

초전도 에너지저장(SMES) 시스템 기술개발 동향

성 기 철

(한국전기연구원 책임연구원)

1. 서 론

초전도 에너지 저장(SMES)시스템은 초전도마그네트에 전류를 흘려 발생하는 磁氣에너지로 전력을 저장하는 새로운 개념의 전력저장 방식이다. 즉 인덕턴스 $L[H]$ 인 초전도 마그네트에 직류전류 $I[A]$ 를 흘리면 발생하는 磁氣에너지 $LI^2/2[J]$ 를 이용하는 기술로 에너지 저장요소가 초전도마그네트이기 때문에 효율이 높고, 에너지의 저장·방출을 신속히 할 수 있는 큰 특징이외에도 다음과 같은 장점이 있다.

- 유효·무효전력을 각각 제어할 수 있다.
- 수명이 반영구적이다.
- 환경 친화적이다.

따라서 표 1에서와 같이 단순히 에너지저장 측면(부하 평균

화)의 기능뿐만 아니라, 전력계통의 주파수제어, 안정도 개선과 같은 제어성능의 고도화는 물론 전력품질 보상 등과 같이 다양한 분야에 가용할 수 있는 기술이다¹⁾.

SMES시스템은 그림 1에서와 같이 에너지를 저장하기 위한 초전도마그네트, 이를 저온으로 유지시켜 주기 위한 단열저온 용기(Cryostat), 초전도마그네트를 냉각하기 위한 냉동기 및 교류전력과 직류전력을 상호 변환시켜주기 위한 전력변환기 등으로 구성되어 있다.

현재 실용화를 향한 개발과 실증시험이 선진국을 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 특히 미국에서는 기존의 UPS가 갖고 있는 단점을 개선한 Micro-SMES의 상용화개발에 성공하여 실 계통 적용시험은 물론 상품화 판매를 통해 그 효과를 인정받고 있다. 본 고에서는 최근 국내외에서 진행중인 주요 기술개발 현황을 소개하고자 한다.

표 1. SMES시스템의 용도 및 사용장소

구 분	용 량	용 도	설치장소
Micro-SMES	수 MJ급	* 전력품질 보상용 - 순시전압 변동보상 - 순간정전 보상	* 중요부하 지점 * 소규모 수용가
소용량 SMES	수백 MJ급	* 안정도 향상 * 전압변동 보상용 * 소규모 변동부하 평준화	* 배전용 변전소 * 분산형 전원도입 장소 * 발전소
중용량 SMES	수십 GJ급	* 변동부하 평준화 * 공급 신뢰도 향상 * 장거리 송전선 전력동요 억제	* 송전용 변전소 * 부하밀집 변전소
대용량 SMES	수 TJ급	* 대형부하 평준화용 * 계통주파수 조정설비 저감 * 순시 예비력 저감	* 대규모 발전지역 * 대규모 부하지역

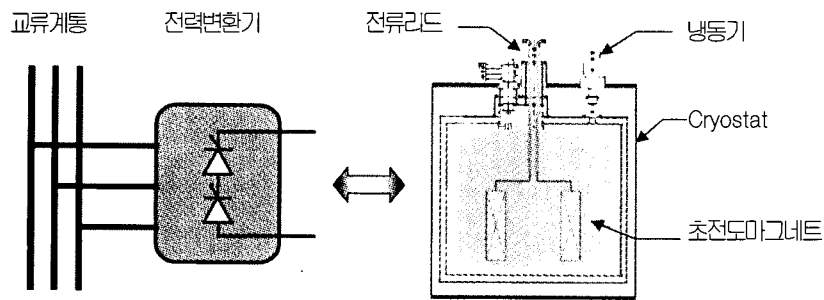


그림 1. SMES 구성도

2. 최근 주요 기술개발 현황

SMES의 연구개발 상황을 살펴보면 Micro-SMES은 이미 상용화 판매되고 있으며, 소용량 SMES는 개발중이고 중·대용량 SMES는 개념설계 단계라고 할 수 있다. 이러한 주요 원인은 궁극적으로는 대용량 SMES 기술개발이 필요하지만 이를 위해서는 설비의 방대함으로 인해 투자비 과다, 초대형 극저온장비 운용기술의 어려움 및 대형화에 의한 전자력의 지지에 어려움이 있기 때문에 현재 기술로 개발이 가능한 Micro-SMES부터 실용화시키면서 이를 통해 습득된 기술을 바탕으로 용량을 늘려가 궁극적으로는 중형 및 대형화를 실현시켜 나가는 추세라고 할 수 있다.

