

초전도에너지저장(SMES) 시스템의 개발동향

성기철, 김해종, 조전욱, 권영길, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구그룹

1. 서 론

초전도 에너지 저장(SMES)시스템은 「직류전기저항이 존재하지 않는다.(완전전도성)」라는 성질을 이용한 것이다. 어떤 도체라도 상전도 상태에서는 미소한 전기저항을 가지기 때문에 전류를 흘리면 에너지는 전기저항에 의해 열에너지로 소비되지만, 초전도도체의 경우에는 전기저항이 영(0)이 되기 때문에 에너지는 소비되지 않는다. 초전도 마그네트를 충전시킨 후 PCS(permanent current switch)를 사용하여 폐회로를 만들면 전류는 영구히 계속 흐른다. 이 원리를 이용한 것이 SMES이고, 영구전류에 의한 에너지는 자기에너지의 형태로 초전도 코일에 저장되고, 그 에너지양 $E(J: \text{주울})$ 는 전류 $I(A: \text{암페어})$ 와 코일의 형상·크기 등으로 결정되는 인덕턴스($H: \text{헨리}$)에 의해 $E = \frac{1}{2} L I^2$ 이다.

이와 같은 원리를 이용하여 초전도 마그네트에 전력을 저장할 경우 저장효율이 높고, 에너지의 저장·방출을 신속히 할 수 있는 큰 특징이외에도 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 유효·무효전력을 각각 제어할 수 있다.
- 에너지저장 밀도가 높다.
- 수명이 반영구적이다.
- 환경 친화적이다.
- 응용분야가 매우 다양하다.

따라서 SMES시스템이 전력계통에 도입될 경우, 표 1[1]에서와 같이 단순히 에너지저장 측면(부하 평준화)의 기능뿐만 아니라, 전력계통의 주파수제어, 안정화와 같은 제어성능의 고도화는 물론 전력품질 향상 등과 같은 광범위한 이용이 가능한 새로운 기술이다.

표 1. SMES시스템의 용도 및 사용장소

구분	용량	용도	설치장소
Micro SMES	수MJ급	* 전력품질 보상용 - 순시전압 변동보상 - 순간정전 보상	* 중요부하 지점 * 소규모 수용가
소용량 SMES	수백MJ급	* 안정도 향상 * 전압변동 보상용 * 소규모 변동부하 평준화	* 배전용 변전소 * 분산형 전원 도입 장소 * 발전소
중용량 SMES	수십GJ급	* 변동부하 평준화 * 공급 신뢰도 향상 * 장거리 송전선 전력동요 억제	* 송전용 변전소 * 부하밀집 변전소
대용량 SMES	수TJ급	* 대형부하 평준화용 * 계통주파수 조정 설비 저감 * 순시 예비력 저감	* 대규모 발전지역 * 대규모 부하지역

SMES시스템은 현재 실용화를 향한 개발과 실증시험이 선진국을 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 특히 미국에서는 기존의 UPS가 가진 단점을 보완할 수 있는 초전도 에너지저장(SMES)시스템의 상용화개발에 성공하여 실 계통 적용시험은 물론 상품화 판매를 통해 그 효과를 인정받고 있다. 본고에서는 최근 국내외에서 진행중인 주요 개발현황을 중심으로 소개하고자 한다.

4. 국내외 연구개발 동향

SMES시스템의 연구개발 동향을 살펴보면 그림 1에서와 같이 μ SMES시스템은 이미 상용화되었으며, 중·대용량의 SMES시스템 개발을 계획하고 있는 것을 알 수 있다.

