

Design and Construction of 35 kWh Class Superconductor Flywheel Energy Storage System

S. Y. Jung*, Y. H. Han, B. J. Park, S. C. Han

KEPCO Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 10 August 2012; revised 17 August 2012; accepted 18 August 2012)

35 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템 설계 및 제작

정세용*, 한영희, 박병준, 한상철

Abstract

A superconductor flywheel energy storage system (SFES) is an electro-mechanical battery which transforms electrical energy into mechanical energy for storage, and vice versa. A 35 kWh class SFES module was designed and constructed as part of a 100kWh/1MW class SFES composed of three 35 kWh class SFES modules. The 35 kWh class SFES is composed of a main frame, superconductor bearings, a composite flywheel, a motor/generator, electro-magnetic bearings, and a permanent magnet bearing. The high energy density composite flywheel is levitated by the permanent magnet bearing and superconductor bearings, while being spun by the motor/generator, and the electro-magnetic bearings are activated while passing through the critical speeds. Each of the main components was designed to provide maximum performance within a space-limited compact frame. The 35 kWh class SFES is designed to store 35 kWh, with a 350 kW charge/discharge capacity, in the 8,000 ~ 12,000 rpm operational speed range.

Keywords : superconductor, flywheel, energy, bearing

I. 서론

초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템(SFES, Superconductor Flywheel Energy Storage System)은 전기를 이용하여 플라이휠을 회전시켜 전기 에너지를 운동 에너지로 저장하는 기계식 축전지

이다. SFES는 공기저항을 최소화할 수 있는 진공챔버 프레임, 무접촉식 고온초전도 베어링, 고에너지밀도의 복합재 플라이휠, 고효율 전동/발전기, 전자석 베어링 그리고 영구자석 베어링으로 구성되어 있다. 영구자석 베어링과 고온초전도 베어링으로 부양시킨 복합재 플라이휠을 전동/발전기로 회전시켜 에너지를 저장하며, 임계속도(critical speed)에서 전자석 베어링을 작동하여 진동을 최소화한다. 수동적으로 플라이휠의 진동을 제어할 수 있는 초전도 베

*Corresponding author. Fax : +82-42-865-5679
e-mail : shammon@kepri.re.kr

어링 기술은 SFES를 다른 플라이휠 에너지 저장기술과 구분하는 강점이다. SFES는 앞으로 무정전전원공급(UPS, Uninterruptible Power Supply), 에너지 재생, 부하 평준화, 전압 및 주파수 조정 등 광범위한 분야에 적용될 전망이다 [1-4].

본 연구에서 35 kWh급 SFES 3기로 구성된 100kWh/1MW급 SFES를 구현하기 위해 35 kWh급 SFES를 설계 및 제작하였다. 35 kWh급 SFES의 각 주요부품은 콤팩트한 진공챔버 프레임에 조립됨과 동시에 요구되는 성능을 제공할 수 있도록 설계되었다 [5]. 제작된 35 kWh급 SFES는 운전속도인 8,000 ~ 12,000 rpm에서 에너지 35 kWh 저장과 350 kW 입/출력이 가능하다.

II. 35 kWh급 SFES의 설계 및 제작

35 kWh급 SFES는 Fig. 1과 같이 프레임에 초전도 베어링 고정자, 전동/발전기 고정자, 전자석 베어링 고정자가 조립되며, 플라이휠 로터에 각 주요부품의 회전자를 조립하여 전체 시스템에 장착하게 된다.

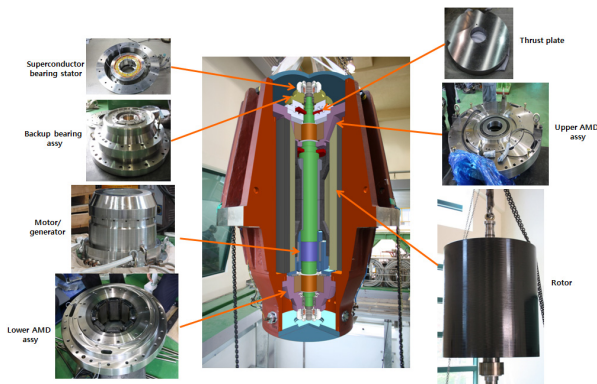


Fig. 1. 35 Major components of 35 kWh class SFES.