최근 SMES시스템 연구개발과 관련하여 국가별 기술개발 동향을 설명하면 다음과 같다.

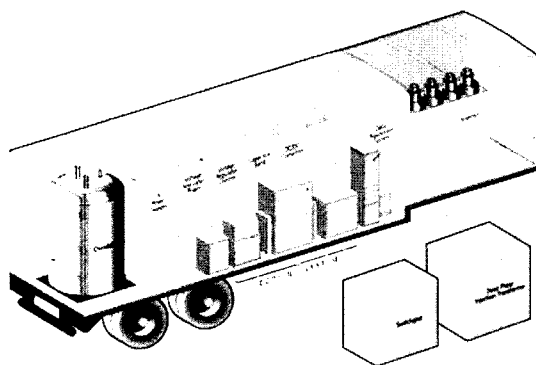
2.1 미국

전력설비의 효과적인 운용 및 안정도 향상을 목표로 1971

년부터 연구가 진행되고 있으며, 특히 90년대 초 Dual Use Program²²⁾이 PCCIE(Power Conditioning and Continuation Interfacing Equipment)그룹에 의해 성공적으로 수행되어 현재 오클라호마에 있는 Tinker AFB(Air Force Base) 및 플로리다의 Tyndall AFB 등에서 군사적 목적으로 Micro-SMES시스템이 사용되고 있는 것은 물론 90년대 초부터 현재까지 제지, 화학, 반도체 공장 등에서 중요 부하를 보호하기 위해 이 시스템이 운전되고 있다. 특히 최근에는 전력회사의 전압안정도 보상을 위한 연구개발이 진행중이다.

2.1.1 ASC(American Superconductivity Co.)

미국의 ASC사는 90년대 초 Micro-SMES를 개발한 SI(Superconductivity Inc.)를 1998년 인수하여 그림 2에서와 같은 Micro-SMES시스템을 상용화 생산하고 있다. 이 시스템은 저장용량이 2.7 MJ로 750 kVA의 부하를 약 3초 정도 보호할 수 있으며, 1 대의 트레일러로 전체시스템을 제작한 이동형이 특징이다.



• 전 압	400 ~ 600 VAC
• 주파수	50 or 60 Hz
• 운전전압	400/480VAC, 50/60Hz
• 용 량	2.7 MJ
• % Sag	30 % ~ 70 %
• 효 율	> 97%
• 응답시간	< 5mS

그림 2. ASC사의 Micro-SMES

1999년 Wisconsin Public Service Co.에서는 6대의 Micro-SMES를 자사의 배전용 115kV 전력송전 계통 내 5개 변전소에 설치(그림 3 참조)하여 전압안정성을 향상시키기 위한 연구를 진행하고 있다.

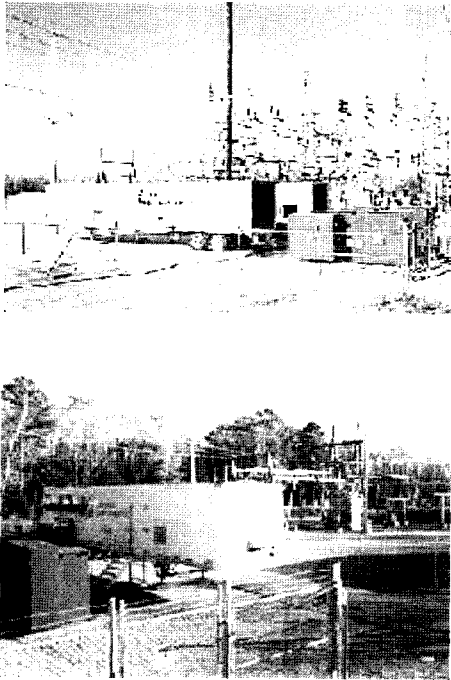


그림 3. 115kV변전소에 설치된 Micro-SMES

2.1.2 IGC(Intermagnetics General Co.)

미국의 IGC사는 Tyndall공군기지에 그림 4와 같은 IPQ750이라는 Micro-SMES시스템을 공급하였으나 최근에는 별다른 실적이 없는 것으로 파악되고 있다. 이 이유는 최

