

초전도 베어링을 이용한 초전도 플라이휠 에너지저장장치 개발

한 영 희, 한 상 철, 정 년 호, 성 태 현
한국전력공사 전력연구원 전략기술연구소

1. 서 론

초전도 베어링의 개발 이전에도 전자석 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 연구 개발이 진행되고 있었다. 대표적인 예로 NASA에서는 우주항공용으로 330 Wh 급의 플라이휠 UPS를 개발 완료하였으며, Active Power 사에서는 20 kWh / 500 kW 급, Beacon Power사는 25 kWh / 100 kW급의 플라이휠 UPS를 상업화한 바 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 전기에너지로 모터를 돌려 회전체를 고속으로 회전시켜 회전 에너지로 변환시켜 저장하였다가 필요할 때 발전기를 연결하여 전기에너지를 뽑아내는 방식을 사용하는 에너지 저장장치이다. 이를 구성하는 것은 회전할 수 있도록 베어링과 에너지를 저장할 수 있는 로터, 전기에너지에서 회전에너지, 또한 회전에너지에서 전기에너지로 변환할 수 있는 전동/발전기의 3 부분으로 되어 있다. 플라이휠 에너지 저장장치에서 중요한 것은 저장 에너지밀도와 변환효율 그리고 손실율이다.

기존의 전자석 플라이휠의 개발이 활발히 진행되는 상황에서 전자석 베어링의 대기전력에 의한 손실부분을 없앨 수 있을 것으로

예상되던 초전도 베어링을 이용하는 것은 어찌면 당연한 수순이었는지 모른다. 본고에서는 초전도 베어링을 이용한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발에 대한 외국의 연구 현황과 국내 현황을 비교해 보고 앞으로의 개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 미국의 개발 현황

미국에서는 플라이휠 관련 프로젝트에 많은 연구진들이 참여하여 우주산업분야에서부터 도심형 버스에까지 폭넓게 연구되고 있다.¹⁾ 초전도 베어링을 이용한 플라이휠 관련 프로젝트중 초전도 베어링 관련 기술 개발에 대한 연구는 주로 ANL(Argonne National Laboratory) 이 플라이휠 시스템 개발은 보잉사에서 주로 수행하고 있다. ANL에서 개발된 고온 초전도 베어링은 기존의 기계식 베어링에 비해 약 10^{-7} 정도, 전자석 베어링보다는 대략 10^{-2} 정도 낮은 회전손실 특성을 갖으며, 플라이휠 시스템에 적용시켜 하루에 2% 도 못 미치는 에너지 손실을 갖는 플라이휠 시스템을 개발하였다. 2% 에너지 손실은 플라이휠 시스템이 갖는 회전손실에 고온 초전도 베어링을 냉각시키는데 수반되는 모든 에너지 손실을 포함한 것이다. ANL은 보잉사와 공동으로 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템과 요소별 설계를 하여 시스템을 구축하였다. 플라이휠은 stroke, composite rim and hub, lifting bearing, radial bearing과 stabilizer로 구성되어 있다.

ANL은 3 kW 플라이휠 시스템을 구성하여 spin test를 수행하였고 이와 더불어 spin test용 동적 모델을 개발하여 실험을 수행하기 전에 미리 플라이휠 시스템의 동특성을 예측하는데 사용하였다. 또한 시스템의 안정성을 평가하기 위한 방법으로 고속 회전하는 플라이휠을 touch down시킴으로써 플라이휠 시스템의 제어가 실패하였을 때의 현상



그림 1. 상업화 된 20 kWh / 250 kW Flywheel UPS system(Beacon power)

과 그때의 안정성을 평가하였다. composite rim과 hub는 냉각 열박음 방식을 사용하였다. 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템의 composite rim과 composite stroke로 구성된 rim과 hub는 13,600 rpm까지 성공적으로 회전하였다. 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템에 사용된 모터/전동기는 4 pole로 구성되어있으며 radial gap이 큰 것이 특징이다. 모터/전동기 특성을 평가하기 위해 87,000 rpm에서 회전 특성 실험을 수행하였다. 출력은 3 kW이고 이때 발생하는 모터/전동기 손실은 45 W이다. 100 kW UPS 플라이휠 시스템에 적용될 모터/전동기 특성은 24,000 rpm에서 수행되었으며 출력은 100 kW이고 손실은 약 1.6 kW 정도였다. Spin test와 touch down test 결과를 통해 각 요소별 디자인을 수정하였고 100 kW UPS 플라이휠 시스템을 구축하는데 활용하고 있다. Touch down test 결과를 바탕으로 ANL은 S-Bracket 안전챔버를 설계하여 100 kW UPS 플라이휠 시스템용으로 개발하였고 개발된 안전챔버는 플라이휠 시스템을 더욱 안전하고 작은 사이즈로 구성하는 역할을 하게 되었다.