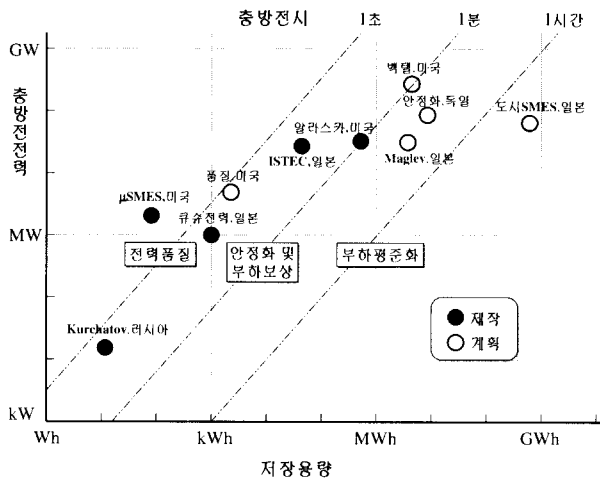


그림 1. SMES시스템의 개발현황

그러나, 중·대용량 SMES시스템 개발을 위해서는 설비의 방대함으로 인해 투자비 과중, 초대형 극저온장비 운용기술의 어려움 및 대형화에 의한 전자력의 지지의 어려움 등으로 인해 현재는 응용이 가능한 소용량부터 개발하여 실용화시키면서 여기서 개발된 기술들을 바탕으로 점진적으로 용량을 늘려가 궁극적으로는 대형화를 실현시키고자 하는 추세이다.

국내외에서 수행되고 있는 SMES시스템 연구 개발내용은 다음과 같다.

1) 미국

전력설비의 효과적인 운용 및 안정도 향상을 목표로 1971년부터 연구가 진행되고 있으며, 특히 90년대 초 Dual Use Program[2]이 PCCIE(Power Conditioning and Continuation Interfacing Equipment Material Group)에 의해 성공적으로 수행되어 현재 Oklahoma에 있는 Tinker AFB(Air Force Base)의 DISA(Defense Information Systems Agency)에 있는 Megacenter와 Florida의 Tyndall AFB 등에 군사적 목적의 μSMES시스템이 사용되고 있는 것은 물론 제지, 화학, 반도체 공장 등에서 민감한 부하를 보호하기 위해 30여대 이상의 시스템이 가동되고 있다.

■ ASC(Americal Superconductivity Co.)
 미국의 ASC사는 90년대 초 μSMES의 상용화 개발한 SI(Superconductivity Inc.)를 1998년 인수하여 아래의 그림 2에

서와 같은 μSMES시스템을 본격 공급하고 있다.

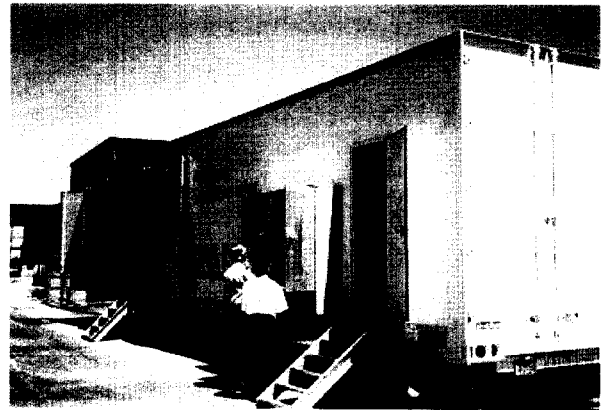


그림 μSMES 사진

이 시스템의 구성도는 그림 2와 같고, 시스템의 사양은 표 2에서와 같이 저장용량이 2.7MJ로 750kVA의 부하를 약 3초 정도 보호할 수 있다.

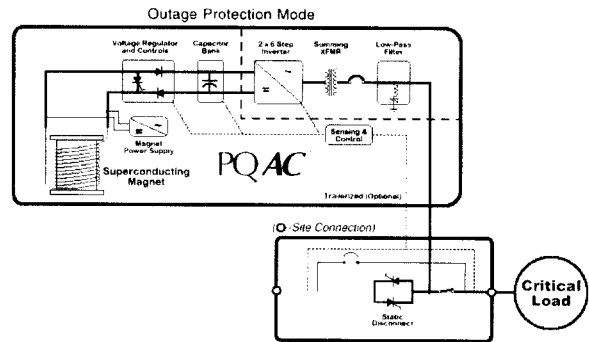


그림 2. 시스템 구성도

표 2. 시스템 사양

· 전압	400~600VAC
· 주파수	50 or 60Hz
· 운전전압	400/480VAC, 50/60Hz
· 용량	2.7MJ
· % Sag	30% ~ 70%
· 효율	>97%
· 응답시간	<5mS

■ IGC(Intermagnetics General Co.)
 미국의 IGC사는 Tyndall공군기지에 그림 3과 같은 IPQ750이라는 μSMES시스템을 공급하여 이 시스템을 운전하고 있다.