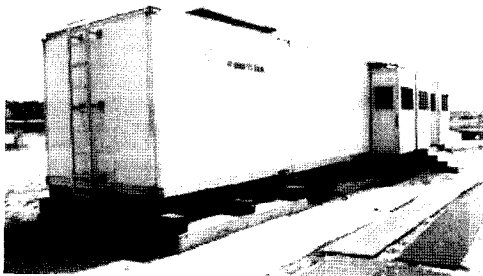


그림 4. 미국 Tyndall공군기지에 설치된 Micro-SMES(IPQ750)

근 이 회사는 이 사업보다는 MRI 및 고온초전도 응용기술 개발에 주력하고 있기 때문으로 분석된다.

2.2 일본

일본의 SMES시스템 연구는 1970년대 초부터 시작되어 다양한 연구개발이 진행되고 있다. 사용자인 전력회사(큐슈 전력, 중부전력, 동북전력 및 관서전력), 제작회사(도시바, 히타치, 후루카와 및 스미토모 등), 대학(큐슈대학, 오오사카대학, 동북대학 및 나고야대학 등) 및 연구소(전력중앙연구소, 기업연구소) 등을 중심으로 추진되고 있으며 최근 ISTE(C International Superconductivity Technology Center)은 1991년부터 국가 프로젝트의 일환으로 MITI로부터 자금을 지원 받아 소용량 SMES(100 kWh/20 MW)개발을 위한 모델코일을 제작하여 시험하였다.³³⁾ 그리고 큐슈전력에서는 1994년부터 장래 실용화의 기초기술 축적을 목표로 모듈형 SMES(저장에너지: 3.6 MJ(1 kWh), 최대출력: 1 MW)를 개발하여 1997~1998년에 무인변전소에 설치해 전철부하에 의해 발생하는 순간 전압변동을 보상하기 위한 시험연구를 수행하고 있다.³⁴⁾

2.2.1 ISTE(C International Superconductivity Technology Center)

ISTE(C)에서는 10년 이상의 장기 초대형 프로젝트로 다목적·소용량 SMES를 개발하고 있다. 이를 위한 1단계로 소규모 SMES 시스템 개발을 위하여 대학·전력회사·산업체와 공동으로 요소기술의 확립에 대한 연구개발(1991~1998년)을 수행하였다.

시험용 요소코일(요소코일의 1/2상당)을 제작하고(그림 5 참조), 일본 원자력연구소와 공동으로 ITER 시험장치를 이용하여 기본성능 평가시험을 실시하였으며, 미국 로렌스리버모어 국립연구소에서 반복 통전시험을 시행하였다.

실험결과에 따르면 설비의 정격조건(20 kA, 5.64 T/4.5

시스템 특징(IPQ750)

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

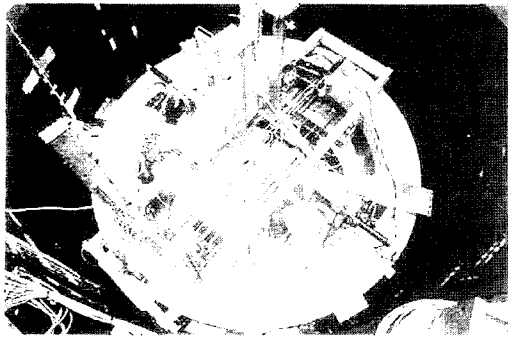


그림 5. 시제작 요소코일(외경:3.34m, 내경:2.76m, 두께:234mm)