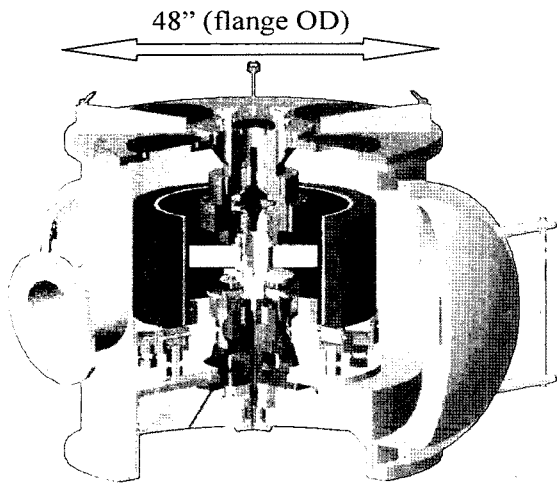


그림 2. Boeing 사의 10 kWh 부하평준화용 초전도 플라이휠 시스템

3. 일본의 개발 동향

일본에서는 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 지원

하의 국가적 과제로써 연구기관과 기업간 상호 협력하에 초전도 플라이휠 시스템에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다. 일본은 데이터 백업 시장을 고려한 플라이휠 시스템 시장이 2010년에 25 조 엔이 될 것으로 예상하고 있다.

ISTEC과 중부전력은 현재 10 kWh급 초전도 플라이휠 시스템 시작품을 제작하여 직경 1 m에 무게 400 kg인 플라이휠 로터를 12,000 rpm까지 성공적으로 회전시킴으로써 대용량 초전도 플라이휠 시스템의 가능성에 대한 확신을 얻게 되었다.²⁾ 10 kWh 급 초전도 플라이휠 시스템은 초전도 베어링과 두 개의 전자석 베어링, Carbon Fiber Reinforced Plastic으로 구성되어 있고 이에 사용되는 레디얼 방식 초전도 베어링은 10 N/cm²(71 K) 부양능력을 달성하였다. 초전도 베어링은 실린더 형태이며 직경 12 cm에 9 cm 높이를 갖는다.³⁾⁴⁾

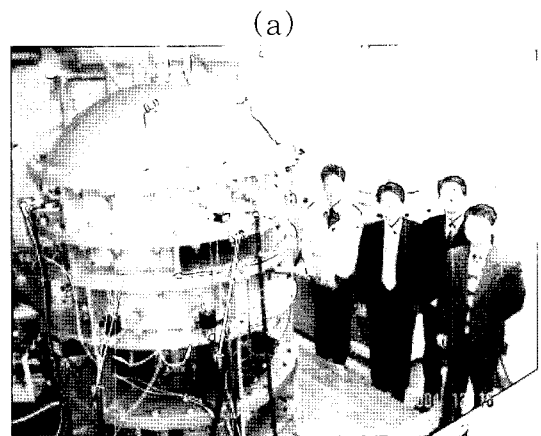
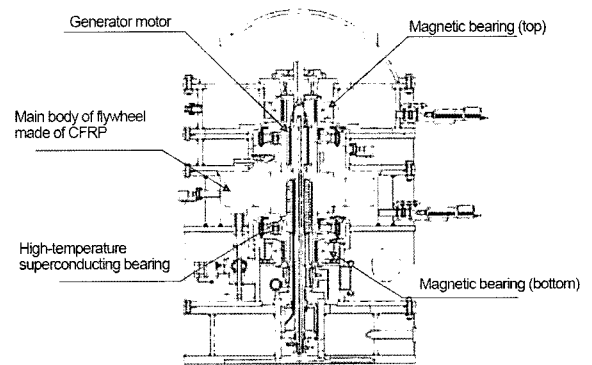


그림 3. 시코쿠 전력(일)의 10 kWh 플라이휠 시스템 모식도(a)와 설치모습(b)

ISTEC은 10 kWh급 초전도 플라이휠 시스템에 이어 100 kWh급 초전도 베어링개발을 이미 시작하여 100 kWh급 초전도 베어링의 기초설계가 완료되었고 직경 20 cm에 높이 10 cm 실린더 형상으로 제작될 계획이다.⁵⁾

한편 시코쿠 전력과 미쯔비시 중공업이 공동으로 10 kWh급 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하여 마쓰야마 발전소에서 2004년 말까지 시험운전하였다.

4. 국내의 연구개발 동향

국내에서는 전력기반조성 사업센터의 지원을 받아 한전 전력연구원 주관으로 효성 중공업, 한국 기계연구원, 한양대, 한국과학기술원 등이 공동으로 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발을 목표로 연구를 진행 중이다.

주관기관인 한전전력연구원은 '02년 300 Wh 초전도 플라이휠에너지저장장치를 개발하고 28,000 rpm까지 운전하여 진폭 25 μm로 세계 최고 값을 달성한 바 있으며, '03년에는 초전도 베어링 마찰계수 값으로는 세계 최고 수준인 2×10^{-6} 을 달성하였다. 이러한 기술력을 바탕으로 '04년 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지저장장치 설계를 완료하고 현재는 제작을 완료하고 초전도 회전체 전용 실험동 내의 지하 5m 깊이에 있는 안전시설에서 전체 시스템을 조립하고 있다.