초전도 베어링의 설계 및 제작

35 kWh급 SFES 로터 외경이 120 mm 이고 백업베어링 등의 제한으로 35 kWh급 초전도 베어링은 고정자를 이루고 있는 초전도 벌크가 초전도 베어링 회전자를 감싸는 구성인 내륜형

타입이며 회전부는 $\phi 88.8$ mm으로 설계되었다. 초전도 베어링 고정자를 구성하고 있는 벌크는 초전도 베어링의 강성을 결정하는 주요한 인자이며 벌크의 폭은 베어링을 구성하고 있는 단결정 초전도 벌크 개수와 관계된다. $\phi 92$ mm 크라이오스태트(cryostat) 내측에 삽입되는 초전도 벌크 사이즈를 최적화 하기 위해 강성평가를 진행한 결과, 12각형으로 구성될 수 있는 25mm의 벌크 폭을 가진 벌크가 모듈 조립 상태에서 가장 좋은 강성특성을 보여줌을 확인할 수 있었다 [6]. 이는 단결정 초전도 벌크 면적 중 씨드(seed) 부근에서 주로 피닝 면적(pinning area)이 집중되며 이러한 피닝(pinning) 집중에 의한 자기분포가 벌크 면적(bulk area)에 가장 큰 영향을 미친 것이라 판단된다. 또한 이 값은 지름방향으로 전자석 베어링의 $1.1 \times E6$ N/m 의 절반 수준인 $0.4 \times E6$ N/m 으로 하이브리드로 작동하기 좋은 조건으로 예측되었으며, 축방향의 강성은 지름방향보다 60% 높다.

Fig. 2는 35 kWh급 초전도 베어링 고정자의 전체 조립을 보여주고 있다. 시스템 단열을 위한 베어링 지지대는 하우징 내부에 링 타입으로 삽입 되어있으며 초전도 베어링의 주기적인 온도 확인을 위하여 극저온 센서가 벌크 표면에 삽입 됐다. 복사 열침입량을 최소화 하기

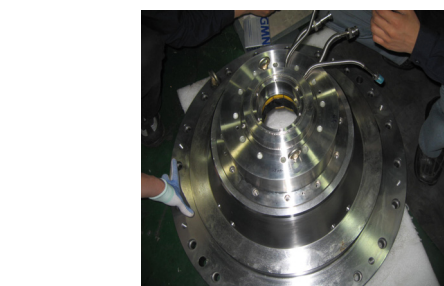
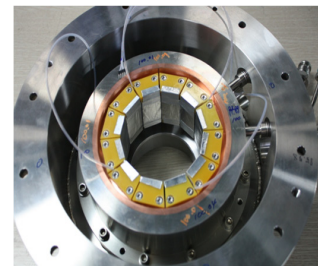


Fig. 2. Superconductor bearing stator bottom and top view.

위하여 다층박막단열재를 이용하여 벌크표면을 감싸도록 했으며 제작된 초전도 베어링 고정자는 준비된 35 kWh급 초전도 플라이휠 하우징에 삽입되어 35 kWh급 SFES 시스템에 장착되었다.

복합재 플라이휠의 설계 및 제작

본 연구에서 Fig. 3과 같이 총 무게 948 kg, 지름 907 mm, 높이 1300 mm, 최대 속도 12,000 rpm, 35 kWh 용량의 로터를 유한요소법을 이용하여 설계 하였다, 기본적으로 로터는 4개의 링으로 구성되며 한번 억지끼움하여 로터의 반경방향 응력을 저감시켰다. 각 링의 두께는 41.5, 43.5, 46.5, 52.6 mm로 결정하였다. Fig. 3과 같이 최대 강도비는 0.25로 안전계수 4를 확보하였고 회전 시 로터 내경의 팽창량은 1.4 mm로 0.52% 변형률을 갖는다.

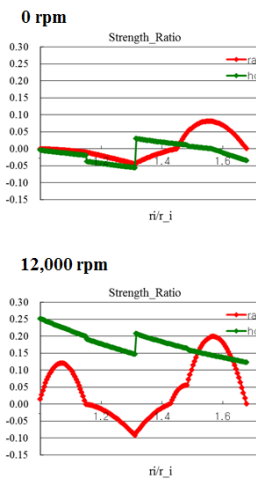
Specification	Values (로터)	Unit
Energy storage	35	kWh
Rim materials (Carbon VI)	(8.6, 20.8, 75.0, 100)	%
ω_{max}	12,000	rpm
Ir (Rotor)	0.65	-
Mass (Rotor)	978.7	kg
SED_usable	26.18	Wh/kg
Rotor ID	539.5	mm
Rotor OD	907.7	mm
t_1	41.5	mm
t_2	43.5	mm
t_3	46.5	mm
t_4	52.6	mm </td
δ_1	0.2	mm
h	1,300	mm
Max. Strength ratio	0.25	-
Ur at inner surface	1.4	mm
ϵ_{θ} at inner surface	0.52	%

Fig. 3. Rotor specifications and stress distribution.