표 2. SMES시스템 기본사양

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

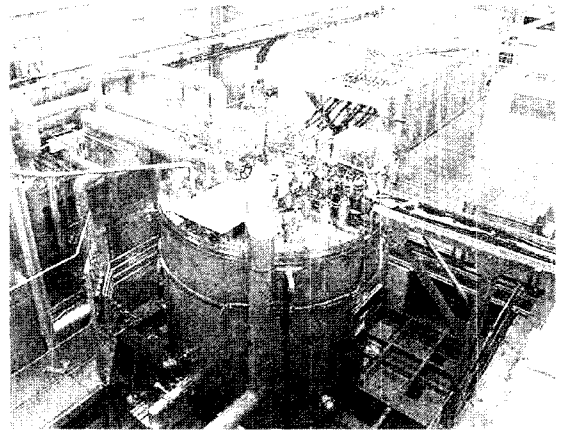
K)에 충분히 안정함을 확인할 수 있었고, 또 열적 안정성 이득도 830 MJ로써 목표치를 상회하였다. 고속 통전성능에 있어서도 부하변동 보상에 필요한 동일 자장 변화조건(충전시 0.13 T/s, 방전시 0.18 T/s)에서 Quench가 없음을 확인하였으며 20~30 kA로 1000회의 반복 통전시험에서도 특성변화가 없는 등의 우수한 결과를 얻었다.

최종 개발목표는 표 2와 같다. 즉 변동부하 보상과 전압안정도 향상 등의 다용도 운전을 위하여 안정성, 효율, 경제성 및 운전 제어성 등의 실용성을 평가할 수 있도록 최대용량은 480 MJ(저장용량 360 MJ), 정격전류 20 kA를 계획하고 있다.

2.2.2 큐슈전력

큐슈전력(주)에서는 전력계통의 안정도 향상과 변동하는 부하를 보상하기 위한 용도의 SMES 실용화 기술개발을 최종목표로 연구개발을 수행하고 있다. 이를 위한 전단계로 실 계통에 연계 가능한 소형 모델기(저장용량 1 kWh, 출력 1 MW, 모듈형) 개발을 위해 1994년부터 제작회사, 대학과 공동으로 추진하고 있다. 모델기는 97년 10월에 제작을 완료한 후 진철부하로 발생하는 전압변동을 완화시키기 위해 후쿠오카 근교의 금속(金宿)변전소 구내에 설치하였다. 이후 1998년 3월에 통산성 자원에너지청의 사용 승인검사에 합격함으로써 실증시험 설비로서의 운용을 개시하였다.

모델기의 설치전경 및 기본사양은 그림 6과 같다.



최대저장 에너지		1 kWh (3.6 MJ)
최대출력		1 MW
모듈 수		2
초 전 도 코 일	형 식	Toroidal 형
	요소코일	6 (3개/모듈)
	정격전압	500 V(직류)
	정격전류	1 kA(직류)
사용선재		NbTi 연선도체
변 환 장 치	방 식	전류형 자력식
	정격출력	500 kVA
	정격전압	60 kV/530 V
	대 수	2
	사용소자	GTO사이리스터

그림 6. 큐슈전력의 모듈형 SMES

모델기의 기본성능을 확인하기 위해 냉각시험, 기기 조작시험, 보호장치 동작시험 및 계통 연계시험 등을 2개월 간에 걸쳐 실시한 결과 그림 7에서와 같이 SMES시스템으로 제어시 유효전력의 변동을 완화시킬 수 있어 실계통 적용에 의한 효

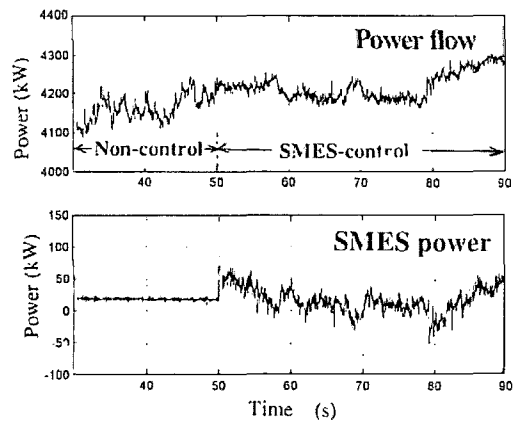


그림 7. 계통 연계시험결과 에 (부하변동 보상시험)

과가 검증되었다. 현재는 SMES시스템의 성능과 효과를 검증·평가하기 위한 각종 시험과 운전·보수를 위한 데이터를 수집하고 있다.

2.3 유럽

유럽에서는 독일, 핀란드, 러시아 및 스위스 등의 나라에서 1970년대 말부터 연구개발이 진행되어 왔다. 최근 오스트리아에서는 상업용 UPS(무정전 전원장치) Micro-SMES를 유럽 ASC로부터 공급받아 이를 운영하고 있으며, 이 이외에도 이탈리아 및 스페인에서도 독자적 또는 공동 프로젝트를 검토하고 있다. 유럽에서의 주요 프로젝트를 소개하면 다음과 같다.