전력연구원에서 개발하고 있는 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지저장장치의 특징은 영구 자석 베어링을 사용하여 플라이휠의 하중을 지지하고, 초전도 베어링으로 안정된 부양 및

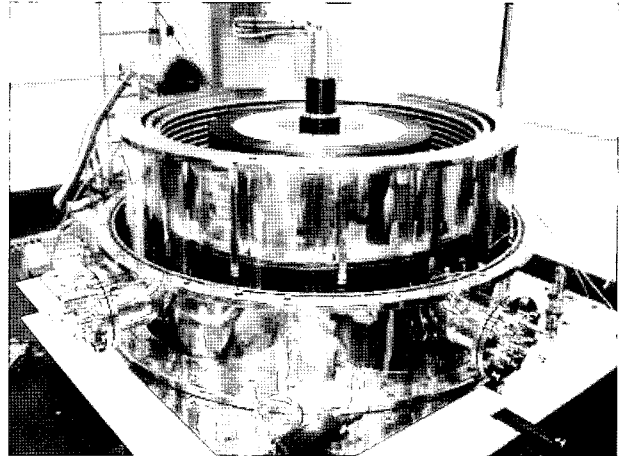


그림 5. 전력연구원에서 개발 중인 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 조립 과정

베어링의 역할을 하도록 구성되어 있어 초전도 베어링용 cryostat의 크기가 타 모델에 비하여 작고 그에 따라 열부하도 크게 감소시켜 전체 시스템의 효율을 대폭 향상시킨 것이다.

5. 초전도 플라이휠 기술의 전망

국내의 전력저장 도입 가능량을 예측하고 계획된 발전용량을 기초 데이터로 이용하면

표 1. 한국의 전력저장 도입 잠재량 및 시장규모

	시산방법	잠재도입 가능량 (만kW/만kWh)		시장규모(억원)			
		'10년	'15년	'10년	'15년	'30년	
부하평준화	대규모	중간/철두전원 설비의 5%	158	159	17,317	17,426	17,500
			1,264	1,272			
	중규모	배전용 설비의 5%	403	482	44,169	52,827	61,500
소규모	대형 냉방설비의 20%		404	444	44,278	48,662	53,000
			3,232	3,552			
peak cut	수요관리 목표의 30%		168	223	18,413	24,441	30,500
			1,344	1,784			
대체 에너지 저장	대체 에너지 설비의 50%		67.4	92.5	7,384	10,138	13,000
			539	740			
총계			1,200	1,401	131,520	153,550	175,500
			9,600	11,208			
초전도플라이휠 에너지저장 (2015년 전력저장의 10%, 2030년 30% 점유)			120	420	0	15,300	52,650
			960	3,360			
		초전도플라이휠 비용: 137,000원/kWh					



그림 4. 전력연구원내에 건설된 초전도 플라이휠 전용 회전체 시험동

전력저장 도입 잠재량 및 시장규모를 한전 내부 자료인 2015년까지의 제5차 장기 전력 수급계획과 장기 수요관리 계획에 근거하여 다음과 같이 예측하였다. 대체에너지는 2010년에 총전원설비의 2%, 2015년에 2.5%를 점유한다고 가정하였다. 이 예측에 의하면 2015년에 플라이휠 에너지 저장장치의 시장 규모는 1조 5천억원 그리고 2030년에 5조 2천억원 가량으로 될 것으로 전망된다.

이에 전력연구원에서는 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지저장장치 개발을 '05년 완료하고 향후 5년 계획으로 상업화에 근접하는 규모인 100 kWh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발에 착수할 계획이다.

참고문헌

- [1] Robert Hebner, Joseph Beno, Alan Walls, "Flywheel batteries come around again. Kinetic energy storage will propel applications ranging from railroad trains to space stations", IEEE SPECTRUM, April, 2002
- [2] Naoki Koshizuka, "Feature articles on superconducting flywheel Prospects for the development of the superconducting flywheel", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p15
- [3] Osamu Saito, "Feature articles on superconducting flywheel Technical development and prospects for ultra high-speed flywheels", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p16
- [4] Fumihiko Ishikawa, "Feature articles on superconducting flywheel Progress report on the technical development of the superconducting bearing", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p17-18
- [5] Koji Matsunaga, "Feature articles on superconducting flywheel Present status of bulk superconductors for superconducting magnetic bearing", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p19-20

저자이력

한영희(韓榮熙)

1965년 8월 1일생
1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동대학원 무기재료학과 졸업(공학석사) 현재 한전전력연구원 선임 연구원



한상철(韓相哲)

1966년 3월 26일생
1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 선임연구원



정년호(鄭年鎬)

1962년 11월 26일생
1990년 고려대학교 이과대 화학과 졸업, 1997년 동 대학원 환경 공학과 졸업(이학석사) 현재 한전전력연구원 선임연구원



성태현(成台鉉)

1959년 10월 9일생
1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사) 1991- 92년 ISTEK 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc. 현재 한전전력 연구원 수석연구원

