

# 초전도 에너지저장(SMES) 시스템 기술해설

■ 성기철 / 한국전기연구원 책임연구원

## 서론

초전도 에너지저장SMES (Superconducting Magnet Energy Storage) : 이하 SMES로 표기함.] 시스템은 초전도 마그네트에 자기(磁氣)에너지 형태로 에너지를 저장하기 때문에 효율이 높고, 에너지의 저장·방출이 매우 빠른 장점을 가지고 있으며, 이외에도 유효·무효 전력을 각각 제어할 수 있고, 수명이 반영구적이며 환경 친화적인 에너지

저장기술이다.

따라서 선진국을 중심으로 그림 1에서와 같이 실용화를 향한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.[1][2] 수백 MJ급 이상의 중·대용량 SMES의 경우는 대용량화에 따른 저손실 초전도 도체개발, 대 전류화, 대용량 영구전류 스위치, 켄치시 안정화 기술, 전자력 지지기술 개발 등의 기술적인 문제점 및 초기개발 투자비용이 많이 소요되기 때문에 아직 본격적인 기술개발이 추진되고 있지는 않지만 수 MJ급의 Micro SMES 시스템은 민감한 부하 보상용으로 90년대 초 미국에서 상용화개발에 성공하였으며, 우수성을 인정받아 많은 산업현장에서 운용되고 있다.

본 고에서는 SMES 시스템의 개요 및 시스템에 필요한 세부기술들에 대해 살펴보고 향

후전망을 소개하고자 한다.

## 개요

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, 초전도 도체의 경우는 전기저항이 영(0)이 되기 때문에 에너지는 소비되지 않는다. 초전도 마그네트를 충전시킨 후 PCS (Permanent Current Switch)를 사용하여 폐회로를 만들면 전류는 영구히 계속 흐르게 된다. 에너지는 영구전류에 의해 자기에너지의 형태로 초전도 코일에 저장되고, 그 에너지 양  $W[J]$ 는 전류  $I[A]$ 와 코일의 형상·크기 등으로 결정되는 인덕턴스  $L[H]$ 에 의해  $W = 1/2LI^2$ 로 나타낼 수 있다.

SMES 시스템은 그림 2에서와 같이 에너지를 저장하기 위한 초전도

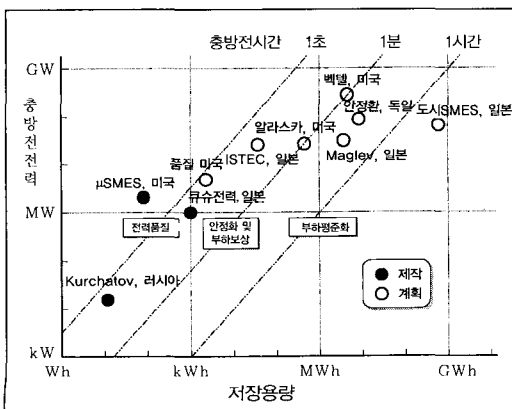


그림 1 SMES 시스템의 개발현황

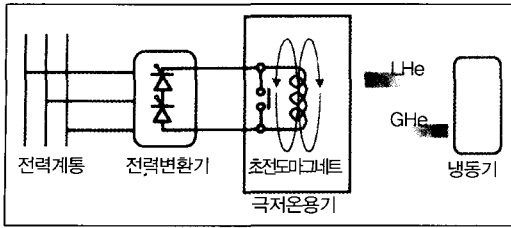


그림 2 SMES 시스템의 구성도

마그네트, 마그네트에 에너지를 수수하기 위한 전류리드, 극저온을 유지시켜주기 위한 극저온 용기 그리고 에너지를 충·방전하기 위한 전력변환기로 구성되어 있다.

모드, 초전도 마그네트에 에너지 저장완료 후 대기모드 및 계통에 문제점 발생 시 부하를 보상하기 위한 방전모드의 3가지 운전모드를 통해 동작이 이루어진다.

SMES 시스템은 표 1에서와 여러 가지 세부기술로 나눌 수 있으며 시스템을 개발하기 위해서는 각각의 세부기술들에 대한 요소기술 개발이 선행되어야 한다.