2.3.1 독일

① Karlsruhe 연구센터와 Karlsruhe대학

부하변동에 의해 발생하는 불안정 상태로부터 전력계통을 보호하기 위한 고속 SMES 보상기를 Karlsruhe연구센터, Karlsruhe대학 및 전력회사인 EnBW Badenwerk AG에서 개발하였다. Baden-Wuerttemberg 연방정부의 에너지연구 재단으로부터 개발비용을 제공받아 개발된 이동식 장치는 계

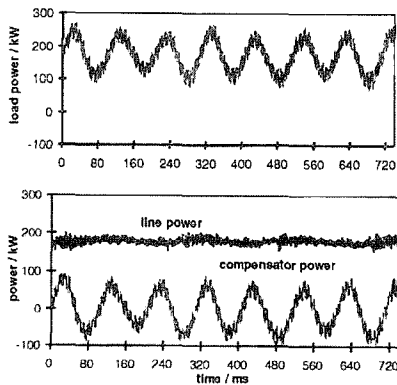
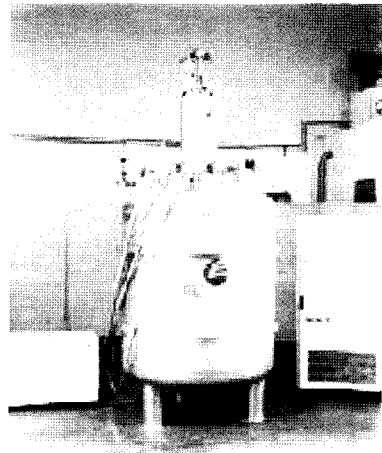


그림 8. Black Forest 제지공장의 SMES 보상기

통 측으로 80 kW의 전력을 수수할 수 있다. 최대 250 kJ의 저장에너지를 갖는 솔레노이드형 마그네트는 일본의 고하전 공에서 제작된 NbTi 복합 초전도도체를 사용하여 제작되었다. 1997년 Black Forest에서 3개월 간 실증시험 기간 중 제지공장에서 생기는 부하변동을 보상하는데 성공하였다.(그림 8 참조) 최근에는 이 시스템을 Active Filter로도 사용할 수 있는 지에 대한 연구가 진행되고 있다.

② ACCEL사

독일의 벤처기업인 ACCEL사에서는 그림 9에서와 같은 2.1 MJ 저장용량의 Micro-SMES를 개발하여 Dortmunder에 있는 수도국에서 전력품질 보상용으로 상용운전하고 있다. 이 시스템은 200 W의 부하를 8초 동안 보호할 수 있도록 설계되었으며 초전도마그네트는 NbTi 모노리스 도체를 사용하였고, 열손실을 줄이기 위해 고온초전도 전류리드를 사용하였으며 냉동기를 설치한 구조이다. 1년 이상의 현장 시험결과 액체헬륨을 refill하지 않고 현재까지 사용하고 있으며 여러 번의 전력품질 장애를 해결함으로써 보상효과를 실제 운영측면에서 검증한 좋은 예로 평가받고 있다.



SMES Current	$I_{SMES} = 1000A$
Stored Energy	2.1 MJ
Average power	200 kW
Maximum power	800 kW
Carry Over Time	>8 s
DC Link Voltage	Up to 800 V
Magnetic field	4.5T
Inductivity	4.1 H
Magnet Diameter	760 mm
Height	600 mm

그림 9. 독일 ACCEL에서 개발한 Micro-SMES

2.3.2 핀란드(Tampere University of Technology)

Tampere공대에서는 ASC로부터 5 kJ 고온 초전도체 코일 (외경:317 mm, 내경:253 mm, 축방향 높이:67 mm)을 구입하여 이 코일에 Tampere에서 개발된 저온시스템(그림 10 참조) 및 전원장치(160A/200V)를 조합하여 시험하였다. 이 시스템은 소위 히트파이프를 응용한 2단계 Gifford-McMahon식 냉동기(77 K, 60 W / 20 K, 8 W)를 사용한 특수 냉각방식을 채용하고 있다. 즉 1개의 질소 히트파이프는 구리로 만든 방열 Shield로 냉동기의 1단을 접속하였으며 고온초전도로 만든 전류리드와 함께 4 개의 수소 히트파이프가 2단 및 마그네트 상부의 저온 인터페이스에 접속된 구조이다. 이 마그네트는 가동온도 범위가 20 K ~ 30 K이다.

