Hee Han, and Sang-Jin Jung

103-16 Munji-dong, Yusong-ku, Taejon, Korea 305-380.
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

aeli@kepri.re.kr

Abstract - A horizontal axle-type superconductor flywheel energy storage system has many great features such as extensibility and stability compared to the traditional vertical axle-type flywheel systems. In this paper, a prototype flywheel device with a horizontal axle is presented briefly, and the hybrid construction as an essential supplement in superconductor journal bearing design against the levitation drift is proposed.

1. 서 론

전력의 공급을 수요에 정확히 맞추는 것이 어렵고 비경제적이라는 문제를 해결하기 위해, 양수 발전기술, 압축공기 저장 가스터빈 기술, 전지 에너지 저장기술, 초전도 자기 에너지 저장기술, 플라이휠 에너지 저장기술 등 여러 방식의 전력 저장기술이 개발되었다. 이 가운데 플라이휠 에너지 저장장치는 다양한 용량으로 설치할 수 있고, 수명이 반영구적이며, 축·방전 시간이 가변적이며, 부지 확보가 용이하고, 건설 기간이 짧고, 환경 친화적이며, 사고의 중대성이 낮은 등 많은 장점을 가져, 다양한 조건하에서 이용될 수 있다.

한편, 이러한 플라이휠 에너지 저장장치는 전기 에너지를 플라이휠의 회전에 따른 운동에너지의 형태로 저장하므로 각종 마찰에 의한 에너지 손실을 실용적인 수준으로 줄이는 것이 기술 개발의 관건이 되었다. 베어링 마찰에 의한 에너지 손실을 줄이기 위하여 근래 각광받는 기술이 바로 덩어리 고온초전도체를 이용한 자기베어링 기술이다. 이와 같은 베어링을 채용한 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 고온초전도 베어링의 냉각상태만 유지된다면 위치 제어와 무접촉 유지를 위한 다른 장비나 에너지의 투입 없이도 마찰 없고 안정된 플라이휠의 회전이 가능하다는 장점이 있다. 본 논

문에서는 고온초전도 저어널베어링을 사용하여 한전 전력연구원에서 제작된 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 시제품을 간단히 소개하고, 이러한 수평축 구성에 내재된 문제점을 해결하기 위한 방안으로 복합형 저어널베어링을 제안하고 분석하고자 한다.

2. 배 경

현재까지 개발되어 알려진 플라이휠 에너지 저장장치들은 그 회전축이 중력 방향과 평행한 수직축형이다. 이러한 수직축 방식은 중력에 대한 회전대칭성을 원천적으로 가지므로 가장 생각하기 쉽고 자연스러운 설계 방법이라 볼 수 있으나, 회전축이 중력 방향과 평행함으로써 확장성에 큰 제약을 받게 된다. 플라이휠 에너지 저장장치의 대용량화는 회전축 방향으로 다수의 휠과 베어링들을 직렬 연결해서 구현하는 방법이 가장 효율적이라고 볼 수 있는데, 수직축 방식인 경우 회전축을 중력 방향으로 길게 만들어 휠과 베어링들을 설치해야 하므로 전체 설비의 높이가 커져, 설치가 어렵고 건설비가 많이 들며 설비의 안전성 확보에 어려움이 따르기 때문이다.

반면, 쓰러스트베어링 대신 저어널베어링을 사용한 수평축 방식의 플라이휠 에너지 저장장치를 대용량화할 경우, 중력 방향과 직각인 회전축을 길게 만들어 설치하게 되므로 종래 기술의 수직축 플라이휠 에너지 저장장치를 대용량화할 경우에 비해 다음과 같은 장점이 있다. 우선 플라이휠의 직렬 연결에 의한 대용량 플라이휠 에너지 저장설비의 구조물 상·하단간의 길이가 짧아짐으로써, 설비의 안전성 확보가 용이하고 조립 설치 공정이 쉬워 건설비가 상대적으로 저렴하게 된다. 또한 기존 설비에 적절한 수의 플라이휠과 베어링, 전동/발전기를 수평 방향으로 연결하는 방법으로 쉽게 용량 확장을 할 수 있게 된다. 특히 고온초전도 저

어닐베어링을 사용할 경우 베어링 고정자가 회전축을 감싸는 형태를 가지므로, 수직축 고온초전도 플라이휠 장치에 비해 회전축 반경 방향으로 더 강한 고정력을 얻을 수 있어, 추가 장치 없이도 더 높은 안정성을 구현할 수 있다.