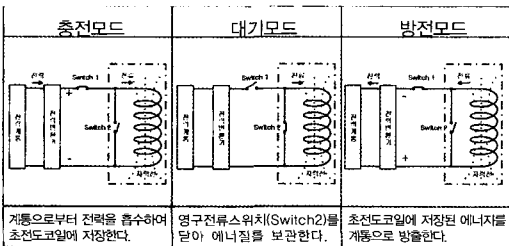


그림 3 SMES 시스템의 동작원리도

SMES 시스템은 그림 3에서와 같이 교류 전력을 저장하기 위한 충전에서 운전된다고 할 수 있다. 즉

### SMES 기술

가. 초전도 마그네트  
SMES용 초전도 마그네트는 수백 [A/mm<sup>2</sup>] 인 고 전류밀도의 급격한 펄스모드 및 고장 하에서 운전되기 때문에 일반적인 초전도

SMES용 초전도도체는 대전류 통전 특성은 물론 펄스 운전조건에 부합하는 도체특성이 요구된다. 따라서 일반적으로 SMES 마그네트 제작에 적합한 초전도 선은 그림 4와 같이 교류손실을 저감하기 위해 그 단면 중심부에 있는 다량의 안정화재 즉 동(Cu)을 고저항의 CuNi장벽으로 에워싸고, 그 외부에 NbTi 초전도체를 배열시킨 극세 다심구조의 초전도 선재가 사용되고 있다.

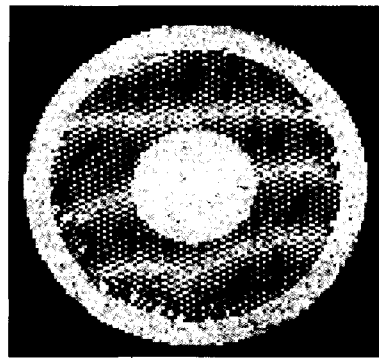


그림 4 극세 다심선(NbTi)

표 1 SMES 시스템 요소기술

세부기술	요소기술	내용
초전도 마그네트	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 도체의 안정성 평가기술</li> <li>· 저손실형 보빈 설계</li> <li>· 최적권선 장력 산출</li> <li>· 냉각채널용 spacer 설계</li> <li>· 마그네트 최적설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 안정성 평가에 의한 적정운전</li> <li>· 교류손실 저감</li> <li>· 전자기력 및 열수축 해석기술</li> <li>· 도체량이 최소인 설계제작 기술</li> </ul>
극저온 용기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 와전류 손실 저감</li> <li>· 저침입열 단열지지 구조</li> <li>· 냉도기부착 구조/열해석</li> <li>· Closed loop형 냉각방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 솔릿형으로 와전류 저감</li> <li>· 진공층 및 초단열재의 설계</li> <li>· Closed loop 냉각계 설계/제작</li> </ul>
고온초전도 전류리드	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 저손실 전류리드</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 비저항이 작고 열전도율이 작은 전류리드 설계제작 기술</li> </ul>
전력변환기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적정 토폴로지 설계기술</li> <li>· 적정 제어방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전압형 컨버터, 초퍼, 충전기 설계 제작 기술</li> <li>· 제어기 설계제작 기술</li> </ul>

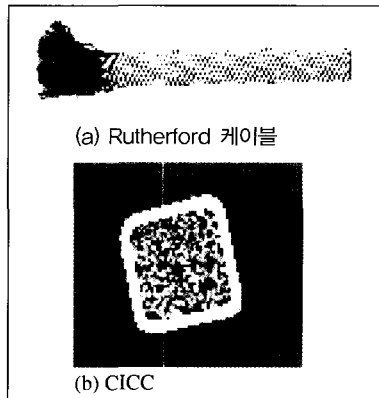





그림 5 SMES용 집합 도체방식

한편 SMES에 사용되는 도체방식으로는 보다 큰 대전류를 흘려야 하기 때문에 그림 5에서와 같이 극세 다심선을 집합으로 연선

표 2 SMES용 초전도 마그네트의 종류

마그네트 방식	구조도	용도
솔레노이드		소용량 SMES
토로이달		중·대용량 SMES
멀티플 솔레노이드		중·대용량 SMES

(cabling) 한 Rutherford 케이블과 외부 금속 자켓으로 싸여져 있는 CICC(Cable in conduit conductor) 가 사용되고 있다.