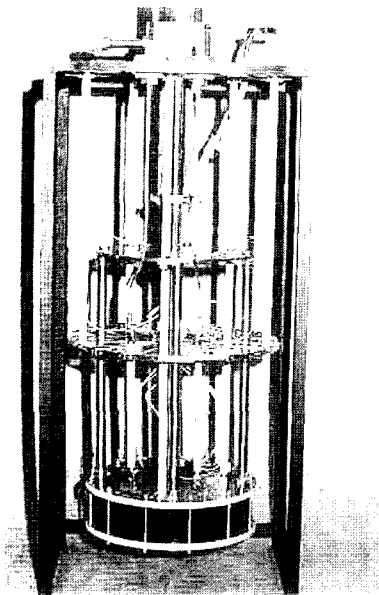


그림 10. 고온초전도 SMES 마그네트

2.3.3 오스트리아(ASC-Europe and STEWEAG)

1999년 4월 ASC-Europe사는 유럽에서는 최초로 상업용 2.7MJ급 SMES(그림 11 참조)을 오스트리아의 전력회사인 STEWEAG사에 공급하였다. 이 시스템은 자회사인 Gleisdolf의 Austria Druckguss사에서 빈번하게 발생하는 낙뢰로 인한 피해를 막기 위해 구입하였다. 이 회사의 주요 제조공정은 자동차 산업용 알루미늄 부품의 가압주조 공정으로 낙뢰 발생시 전력동요에 민감한 로봇 기계가 극도로 손상을 받기 때문에 생산에 막대한 차질이 있었다.

마그네트는 NbTi 초전도체를 사용한 솔레노이드 구조로 인덕턴스는 4.1 H, 동작전류는 1,150 A 그리고 전압은 2.5 kV 이다. 냉각시스템은 2단식 GM 재응축 장치, 고온초전도 전