35 kWh급 플라이휠 로터는 Fig. 4와 같이 초전도 베어링 회전자, 전자석 베어링 쓰러스트 플레이트, 전자석 베어링 회전자, 영구자석 베어링 회전자, 카본 로터, 스틸 축, 허브, 모터 회전자로 구성된다. 각 구성 부품은 열간박음, 프레스 맞춤(press-fit), 볼팅 등의 방법으로 조립되며, 각 조립 단계에서는 정밀한 가공상태가 요구된다.



Fig. 4. Major components of 35 kWh class rotor.



전동/발전기의 설계 및 제작

35 kWh급 SFES용 전동/발전기의 설계는 시스템의 1차 굽힘(bending) 주파수를 높이기 위하여 스택 길이가 짧으면서도 12,000 rpm에서 회전체에 부착된 영구자석이 원심력에 의해 회전축에서 분리되지 않는 조건을 기준으로 설계 하였다. 고정자는 코어를 갖는 평행 4극 구조로 자석포함 외경이 230 mm에 스택길이를 178.5 mm까지 줄일 수 있었다. 이러한 설계가 나오게 될 수 있었던 기술적 뒷받침은 자석 두께 25 mm인 대형 자석이 12,000 rpm에서도 회전축에서 분리되지 않도록 충분한 간섭량을 줄 수 있는 T800-카본 파이버로 제작된 튜브로 냉간박음 할 수 있는 제작기술을 고안했기 때문이다.

최종적으로 설계된 평행 4극 구조의 단면은 Fig. 5와 같다.

Table 1. Motor/generator specifications.

Specs	Value	Specs	Value
Output	350 kW	Input V	700 Vdc
Rated speed	12,000 rpm	No. of poles	4

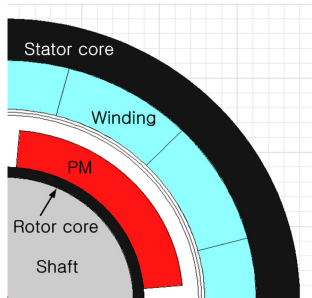


Fig. 5. Structure of motor/generator

전동/발전기 하우징 설계 시, 진공 중이면서 10,000 rpm 이상의 고속에서 사용할 수 있는 영구자석형 대용량 전동/발전기의 고정자 코어와 권선을 생각하기 위하여 세계에서 처음으로 고정자의 권선과 코어에 직접 냉각유로를 만들어서 절연유로 순환냉각하는 방법을 고안하게 되었다. 절연유의 흐름 방향은 Fig. 6과 같고, 하우징까지 조립 완료된 전동/발전기는 Fig. 7과 같다.

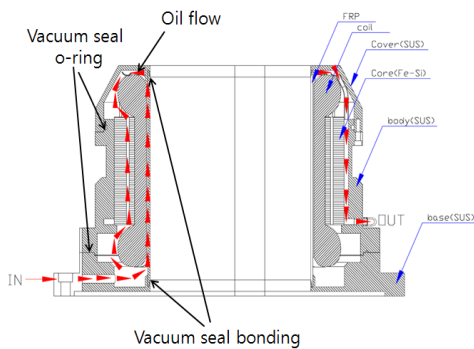


Fig. 6. Cross-section of motor/generator housing.

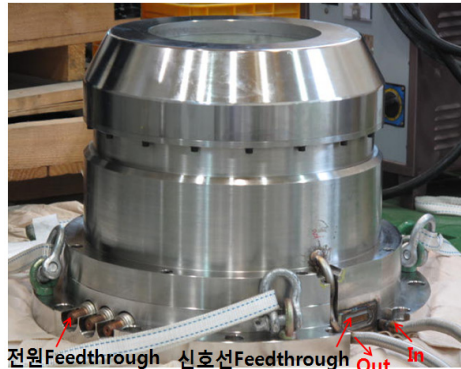


Fig. 7. Assembled motor/generator.