3. 플라이휠 장치 제작

한전 전력연구원에서는 고온초전도 재료 응용 연구의 일환으로 고온초전도 저어닐베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 시작품을 제작한 바 있다. 아래의 그림 1은 상기 시작품의 개략적인 구조를 나타낸 것이다. 플라이휠이 장착된 회전체의 축을 수평으로 하고, 고온초전도 저어닐베어링 2개를 써서 회전체의 하중을 지지하고 이탈을 방지하였다. 한쪽 끝에는 에너지의 입·출력을 담당하는 전동/발전기를 설치하였다.

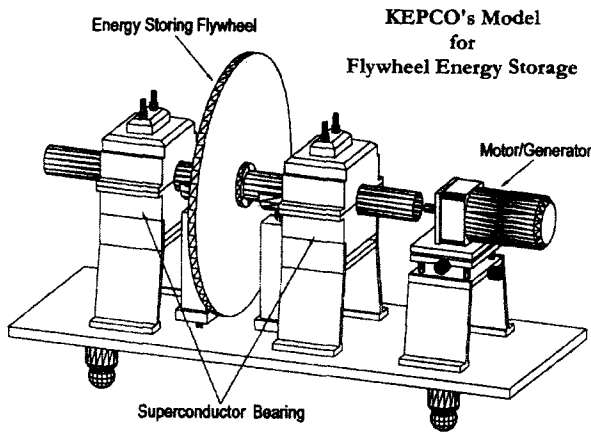


Fig.1. A simplified view of the prototype flywheel energy storage device.

이렇게 제작된 플라이휠의 반경은 25 cm, 축 길이는 56.2 cm로 회전체의 중량은 13.28 kg에 달했다. 휠의 재질로는 알루미늄 합금을 사용했으며, 사용된 전동기는 정격 회전속도 3,000 rpm으로, 이 속도로 휠을 회전시키면 약 8 Wh의 운동에너지를 가지게 된다.

그림 2는 상기 플라이휠 시작품에 사용된 고온초전도 저어닐베어링의 간략한 구성도이다. 베어링의 회전자 내부에 NdBF_e 자석을 그림과 같이 같은 극끼리 마주보게끔 배열하고, 자석의 극면에 자속의 경로가 되는 연철판을 끼워 넣었다. 베어링 고정자는 덩어리 YBCO 고온초전도체 여러 개를 가공하여 맞춘 반원통형의 틀 2개로 구성하였다. 이 고온초전도체 고정자는 회전자 자석에서 나온 자속을 고정하여 부양력과 고정력을 제공하는 역할을 한다.

아래의 그림 3은 상기 고온초전도 저어닐베어링 회전자에 의해 발생하는 자기장 분포를 QuickField[®] 3.4 Professional을 이용하여 계산한 그래프이다. 각각 회전축 중심으로부터 26, 28, 30, 32, 34 mm 떨어진 곳에서의 자기장 강도의 회전축 방향으로의 변화를 그렸다. r = 26 mm인 경우