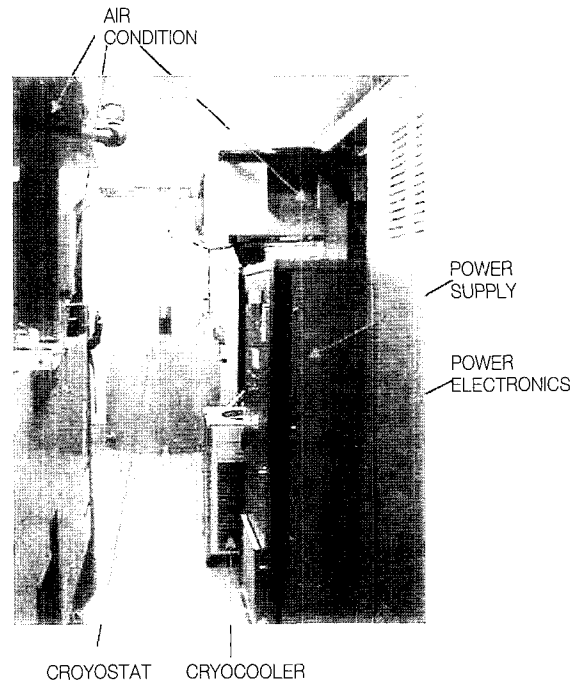


그림 11. SMES를 탑재한 트레일러 내부사진

류리드용 냉동기 및 60 K 輻射실드로 구성되어 있으며, 전체 냉각능력은 13 kW이다.¹⁵⁾

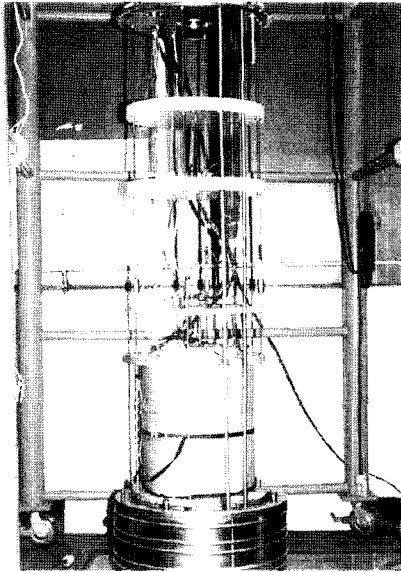
전력변환기는 IGBT/IGCT 소자를 사용하고 있으며, 2 MW의 경우는 0.77초, 1 MW의 경우는 2.3초 보상할 수 있도록 설계되었다. 이 시스템 설치된 이후 4월 27일 처음 정전이 발생했으나, SMES시스템으로 피해를 막을 수 있었으며 이후 지금까지 수 차례의 전력품질 장애에 의한 피해를 막을 수 있었다.

2.4 국내

우리나라에서는 1985년 SMES시스템 연구개발이 시작되어 현재 17년밖에 되지 않았으나, SMES 개발에 필요한 초전도 마그네트 설계기술과 권선기술, 극저온 용기(Cryostat) 및 전력변환기 등의 요소기술에 대한 연구가 꾸준히 진척되어 MJ급의 설계 및 제작에 필요한 기반기술이 확보되었다고 할 수 있으며, 현재 실용화와 관련된 기술개발이 진행되고 있다.

2.4.1 한국전력

1985년 서울대학교(현재, 기초전력공학공동연구소)와 한전기술원 공동으로 25 kJ급 SMES시스템 연구를 시작하여 전력계통 연계운전 및 계통안정화 특성을 검토하였다. 1988년부터 0.5 MJ급 SMES시스템을 자체 설계한 후 1994년 7



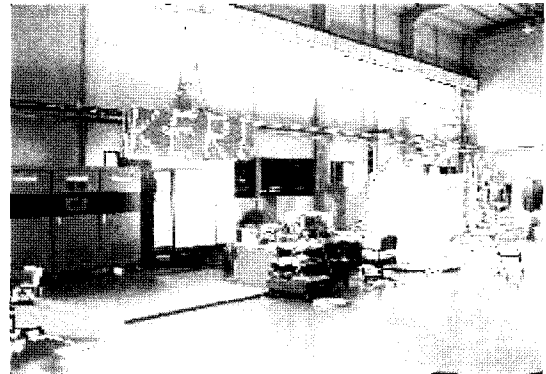
■ 저장에너지	0.5 MJ
■ 코일형태	솔레노이드
■ 도체	NbTi
■ 운전전류	1550 A
■ 중심자장	3.39 T
■ 코일내경	400 mm
■ 전류도입선	GHe 냉각형 전류리드
■ 전력변환기	30 kVA

그림 12. 0.5 MJ SMES

월 러시아에서 제작된 시스템(그림 12 참조)을 한국전기연구소에 정격시험을 실시하였다.

2.4.2 한국전기연구원

1989년부터 1 kJ급 초전도마그네트 개발을 시작으로 1993년에는 8 Tesla급 초전도 마그네트, 1996년에는 17 Tesla급 고온등 자장용 초전도 마그네트를 개발하였다. 1995년부터 1998년까지 3년 동안 SMES 개발을 위한 소형 초전도마그네트 및 전력변환기에 대한 요소기술에 대해 연구 개발이 진행되었으며, 최근 아래의 그림 13과 같은 1 MJ 급 SMES를 개발하여 특성시험을 완료하였다⁶⁾. 시험 결과, 개발된 1 MJ 초전도 에너지저장 시스템은 초전도마그네트에 저장된 에너지를 이용하여, 전압 Sag를 포함한 순간정전을 보상함은 물론 계통전류를 부하에 상관없이 역률 1로 보상할 수 있어 고조파 및 저 역률 문제를 완전히 해결할 수 있었으며, 25%이내의 전압강하나 상승도 보상할 수 있는 다기능 품질보상 장치로 손색이 없었다. 따라서 민감한 중요부하에 대



■ 저장에너지	1 MJ
■ 코일형태	솔레노이드 (외경:749mm, 높이:512mm)
■ 도체	NbTi
■ 운전전류	900 A
■ 중심자장	3.9 T
■ 전류도입선	고온초전도 전류리드
■ 전력변환기	300 kVA

그림 13. 한국전기연구소에서 개발된 1 MJ SMES

해 양질의 무정전 전원공급이 가능한 새로운 개념의 UPS 시스템을 개발하였다.