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

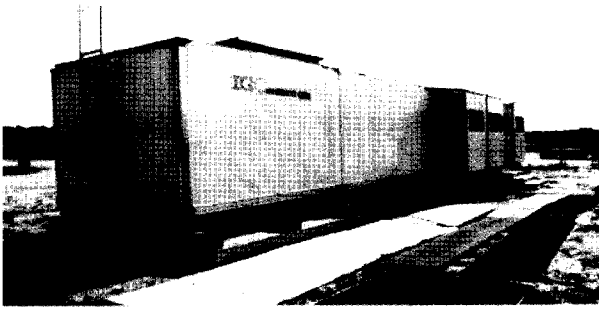


그림 3. 미국 Tyndall공군기지에 설치된 μ SMES(IPQ750)

시스템 특징(IPQ750)

- 에너지 저장용량 : 3MJ
- 590kVA를 5초 동안 공급
- 전력변환기 정격 : 750kVA
- 무게 : < 25ton

2) 일본

일본의 SMES시스템 연구는 1970년대 초부터 시작되어 현재 여러 가지 연구개발이 진행되고 있다. 관련 연구개발은 사용자인 전력회사(구주전력, 동북전력, 중부전력 및 관서전력), 제작회사(도시바, 히타치, 후루카와 및 스미토모 등), 대학(구주대학, 오오사카대학, 동북대학 및 나고야대학 등) 및 연구소(전력중앙연구소, 기업연구소) 등에서 수행되었으며, 최근 ISTE(C International Superconductivity Technology Center)은 1991년부터 National Project 일환으로 MITI's Agency of Natural Resources and Energy의 지원을 받아 소규모급인 SMES(100kWh/20MW) pilot plant를 제작하여 시험하였다.[3] 최근 구주전력에서는 1994년부터 장래 실용화의 기초기술 축적의 일환으로서 모듈형 SMES[저장에너지 : 3.6MJ(1kWh), 최대출력: 1 MW]를 개발했으며[4] 1997~1998년에 무인변전소에 설치해 전철에 의한 순간전압강하 보상용으로 전력계통 연계시험을 수행하고 있다.

■ ISTE(C International Superconductivity Technology Center)

이 프로젝트는 통산성 자원에너지청으로부터 지원을 받아, 본격적인 SMES 개발의 첫 걸음으로서 소규모 SMES pilot plant 건설에 필요한 요소기술의 확립을 위한 프로젝트

트 「초전도 전력저장시스템 요소기술 개발조사」를 '91년도~'98년도(8년간)의 계획으로 진행하여 왔으며 대학·전력회사·산업체의 공동참여로 추진되었다.

개발목표인 pilot plant의 기본사양은 표 3과 같으며, 변동부하보상과 전압안정도 향상 등의 다목적 용도의 운전을 위하여 안정성·효율·경제성·운전제어성 등의 실용성을 평가할 수 있도록 최대저장 용량은 480MJ(이용 저장용량 360MJ), 정격전류 20kA를 계획하고 있다.

표 3. Pilot Plant의 기본사양

항 목	사 양	용 도
이용저장용량	100 kWh (360MJ)	다목적 용도 · 부하변동보상 · 계통안정화 · 전압변동보상용 · 순시전압저하대응
출 력	20 MW	
최대저장용량	133 kWh (480MJ)	
정격전류	20 kA	
정격전압	2 kV	
코일형식	Toroidal 형	요소 코일수 12개

시험 요소코일(1요소코일의 1/2상당)을 제작하고(그림 4), 일본원자력연구소와 공동으로 ITER 시험장치를 이용하여 기본성능 평가시험을 실시하였으며, 그 후 미국의 로렌스 리버모어 국립연구소에서 반복 통전시험을 시행하였다.