SMES용 초전도 마그네트는 표 2 에서와 같이 소형급에서 사용되는 솔레노이드 방식, 중·대용량급에서 사용되는 토로이달 및 멀티플 솔레노이드 등 방식이 다양하며, 초전도 마그네트는 안정운전을 위해 권선의 지지구조, 냉각방식 등에 세심한 주의를 기울여 설계·제작되어야 한다.

나. 극저온 용기

극저온 용기는 극저온을 유지하기 위한 장치로서 대기 중에 노출된 상태로 극저온을 유지하기 위해서는 단열기술이 매우 중요하다. 즉, 아래의 그림 6은 재응축용 냉동기를 부착한 형태의 극저온 용기를 나타낸 그림으로, 단열을 위해서는 고진공에 의한 열절연기술은 기본이고 극저온 용기 내부에 열절연조와 MLI(Multi-Layer Insulation) 등을 설치하여 복사에 의한 침입열을 최소화하여야 한다. 이를 위해서는 액체질

소나 극저온 냉동기로 냉각하여 열절연조의 온도를 수십 K 정도로 유지하여야 한다.

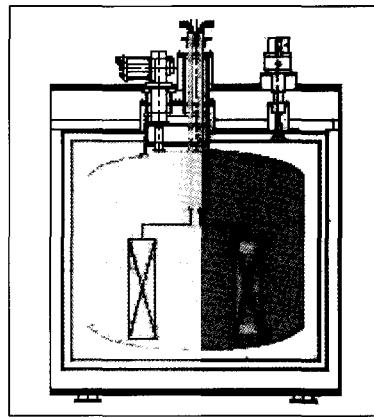


그림 6 극저온 용기

일반적으로 극저온 용기에 작용하는 열침입 경로는 매우 복잡하므로 이를 간단히 설명하면 다음과 같다.

■ 전도 열전달 (conduction heat transfer)

내부의 부품들을 지지하고 있는 각종지지 구조물들은 극저온의 내부 부품들과 대기 중에 노출된 외부용

기를 모두 접촉하고 있으므로 이를 통한 열침입과 초전도 코일에 전류를 인가하기 위해 외부에서 들어오는 전류리드를 통한 열전달로 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$Q_s = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (1)$$

여기서 T1, T2는 구조재 양단의 온도, λ(T)는 온도가 T인 구조재의 전도 열전달율로서 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 위 식의 적분은 λ-T 곡선의 면적으로부터 구해진다. 이 식에서 열전달량을 줄이려면 열전달되는 구조재의 단면적은 줄이고 길이는 최대한 길게하고 전도열전달율 λ가 적은 물질을 선택하는 것이 중요하다.

■ 대류열전달(convection heat transfer)

극저온 용기 내부에 공기 등과 같은 기체가 존재하면 온도차에 의한 대류가 발생하여 극저온의 내부용기(헬륨조)와 대기 중에 노출된 외부용기(진공조) 사이에 열전달이 발생하기 때문에 극저온 용기 내부를 10-5 [torr] 이하의 진공으로 유지하는 진공단열을 사용하면 기체의 밀도가 낮아 대류운동에 의한 열전달을 최소화 할 수 있다.

■ 복사열전달(radiation heat transfer)

극저온으로 유지되는 내부 부품들(4.2[K] ~ 80[K])과 대기 중(300[K])에 노출된 극저온 용기와 외부용기 사이에서 발생하며 극저온 용기에서 가장 지배적인 열침입 경

로이다. 극저온 용기에서의 복사열은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \sigma \epsilon F A (T_{surface1}^4 - T_{surface2}^4) \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann constant,  $\epsilon$ 은 emissivity, F는 view factor이다.

**다. 고온 초전도 전류리드**

전류리드란 상온부에 위치한 전원측과 저온부의 초전도 마그네트를 전기적으로 연결하는 부분으로 초전도 마그네트의 충방전 전류는 매우 크기 때문에 기존의 도체를 사용하면 단면적이 커질 수밖에 없으나, 단면적이 증가하면 전도에 의한 열침입이 많아져 문제가 되고 있다. 이에 대한 대책으로 열전도도가 구리에 비하여 아주 낮은 고온초전도체인 YBCO, BSCCO 벌크를 사용한 고온 초전도 전류리드에 대한 연구개발이 꾸준히 진행되어 현재는 표 3에서와 같이 많은 제품이 개발 판매되고 있다.