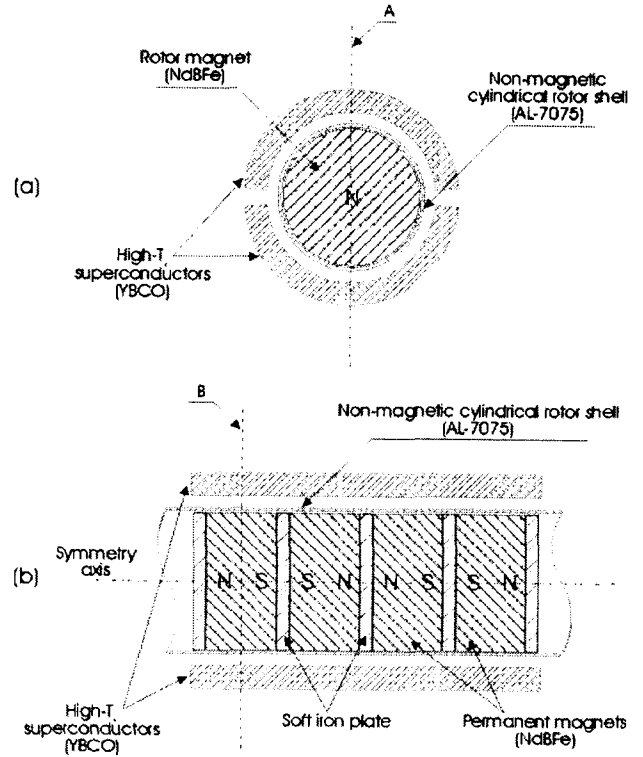


Fig.2. Schematic cross sections of the high- T_c superconductor journal bearings used in the KEPCO model flywheel device. (a) Cut perpendicular to the symmetry axis by the plane B. (b) Cut by the plane A.

최대점의 오목한 부분은 자석들의 극면에 붙여 넣은 철판에 의해 발생한 것이다. 고온초전도체 자속 고정 원리로부터 알 수 있듯이, z 방향으로의 자기장 강도의 변화는 베어링 회전자를 회전축 방향으로 고정해 주는 힘에 기여하게 되고, r 방향으로의 변화는 회전 반경 방향으로의 고정력에 기여하게 된다. 이러한 점을 볼 때 그림 2와 같이 자석의 극면끼리 마주보는 배치는 고온초전도 저어닐베어링의 용도로 매우 적합하다고 할 수 있겠다.

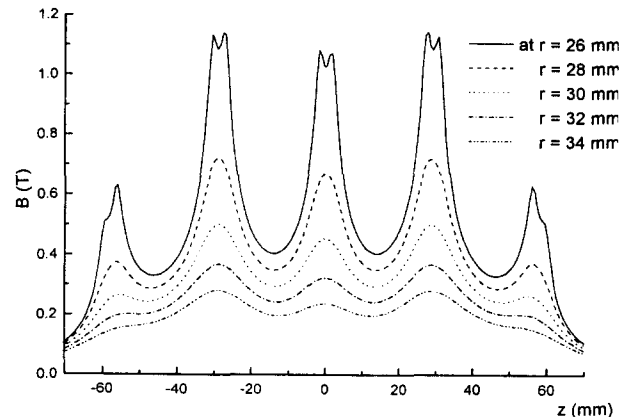


Fig.3. The magnetic induction curve outside the rotor in fig.2.

한편, 고온초전도 베어링은 진동, 자기장 섭동 등이 가해질 경우 고온초전도체의 독특한 자기 이

력 특성으로 인해 일정한 평형 위치가 보장되지 않는다는 문제점이 제기되어 왔다. Hikihara 등은 이러한 현상을 초전도체와 자석간의 힘-거리 이력 실험을 통해 조사한 바 있다[1]. 이 연구 결과를 통해 유추할 수 있는 사실은, 고온초전도 베어링에 진동이 존재하는 경우 회전체에 하중이 가해지는 방향으로 베어링의 평형 위치가 이동하려는 경향이 발생한다는 것이다. 실제로 위의 플라이휠 시제품에서도 회전시에 발생한 진동에 의해 평형 위치가 중력 방향으로 이동한다는 점을 관찰할 수 있었다. 이러한 문제점은 고온초전도 재료의 개선에 의해 완화될 수 있다고 보여진다. 그러나 보다 근본적인 대책으로서 일각에서는 부양력 제공에 영구자석간의 자기력을 사용하여 하중 지지력을 강화함과 동시에, 베어링의 평형 위치가 하중 방향으로 이동하지 않게 한 복합형 고온초전도 베어링을 개발하고 있다.