실험결과에 의하면 Pilot Plant의 정격조건(20kA, 5.64T/4.5K)에 충분히 안정함을 확인할 수 있었고, 또 열적 안정성 이득도 830mJ로써 목표치를 상회하였다. 고속 통전성능에 있어서도 부하변동보상의 용도사양과 동일한 자장변화조건(충전시 0.13T/s, 방전시 0.18T/s)에서 Quench가 없음을 확인하였으며 20~30kA, 1000회의 반복 통전시험에서도 특성변화가 없는 등의 결과를 얻었다. 교류손실에 있어서는 코일화의 영향 때문인지 단척 도체의 결과를 이용한 계산치보다 크게 웃돌았지만 도체를 개선하여 평가한 결과, 기술적으로 문제가 없을 것으로 전망하고 있다.

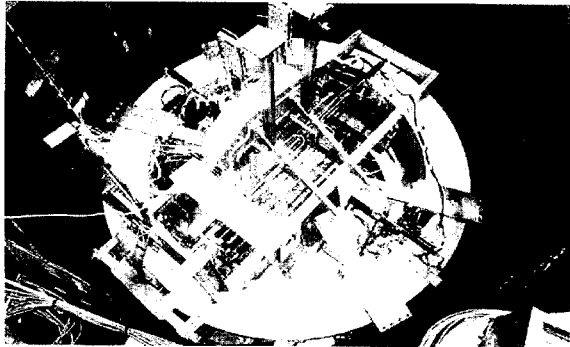


그림 4. 시제작 요소코일(외경:3.34m, 내경:2.76m, 두께:234mm)

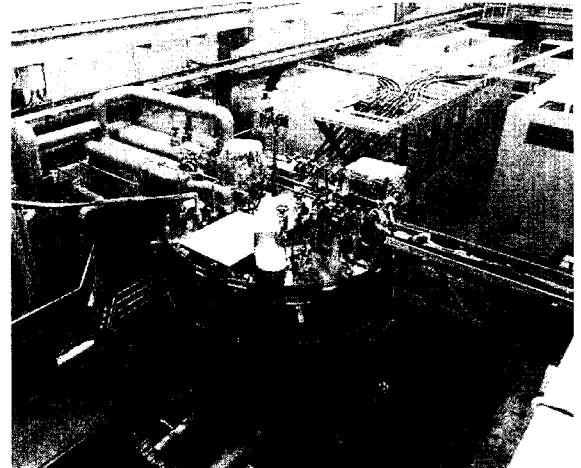


그림 5. 모델기의 전경

■ 구주전력

구주전력(주)에서는 전력계통의 안정화 증진과 변동하는 부하를 보상하기 위한 SMES시스템의 실용화 개발을 목표로 연구개발을 수행하고 있다. 실계통에 연계 가능한 소형 모델기(저장용량 1kWh/ 출력 1MW, 모듈형) 개발을 위해 94년부터 제작회사, 대학과 공동연구를 추진하고 있다. 모델기는 97년 10월에 제작을 완료, 후쿠오카 근교의 금숙(金宿)변전소 구내에 설치하고 98년 3월에 통산성 자원에너지청의 사용승인검사에 합격, 실증시험설비로써의 운용을 개시하였다.

모델기의 기본사양은 표 4와 같이 초전도 코일, 직교변환장치, 액체헬륨 냉각장치, 전류 리드 및 감시·제어장치 등의 기기들로 구성되어 있다.

표 4. 모듈기의 기본사양

최대저장 에너지	1 kWh (3.6 MJ)
최대출력	1 MW
모듈 수	2
초전도 코일	형 식 Toroidal 형 요소코일 6 (3개/모듈) 정격전압 500V(직류) 정격전류 1000A(직류) 사용선재 NbTi 연선도체
교직변환장치	방 식 전류형 자력식 정격출력 500kVA 정격전압 6000V/530V 대 수 2 사용소자 GTO사이리스터

그림 5는 모델기의 설치 전경이다.

모델기의 기본성능을 확인하기 위해 냉각 시험, 기기 조작시험, 보호장치 동작시험과 계통연계시험 등을 2개월간에 걸쳐 실시한 결과 그림 6에서와 보는 것과 같이 SMES 시스템으로 제어시 유효전력의 변동폭이 작은 것으로 나타나 부하 변동시 보상효과가 확인되었다. 현재, 변전소의 6kV 계통에 연계되어 SMES시스템의 성능과 효과를 검증·평가하기 위한 각종 시험과 운전·보수를 위한 데이터를 수집하고 있다.