고온초전도 전류리드는 벌크 로드 형태의 세라믹초전도체를 이용하는 것과 금속매트릭스의 초전도복합체의 두 가지로 나눌 수 있다. 벌크형

리드의 장점은 세라믹이 본질적으로 열전도도가 아주 낮다는 특징을 이용하는 것으로 아주 짧게 만들어도 시스템에 적용하기 쉽다는 것이다. 반면에 설치나 동작 중, 그리고 온도변화에 의하여 부서지기 쉽고 세라믹초전도체와 금속 부분을 낮은 저항을 유지한 채 접속하는 것이 어렵다는 것이다. 금속 매트릭스형 복합체리드는 기본적으로 PIT법으로 만든 BSCCO 테이프 선재와 순은 매트릭스 대신에 열전도도가 낮은 금속이나 합금을 사용하는 것이다. 이 방식은 기계적으로 튼튼하고 온도변화에 강하며 그리고 매우 낮은 접촉저항을 이룰 수 있는 것이 장점이나, 매트릭스 금속이 열전도도가 다소 높다는 단점을 갖고 있으므로 벌크리드 만큼의 열 침입을 허용하기 위해서는 길이를 길게 하여

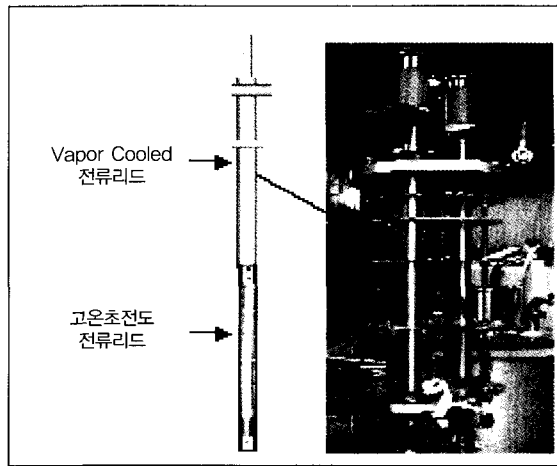


그림 7 Hybrid형 전류리드

야 한다. 따라서 용도에 맞도록 사용되어야 한다.

실제로는 그림 7에서와 같이 가스냉각(Vapor cooled)형 구리리드와 HTS 전류리드를 함께 사용하는 hybrid형 전류리드가 일반적으로 많이 사용되며, 이때 전류리드의 열손실을 줄이기 위한 형상 최적화 설계가 매우 중요하다.

**라. 전력변환기**

전력변환기는 초전도 마그네트에 에너지를 충·방전하기 위한 것으로 SMES 시스템의 특성을 결정 짓는 중요한 분야이다. 초전도 마그네트에 에너지를 저장하고, 또 저장된 에너지를 이용하여 전력계통에 에너지를 수수하기 위해서는 적절한 전력변환기의 선정이 필수적이다. 전력변환기는 전력회로가 단순하고, 고효율이어야 하며, 제어가 용이해야 한다. 일반적으로 SMES용 전력변환기는 병렬형과 직렬형이 사용되고 있으며 최근에는 이 두 방식의 단점을 보완

표 3 고온초전도 전류리드 개발현황

제작사	형 태	재 료	적용분야
Furukawa	Bulk	YBCO	Power Cable
Kobe steel	Bulk	Bi-2223	LTS Magnets
Fuji electric	Bulk	Bi-2223	SMES
Mitsubishi	Bulk	Bi-2223	LTS Magnets
Toshiba	Bulk	Bi-2212	LTS Magnets
Sumitomo/Super Gm	Bulk	Bi-2212	LTS Magnets
Sumitomo electric	Metalic	Bi-2223	SMES, SR Ring
Showa wire and cable	Bulk	Bi-2223	LTS Magnets
Hoechst	Bulk	Bi-2212	LTS Magnets