전자석 및 영구자석 베어링의 설계 및 제작

35kWh급 SFES의 로터부 설계가 진행되면서 질량과 회전속도 등이 도출되면 지름방향 전자석 베어링 초기 설계를 할 수 있다. 전자석 베어링의 개념적인 구성은 Fig. 8과 같이 8개 pole로 구성된 내륜형 타입으로 설계하였다. 접하는 두 극의 권선은 직렬로 결선되어 있고, 마주하는 두 쌍의 극은 자기 베어링의 각 축(x, y)을 제어한다. 부하 용량 설계는 전자석 베어링이 최대로 감당할 수 있는 정적하중과 동시에 질량불평형량이 최대속도에서 발생하는 동적하중을 고려하여 회전체의 무게를 1565 kg, 최대 운전속도를 12,000 rpm, 회전체의 외경을 약 240 mm 로 가정했을 때, 베어링에 필요한 힘 즉, 12,270 N을 구하였다. 제작된 35kWh급 SFES용 지름방향 전자석 베어링은 Fig. 9와 같고, Table 2는 설계 결과를 나타내고 있다.

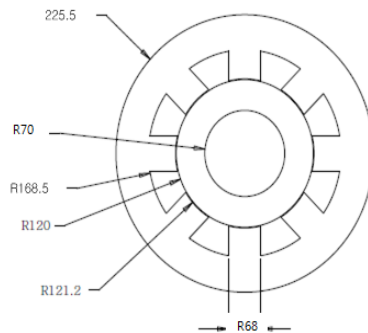


Fig. 8. 8-pole electro-magnetic bearing dimensions.

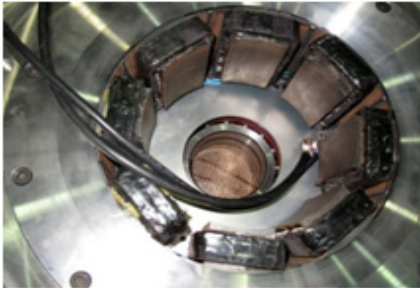


Fig. 9. Radial electro-magnetic bearing stator.

Table 2. Electro-magnetic bearing design specifications.

Parameters	Value
Pole face area	8,840 mm ²
Axial length	130 mm
Maximum input current	20 A
Nominal air gap	1.0 mm
Coil turns	80 turns

축방향 전자석 베어링은 영구자석 베어링의 부족한 힘을 보충하여 회전체를 부상시키는 역할과 축방향으로 제어하는 역할의 2가지 역할이 필요하다. 권선은 100 턴, 정격전류는 10 A를 공급하도록 하였다. 제작된 축방향 전자석 베어링은 Fig. 10과 같다. 또한, 부하용량은 축방향 전자석 베어링 플레이트의 재질에 따라 바뀌는 상대투자율에 따라 영향을 받는데 12,000 rpm 운전 시에 강도를 고려하여 재질을 SM45C로 선정하였다.

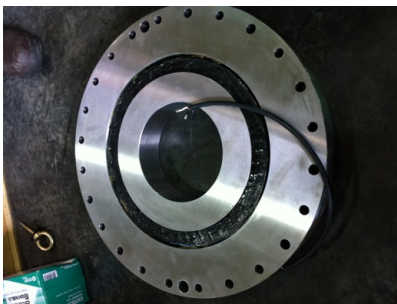


Fig. 10. Axial electro-magnetic bearing stator

영구자석 베어링은 전체 로터 하중(약 1.6톤)의 약 80~90% 가량에 대한 역할 분담을 하고 있으며 나머지는 축방향 전자석 베어링에서 분담한다. 따라서, 설계에서 영구자석의 크기, 자석의 재료 선택 및 플레이트와의 공극이 중요한 설계인자이다. 여기서 재료는 NdFe33H로 정해졌고, 로터의 직경과 영구자석 베어링의 여유 두께 제한에 따른 치수 결정에 대한 제약이 많았다. 먼저 주어진 영구자석 베어링 크기에 따른 영구자석 베어링의 위치강성을 Fig. 9와 같이 로터와 공극을 2.7 mm에서 3.3 mm까지 0.1 mm씩 증가시키며 해석을 수행한 결과, 강성값은 2,740 N/mm로 계산되었다.