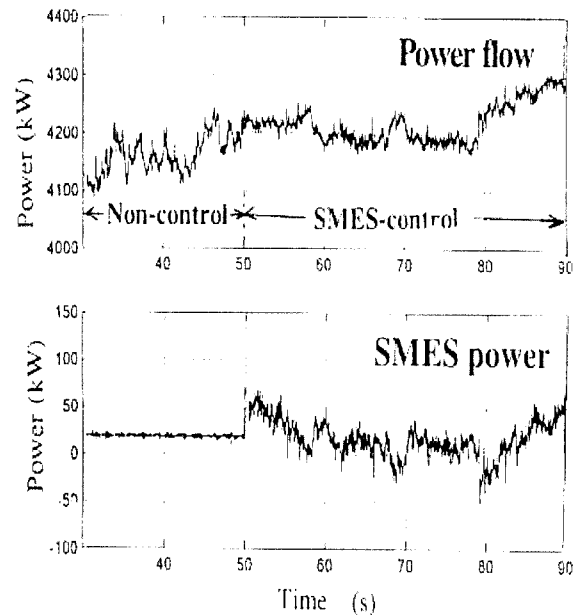


그림 6. 계통 연계시험결과 예 (부하변동보상 시험)

3) 유럽

유럽에서는 SMES시스템에 관한 개발연

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

구가 필란드, 독일, 러시아 및 스위스 등에서 수행되고 있다. 최근 오스트리아에서는 상업용 UPS(무정전 전원장치) μ SMES 시스템을 유럽 ASC로부터 공급받아 이를 운영하고 있다. 이 이외에도 이탈리아는 독자적 또는 공동 프로젝트를 검토하고 있다. 유럽에서 수행되고 있는 프로젝트를 소개하면 다음과 같다.

■ Research Centre Karlsruhe and University Karlsruhe, Germany (1996)

아주 큰 부하변동에 의해 발생하는 불안정 상태에서부터 전력계통을 보호하기 위한 고속 SMES보상기(Compensator)를 Research Centre Karlsruhe, University of Karlsruhe 및 Utility EnBW Badenwerk AG에서 개발하였다. Baden-Wuerttemberg 연방정부의 Energy Research 재단으로부터 개발비용을 제공받아 개발된 이동식 Unit는 계통측으로 80kW의 전력을 수수할 수 있다. 최대 250kJ의 저장에너지를 갖는 솔레노이드형 마그네트는 고하전공(일본)의 NbTi 복합 초전도선을 사용한 도체로 제작되었다. 1997년 Black Forest에서 3개월간 실증시험(그림 7참조) 기간 중 제지공장에서 생기는 부하변동을 보상하는데 성공하였다.(그림 8 참조) 그리고 응답속도가 빠른 SMES시스템을 Active Filter로도 사용할 수 있는 지에 대해서도 연구하고 있다.