4. 복합형 고온초전도 저어널베어링

4.1 복합형 고온초전도 저어널베어링의 구성

앞에서 논의한 바와 같은 이유로 인해 이미 몇 가지 형태의 복합형 고온초전도 쓰러스트베어링이 개발되어 수직축 플라이휠 장치에 적용된 바 있다. McMichael 등은 영구자석들 사이의 인력과 척력을 이용한 부양 실험기구에 고온초전도체를 복합형으로 장착하여 발휘되는 자기 고정력과 자기력 특성이 영구자석-고온초전도체 구성의 경우에 비해 크게 손색이 없음을 보였고[2], 나아가 Xia 등은 이러한 원리를 이용해 회전체 상·하단의 복합형 고온초전도 쓰러스트베어링으로 부양력을 제공하는 수직축 플라이휠 장치를 제작하여 발표하였다[3].

아래의 그림 4는 고온초전도 저어널베어링에 적용한 복합형 베어링의 구성으로, 한전 전력연구원에서 고안한 것이다. 베어링의 회전자는 그림 2의 베어링 구조와 같고, 고정자의 하부에 반원주형의 영구자석들을 회전자 자석과 같은 배열로 설치하여 회전자와 척력을 작용하게 하였다. 이러한 구성에 필연적으로 수반되는 자석간의 힘에 의한 불안정성의 대책으로 고정자의 상부에 반원통형의 고온초전도체를 배치하여 자기고정력을 제공하게 하였다. 도면에 쓰여진 수치들은 아래에서 언급할 수치계산에 사용된 것으로, 본 복합형 베어링의 실제 설계 요소와는 별 관련성이 없다.

이와 같은 복합형 고온초전도 저어널베어링은 특정한 용도처에 요구되는 하중 지지력에 따라 설계되어야 한다. 베어링의 회전자 평형 위치를 염두에 두고 영구자석간의 척력을 설정해야 하며, 실제 가동도 회전자를 하중에 의한 평형 위치에 두고 고온초전도체를 자기장 하 냉각(field-cooling)해야 한다. 이 경우 하중은 영구자석간의 척력에 의해 지지되게 되며, 고온초전도체는 축 방향, 반경 방향의 이탈만을 방지해 주게 된다. 영구자석에 의한 힘이 회전축 반경 방향으로로는 안정된 평형(stable equilibrium)을 이루게 되므로, 앞에서 언급한 진동

에 의한 평형점 이동(levitation drift)은 회전축 방향으로 일어나게 된다.