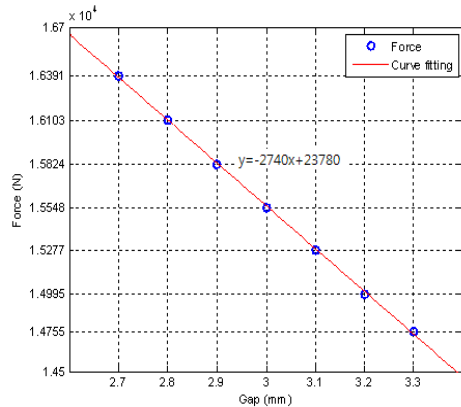


Fig. 11. Stiffness of permanent magnet bearing.

전체 시스템 조립

35 kWh급 진공챔버 프레임에 초전도 베어링 고정자, 전동/발전기 고정자, 전자석 베어링 고정자 및 플라이휠 로터 등의 35 kWh급 SFES의 주요부품이 장착되어 있는 하우징이 조립된다 (Fig. 12). 공기저항에 의한 회전손실을 최소화 하도록 35 kWh급 진공챔버 프레임은 10⁻³ Torr 이상의 진공도를 유지할 수 있다. Fig. 12에서와 같이 35 kWh급 SFES의 진동에 의해 실험실 건물이 가진되지 않도록 방진패드를 이용하여 진동절연시켰다.

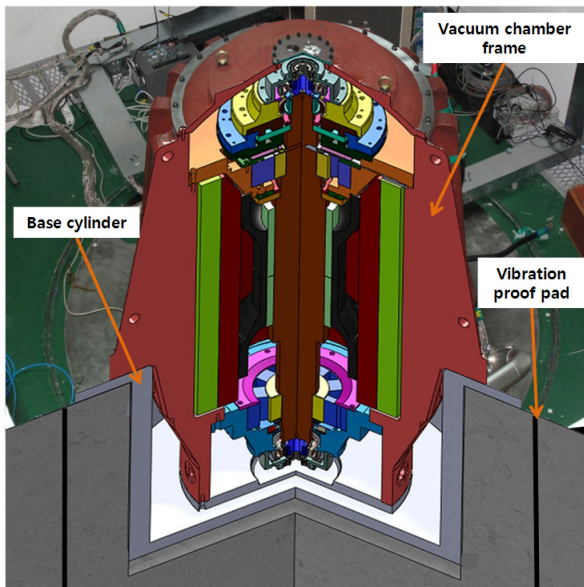


Fig. 12. Assembled 35 kWh class SFES.

III. 결론

본 연구에서 35 kWh급 SFES 3기로 구성된 100kWh/1MW급 SFES를 구현하기 위한 35 kWh급 SFES를 설계 및 제작하였다. 무접촉식 고온 초전도 베어링, 고에너지밀도의 복합재 플라이휠, 고효율 전동/발전기, 전자석 베어링 그리고 영구자석 베어링이 콤팩트한 진공챔버 프레임에 조립됨과 동시에 요구되는 성능을 제공할 수 있도록 각 주요부품이 설계되고 제작되었다. 제작된 35 kWh급 SFES는 운전속도인 8,000 ~ 12,000 rpm에서 에너지 35 kWh 저장과 350 kW

출력이 가능하다.

Acknowledgments

This work was financially supported by Korea Energy Technology Evaluation and Planning.

References

- [1] J. R. Hull, "Superconducting bearings", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 13, p.R1 (2000).
- [2] Nagaya, S. et al., "Study on high temperature superconducting magnetic bearings for 10 kWh flywheel energy storage system," *IEEE Trans. Applied Supercon.*, vol 11, pp. 1649-1652 (2001).
- [3] Coombs, T. et al., "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels," *IEEE Trans. Applied Supercon.*, vol. 9, pp. 968-971 (1999).
- [4] Ichihara, T. et al., "Application of superconducting magnetic bearings to a 10 kWh-class flywheel energy storage system", *IEEE Trans. Applied Supercon.*, vol. 15, pp. 2245-2248 (2005).
- [5] Jung, S. et al., "Design and Construction of 35 kWh Class Superconductor Flywheel Energy Storage System Main Frame", *Progress in Superconductivity*, vol. 13, pp. 52-57 (2011).
- [6] Park, B. et al., "Static properties of superconductor journal bearing substatator for superconductor flywheel energy storage system", *Progress in Superconductivity*, vol. 10, pp. 55-59, (2008)