그림 7. Black Forest(독일)의 제지공장에서 현장시험중인 SMES 보상기

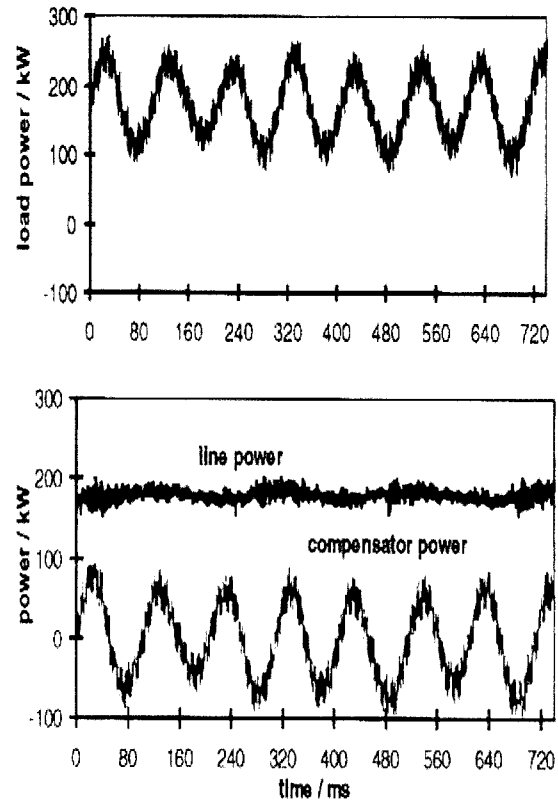


그림 8. 제지작업 중 변동부하 보상결과

현재, 이 마그네트 시스템은 10개 코일 트랜스로 개조중이며, 1999년 9월에는 다른 산업현장에서 가동에 들어갈 예정이다.

■ Tampere University of Technology, Finland(1998)

Tampere공대에서는 ASC로부터 5kJ 고온 초전도체 코일(외경:317mm, 내경:253mm, 축방향높이:67mm)을 구입하였다. 이 코일에 Tampere에서 개발된 저온시스템(그림 9참조) 및 전자시스템(160A/200V)을 연결하여 시험하였다. 소위 「Heat pipe」를 응용한 2단계 Gifford-McMahon식 냉동기(77K, 60W/20K, 8W)를 사용한 특수 냉각설계를 채용하고 있다. 즉 1개의 질소 Heat pipe는 구리로 만든 방열 Shield로 냉동기의 제 1단계를 접속하였으며 고온초전도로 만든 전류 리드선과 함께 4개의 수소 Heat pipe가 제 2단계 및 마그네트의 꼭대기 부의 저온 인터페이스를 접속한 구조이다. 이 마그네트는 가동온도 범위가 20K~30K이다.

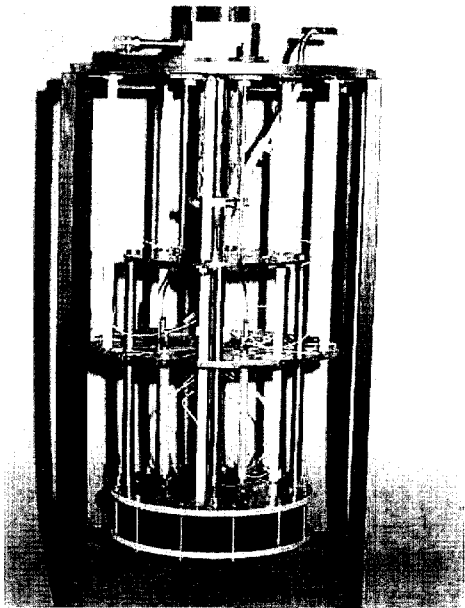


그림 9. Heat pipe를 통해 냉동기에서 냉각된 고온초전도체 SMES 마그네트



그림 10. 유럽 최초의 상업용 SMES Unit를 탑재한 Trailer 내부

■ ASC-Europe and STEWEAG, Austria(1999)

1999년 4월 ASC-Europe사는 유럽에서는 최초로 상업용 2.7MJ급 SMES시스템(그림 10참조)을 오스트리아의 전력회사인 STEWEAG사에 공급하였다. 이 시스템은 자회사인 Gleisdorf의 Austria Druckguss사에서 빈번하게 생기는 낙뢰에 의해 발생하는 전력동요에 의한 피해를 막기 위해 구입하였다. 이 회사의 주요 제조공정은 자동차 산업용 알루미늄 부품의 가압주조 공정이다. 낙뢰가 발생하면 전력동요가 수반되어 Robot 기계가 극도로 손상을 받기 때문에 생산에 막대한 차질이 있었다.

마그네트는 NbTi 초전도체로 Solenoid구조이며, 인덕턴스는 4.1H, 동작전류는 1,150A 그리고 전압은 2,500V이다. 냉각시스템은 그림 11에서와 같이 2단식 GM 재응축 장치, 고온초전도 전류리드용 냉동기 및 60K 輻射실드로 구성되어 있으며, 총 냉각능력은 13kW이다.[5]

전력은 IGBT/IGCT의 변환기에 의해 조정하며, 예로 0.77s 경우는 2MW, 2.3s 경우는 1MW를 발생시킬 수 있다.