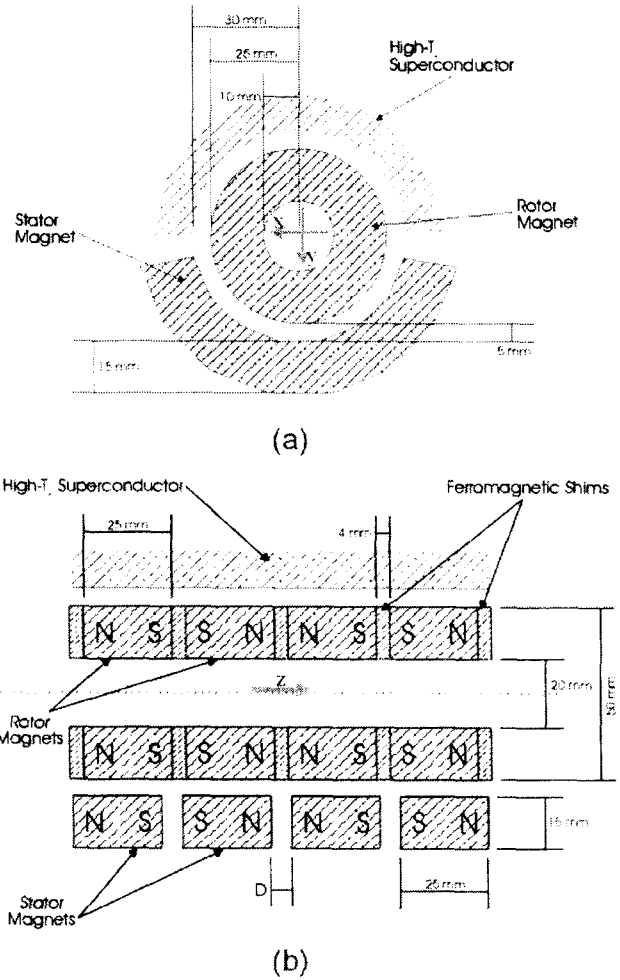


Fig.4. Schematic cross sections of a hybrid-type high- T_c superconductor journal bearing. The numerical dimensions were given for the numerical calculations. (a) Cut perpendicular to the symmetry by the plane B. (b) Cut by the plane A.

4.2 자석 간의 자기력 계산

그림 4에서 보인 복합형 고온초전도 저어널베어링에 대해 Maxwell-3D[®] Field Simulator를 사용하여 회전자와 고정자의 영구자석 간에 작용하는 자기력을 계산하였다. 모델들을 구성하는 자성체로는 NdFe35 자석과, steel #1008을 사용했다.

표 1은 $D = 6 \text{ mm}$ 로 잡은 베어링 회전자를 x 방향, y 방향으로 이동하였을 때의 힘을 기입한 것이다. 얻어진 자기력 값 중 수십 N 이하의 것들은 베어링 구조의 대칭성으로 볼 때 0이 되어야 하므로, 계산상 발생한 오차이다. 회전자를 x 방향으로 2 mm 이동시켰을 때 약 $-5.9 \times 10^4 \text{ N/m}$ 의 탄성 계수 k_x 를 얻을 수 있었고, 회전자를 y 방향으로 $\pm 2 \text{ mm}$ 이동시켰을 때의 자기력으로부터 평균 약 $-2.6 \times 10^5 \text{ N/m}$ 의 탄성 계수 k_y 를 얻었다.

이는 이 베어링 회전자에 약 100 kgf의 하중을 가해주었을 때 중심점에 이와 같은 탄성계수를 가지고 고정된다는 뜻이다. 계산에 의해 음의 탄성계수가 얻어졌으므로, 상기 복합형 고온초전도 저어널 베어링에서는 진동에 의한 회전반경 방향으로의 평형점 이동은 문제가 되지 않으리라고 예측할 수 있다.

Tab.1. Magnetic forces between the rotor magnets and the stator magnets. The displacement of the stator from the equilibrium position is given as d .

displacement (mm)	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$	$ F (N)$
$d=0$	-3.6	-967.3	0.3	967.3
$d_x=2$	-118.8	-985.4	-7.4	992.6
$d_y=2$	-1.8	-1196.2	8.3	1196.2
$d_y=-2$	3.1	-680.5	10.5	680.5

한편, 고정자 자석간의 축 방향 간격 D 를 각각 4 mm, 6 mm로 잡은 두 가지 모델에 대해, 각 회전자를 z 방향으로 0 ~ 5 mm 이동시켰을 때의 탄성계수 k_z 는 각각 약 2.93×10^5 N/m, 2.78×10^5 N/m로, 고정자 자석간의 거리 D 에 의한 영향이 별로 없는 것으로 나타났다. 그림 5은 회전자를 위와 같이 이동시켰을 때 나타나는 부상력의 변화를 그린 것이다. 약 3 mm 이내로 이동시켰을 경우에는 $D = 6$ mm의 베어링에서 부상력의 변화가 훨씬 적음을 알 수 있다. 이와 같이, 축 방향의 평형점 이동이 일어난 경우에도 부상력의 변화가 비교적 작은 $D = 6$ mm의 구성이 $D = 4$ mm에 비해 우수하다고 볼 수 있다.