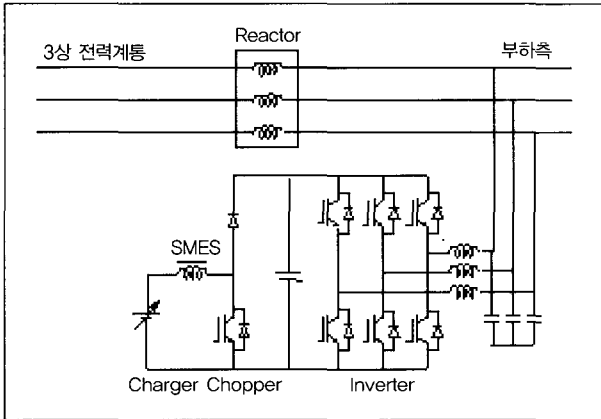


그림 8 병렬형 전력변환기

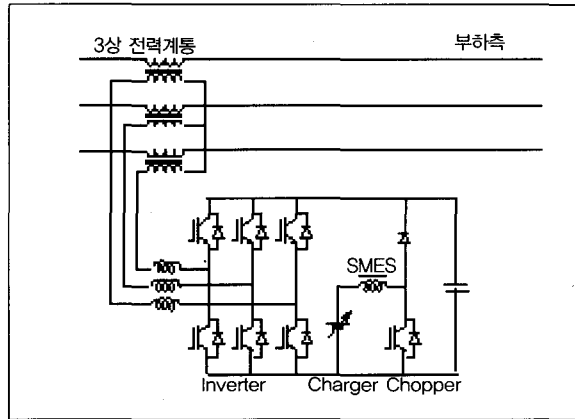


그림 9 직렬형 전력변환기

한 직병렬형이 제안되고 있다.

■ 병렬형 전력변환기

병렬형 전력변환기는 3상 인버터가 계통라인에 병렬로 붙는 구조로 그 구성은 그림 8과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 3상 인버터가 계통에 병렬로 접속되며, SMES에 에너지를 충전하기 위한 충전기와 저장된 에너지를 방전하는 직류초퍼가 DC-link 단에 붙는다. 그리고 순간정전이 발생할 시에 전류를 제한 시켜주기 위한 리액터가 계통에 직렬로 삽입이 된다. 이 구조에서는 충전기가 SMES에 에너지를 충전하면 SMES의 저장 에너지는 다이오드와 IGBT를 통해서 환류하고, 인버터는 계통의 고조파전류를 보상해주는 역할을 한다. 그러나 순간정전은 아니지만 계통전압이 낮거나 높을 경우에는 이를 보상하기 위해서 출력전압의 위상을 입력전압에 비해서 위상차를 두어야 하기 때문에 근본적으로 역률이 좋지 않은 단점을 갖는다. 그리고 순간정전 발생시에도 계통이 단락되는 경우에는 출력이 직

접연결이 되기 때문에 출력전압을 유지하기가 쉽지 않다. 반면에 계통이 개방되는 정전은 아주 쉽게 보상을 할 수 있다.

■ 직렬형 전력변환기

직렬형 변환기는 3상 인버터가 계통라인에 직렬로 삽입되는 구조이며, 그 구성은 그림 9와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 3상 인버터가 계통에 변압기를 통해서 직렬로 접속되며, SMES에 에너지를 충전하는 충전기와 방전용 초퍼의 구조 및 기능은 병렬 보상형과 같다. 병렬 보상형과 달리 계통전압이 낮거나 높을 경우에 또는 계통전압이 불균형이 될 때에도 필요한 전압을 직접 삽입함으로써 완벽하게 보상을 할 수 있고, 계통이 단락이 되는 순간정전이 발생하는 경우에도 완벽하게 보상을 할

수 있다. 그러나 계통라인이 개방되는 정전에는 보상할 방법이 없다. 따라서 계통에 흐르는 전류고조파나 역률보상도 불가능한 단점을 갖는다.

■ 직병렬형 전력변환기

최근 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 직병렬형 전력변환기가 제안되고 있다. 이 구조는 그림 10에서와 같이 직렬형과 병렬형을 조합한 구조이다.