이 시스템 설치된 이후 4월 27일 Austria Druck guess사에서 처음 낙뢰에서 정전이 발생했으나, SMES시스템이 동작했기 때문에 제조기계에는 영향이 없었다.

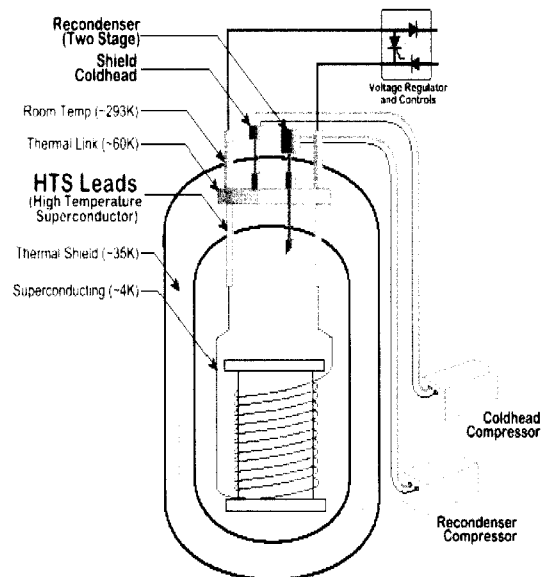


그림 11. Micro SMES 냉각시스템

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

4) 국내

우리 나라에서는 1985년 SMES시스템 연구개발이 시작되어 현재 15년밖에 되지 않았으나, μ SMES시스템 개발에 필요한 요소기술인 초전도 마그네트 설계기술과 권선 기술, 극저온 용기(Cryostat) 및 전력변환기 분야는 어느 정도는 확보되었다고 할 수 있으며, 현재 실용화 설계제작에 필요한 기술개발이 진행되고 있다.

■ 한국전력

'85년 서울대학교(현재, 기초전력공학공동 연구소)와 한전기술원 공동으로 25kJ급 SMES시스템 연구를 시작하여 전력계통 연계 운전특성 및 계통안정화 특성을 검토하였다. '88년부터 0.5MJ급 SMES시스템을 자체 설계한 후 '94년 7월 러시아에서 제작된 시스템(표 5 및 그림 12참조)을 한국전기연구소에 정격시험을 실시하였다.

표 5. 시스템 사양

· 저장에너지	0.5MJ
· 코일형태	Solenoid
· 도체	NbTi
· 운전전류	1550A
· 중심자장	3.39T
· 코일내경	400 mm
· 전류도입선	GHe 냉각형 전류도입선
· 전력변환기용량	30kVA

■ 한국전기연구소

한국전기연구소는 '89년부터 1kJ급 초전도 마그네트 개발을 시작으로, '93년에는 8Tesla급 초전도 마그네트뿐만 아니라 '96년에는 17Tesla급 고균등 자장용 초전도 마그네트를 개발하였다. '95년~'98년까지는 에너지관리공단 R&D본부로부터 자금을 지원 받아 "UPS용 SMES의 소형초전도마그네트 및 전력변환기 요소기술 개발"과제를 수행하여 UPS용 SMES개발을 위한 관련 기반기술을 확보(표 6 및 그림 13참조)하였다