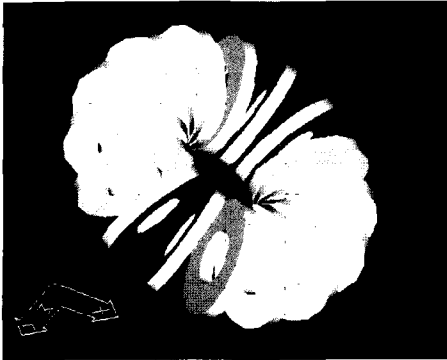
현재는 수 MJ급 SMES 상용화를 목표로 연구개발이 진행 중이다.

2.4.3 기초전력 공학공동 연구소

향후 인구 밀집지역인 수전단 부근에 설치하여 전원품질을 개선하기 위한 용도로 "200kJ 고온 초전도 에너지 저장장치에 대한 연구개발"이 진행되고 있다. 이 프로젝트는 2000년 9월부터 시작되어 2003년까지 제작을 완료하고 2004년에는 계통연계 시험을 실시할 예정이다. 아래의 그림 14에서와 같이 고온 초전도시스템에 대한 기본설계를 완료하였으며⁷⁾ 현재는 제작에 앞서 모델코일 및 냉동조에 대한 세부설계를 진행 중이다.

3. 향후 기술개발 전망

현재 소용량 SMES까지는 현재의 기술수준으로 개발 가능할 것으로 예상되고 있지만, 향후 중·대형 SMES시스템을 개발하기 위해서는 다음의 표 3에서와 같이 저 교류손실의 대용량 도체, 대용량 초전도마그네트 제작 및 보호 및 대용량 전력변환 등과 같은 기술개발이 요구되고 있다.



■ 마그네트 형태	Modular toroid
■ 코일모듈 형태	Racetrack
■ 모듈 수	16 개
■ 도체	HTS wire
■ 저장에너지	200 kJ
■ 운전전류	100~200 A
■ 동작시간	1.6sec
■ 최대전압	1kV

그림 14. 고온초전도 마그네트 (Toroid Coil)

표 3. 대형화를 위한 주요 기술개발 항목

① 초전도 코일
· 저 교류손실도체의 개발
· 고 내전압화
· 대 전류화, Quench시의 안정화기술
· 전자력 · 단열지지구조, 누설자계 대책
② 영구전류스위치
· 대전류 영구전류스위치의 개발
③ Quench 보호
· 자기보호법의 개발
④ 전력변환장치
· 변환기의 대용량화 및 고성능화
· 저손실 및 다중화 제어기술
⑤ 시스템 기술
· 최적시스템, 소형화

따라서 중·대형 SMES시스템을 실용화하는데까지는 아직도 상당한 시간이 필요할 것으로 전망된다. 그리고 이와 같은 기술적 측면 이외에도 SMES는 경쟁기술인 양수발전, 나트륨 유황(NAS)전지, 정지형 무효전력 보상장치(SVC) 등과 비교해 볼 때 아직은 가격 측면에서 고가이기 때문에 SMES를 실용화하기 위해서는 성능에 중점을 둔 개발은 물론 저비용화를 목표로 기술 개발이 추진되어야 한다.

한편, 현재 고온 초전도 선재의 성능은 급속히 향상되고 있으며 국내에서도 이에 대한 연구개발이 진행되고 있어 머지않은 장래에 비용 및 성능이 우수한 고온 초전도 SMES의 실현도 가능할 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] “超傳導應用·關聯技術に關する調査研究報告書”, エネルギー·情報工學研究會議, 1995.
- [2] Thomas R. Abel, “Micro-Super conducting 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.
- [6] 성기철 외, “민감부하 보상용 1 MJ 초전도에너지 저장 시스템 제작 및 시험”, 한국초전도·저온공학회 논문지, 3권 2호, pp. 39~43, 2001.
- [7] Song-Yop Hahn et al., “Design of 200kJ HTS SMES System”, 17th International Conference on Magnetic Technology, 2001.

〈 저 자 소 개 〉



성기철

1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사), 2002년 창원대학교 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 책임연구원. 관심분야는 초전도 에너지저장, 초전도 전력케이블 등의 초전도 전력응용 기술개발.