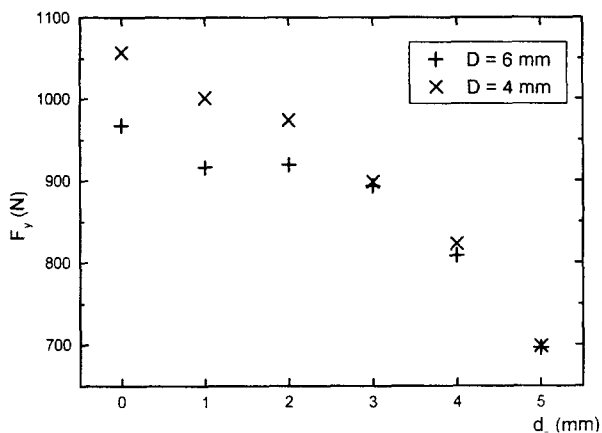


Fig.5. Vertical repulsive magnetic forces between the rotor and the stator magnets calculated in two model bearings.

본 논문에서 제안, 분석한 복합형 고온초전도 저어널베어링에서 고온초전도체의 역할은 회전자에 가해지는 회전체의 중량을 지탱하는 것이 아니라, 고정자와 회전자의 영구자석들 간에 작용하는 xy 평면 방향의 복원력을 보강함과 동시에 양의 탄

성계수를 가지는 z 축 방향으로의 자기력 이상의 자기 고정력을 제공하여 축 방향의 안정성을 확보하는 것이다. 따라서 이러한 역할을 위해 고온초전도체는, 최소한 자석간의 반발력에 의한 축 방향의 양의 탄성 계수 k_z 이상의 고정력을 제공해 줄 수 있어야 한다. 더우기 진동에 의한 축 방향의 평형점 이동도 예측되므로 이를 저지할 정도의 충분한 여유 고정력이 필요할 것이다.

5. 결 론

수평축 방식의 플라이휠 에너지 저장장치는 종래 기술의 수직축 플라이휠 장치에 비해 확장성과 안정성 측면에서 우수한 특성을 가진다. 본 논문에서는 고온초전도 저어널베어링을 사용하여 한전 전력연구원에서 제작된 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 시제품을 간단히 소개하였다. 여기에 사용된 고온초전도 베어링은 진동이 가해질 경우 고온초전도체의 독특한 자기 이력 특성으로 인해 일정한 평형 위치가 보장되지 않는다는 문제점이 있다. 이러한 문제점의 해결책으로 베어링 고정자에 자석을 사용한 복합형 고온초전도 저어널베어링의 구성을 제안하였다. 여기서 고온초전도체의 역할은 고정자와 회전자의 영구자석들 간에 작용하는 xy 평면 방향의 복원력을 보강함과 동시에 양의 탄성계수를 가지는 z 축 방향으로의 자기력 이상의 자기 고정력을 제공하여 축 방향의 안정성을 확보하는 것이다. 개발된 모형에 대한 수치 계산의 결과로, 고정자 고온초전도체의 자기고정력이 충분히 발휘된다면 상기 복합형 구성은 고온초전도 베어링의 평형점 이동 문제에 좋은 해결책이 될 수 있음을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Takashi Hikihara and Francis C. Moon, "Levitation drift of a magnet supported by a high- T_c superconductor under vibration", *Physica C*, 250, 121, 1995
- [2] C. K. McMichael, K. B. Ma, M. A. Lamb, M. W. Lin, L. Chow, R. L. Meng, P. H. Hor, and W. K. Chu, "Practical adaptation in bulk superconducting magnetic bearing applications", *Appl. Phys. Lett.*, 60 (15), 1893, 1992
- [3] Z. Xia, Q. Y. Chen, K. B. Ma, C. K. McMichael, M. A. Lamb, R. S. Cooley, P. C. Fowler and W. K. Chu, "Design of Superconducting Magnetic Bearings with High Levitating Force for Flywheel Energy Storage Systems", *Proceedings of the Applied Superconductivity Conference*, 1994