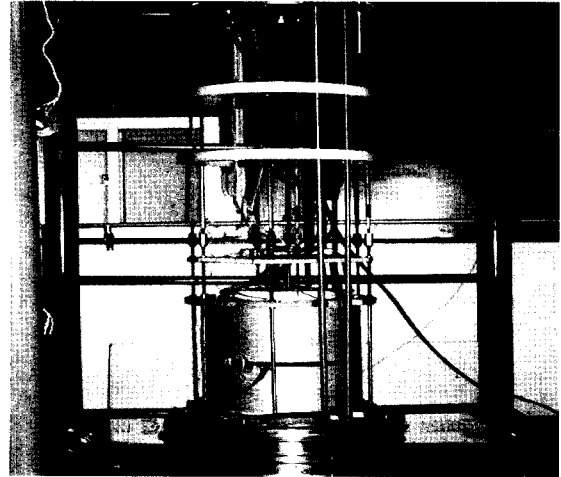


그림 12. 0.5MJ SMES

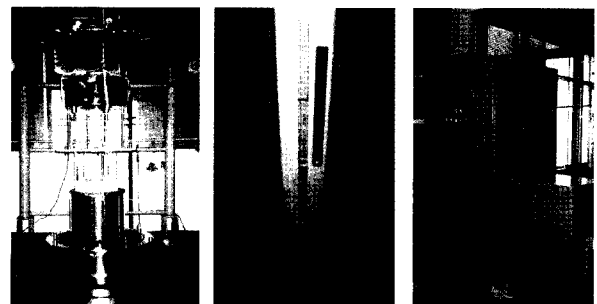
표 6. 시스템 사양

· 저장에너지	0.7MJ
· 코일형태	Solenoid
· 도체	NbTi
· 운전전류	1500A
· 최대자장	4.58T
· 코일내경, 외경	410 mm, 545 mm
· 전류도입선	HTS Bi-2223/Ag type
· 전력변환기용량	100kVA IGBT type

현재는 MJ급 초전도에너지저장시스템 상용화개발을 목표로 연구개발을 진행하고 있다.

5. 향후 전망

현재 소용량 SMES시스템의 경우는 개발에 별 문제가 없을 것으로 예상하고 있지만,



a) Magnet 및 Cryostat b) HTS 전류리드 c) 전력변환기

그림 13. 0.7MJ SMES

향후 중·대형 SMES시스템을 개발하기 위해서는 표 7과 같은 기술개발이 필요하다.

표 7. SMES시스템의 중요 기술개발 과제

- | |
|-------------------------|
| ① 초전도 코일 |
| · 저 교류손실도체의 개발 |
| · 고내전압화 |
| · 대 전류화, Quench시의 안정화기술 |
| · 전자력·단열지지구조, 누설자계 대책 |
| ② 영구전류스위치 |
| · 대전류 영구전류스위치의 개발 |
| ③ Quench 보호 |
| · 자기보호법의 개발 |
| ④ 교직변환장치 |
| · 변환기의 응답성능의 고속화 |
| · 손실저감대책, 변환기 다중화 제어기술 |
| ⑤ 시스템 기술 |
| · 최적시스템, Compact화 |

따라서 중·대형 SMES시스템을 실용화하는데까지는 아직 긴 시간을 요할 것으로 전망된다. 이러한 기술적 측면 이외에도 SMES시스템은 경쟁기술인 양수발전, 나트륨 유황(NAS)전지, 정지형 무효전력 보상장치(SVC) 등과 비교해 볼 때 아직은 고가이기 때문에 SMES를 실용화하기 위해서는 성능에 중점을 둔 개발은 물론 저 비용화를 목표로 한 요소기술 개발을 추진해야 할 필요가 있다.

한편, SMES시스템에 고온 초전도를 적용할 수 있다면 운전비용의 절감이 기대되기 때문에 상당한 매력에 있으며, 현재 고온 초전도 선재의 성능은 급속히 향상되고 있어 머지 않은 장래에 고온 초전도 SMES시스템의 실현도 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. “超傳導應用·關聯技術に關する調査研究報告書”, 에너지·情報工學研究會議, 1995.
2. Thomas R. Abel, “Micro-Superconducting Magnetic Energy Storage Technology Insertion Program”, Integrated Energy Technologies Division, 1996.
3. 山本政弘 et al., “SMESへの最新應用動

向”, OHM 6월호, 1999.

4. T. Imayoshi et al., “Development of a 1 kWh-Class Module type SMES Design Study”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, 1997.
5. W. E. Bruce et al., “The SSD: a commercial application of magnetic energy storage”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, 1993.

저자이력



성기철

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년~현재 한국전기연구원(선입연구원)



김해종

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년~1996(주)현대정공근무, 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선입연구원



조전욱

1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선입연구원

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집



권영길

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 대학원(공학석사), 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도 응용연구그룹 그룹장



류강식

1956년 8월 20일 생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 전략기술연구단 단장