이 방식은 2개의 인버터를 하나는 계통라인과 직렬로 하나는 병렬로 연결하는 구조로 직렬형 인버터와

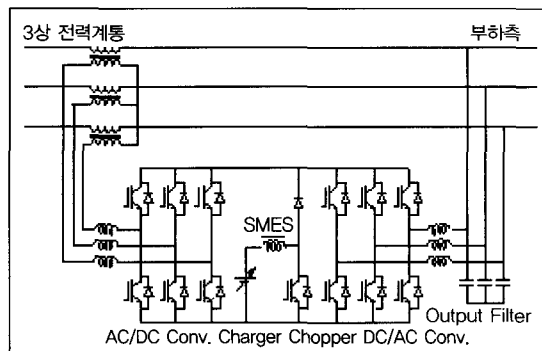


그림 10 직병렬형 전력변환기

병렬형 인버터 사이 DC-link단에 C와 충전기 및 방전용 초퍼가 붙게 된다. 이 방식은 계통전압의 변화에 곧바로 대응하여 출력전압을 일정하게 유지해줄 뿐만 아니라 계통라인을 흐르는 전류를 항상 역률 1로 만들어 준다. 자세히 살펴보면, 직렬 보상기는 계통라인의 전류를 직접 제어해 주기 때문에 어떤 부하전류에 대해서도 계통라인 전류를 역률 1인 정현파로 만들어 줄 수 있다. 한편, 병렬 보상기는 계통전압에 상관없이 출력전압을 언제나 일정하게 유지시켜 준다. 따라서 계통전압에 순간전압강하가 있다거나 완전히 정전이 된다 하더라도 직렬보상기가 하나의 전류원으로 보이기 때문에 출력전압은 항상 일정하게 유지시킬 수 있다. 정전의 종류에 있어서도 단락형 정전이든 오픈형 정전이든 간단하게 보상이 가능한 장점을 갖는다. 직렬 보상기의 역할이 서로 바뀌어 직렬보상기로 전압보상을 병렬보상기로 전류보상을 할 수도 있다.

**향후 전망**

우리나라에서는 1985년 SMES 시스템 연구개발이 시작되어 불과 20년이 안되었으나, SMES 개발에 필요한 초전도 마그네트 설계기술과 권선기술, 극저온 용기 및 전력변환기 등의 요소기술에 대한 연구가 꾸준히 진척되어 MJ급의 설계 및 제작에 필요한 기본기술이 확보되었다고 할 수 있으며, 현재 실용화와 관련된 기술개발이 꾸준히 진행되고 있어 몇 년 내에 상용화가 가능할 것으로 예상된다.

현재 소용량 SMES까지는 현재의 기술수준으로 개발 가능할 것으로 예상되고 있지만, 향후 중·대형 SMES 시스템을 개발하기 위해서는 다음의 표 4에서와 같이 저교류손실의 대용량 도체, 대용량 초전도 마그네트 제작 및 보호 및 대용량 전력변환 등과 같은 기술개발이 필요하다.

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

그리고 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 예상된다.

**[참고문헌]**

[1] 성기철, 김해중, 조전욱, 권영길, 류강식 “초전도 에너지저장(SMES) 시스템의 개발동향” 초전도와 저온공학, Vol.

표 4 대형화를 위한 주요 기술개발 항목

기술명	기술개발 내용
초전도 마그네트	▶ 저 교류손실도체의 개발 ▶ 고 내전압화 ▶ 대 전류화, Quench시의 안정화 기술 ▶ 전자력 단열 지지구조, 누설자계 대책
전력변환기	▶ 변환기의 대용량화 및 고성능화 ▶ 저손실 및 다중화 제어기술
주변기술	▶ 대전류 영구전류스위치의 개발 ▶ Quench 보호 자기보호법의 개발
시스템 기술	▶ 최적시스템화기술, 최적운전기술

2, No. 1, pp. 10 - 18, 2000.

[2] K.P.Juengst, P.Komarek, W.Maurer, “Use of Superconductivity in Energy Storage”, Proc. of IEA Symposium, World Scientific Publishing Co., 1995.

[3] 김해중, 성기철, 조전욱, 이연용, 권영길, 류강식, 류경우, “μSMES 마그네트용 Model coil의 제작 및 특성시험”, 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 89 - 91, 2001.

[3] K. C. Seong, H. J. Kim, S. W. Kim, J. W. Cho, Y. K. Kwon, S. R. Hahn, H. J. Jeon and I. K. Yu, “Design and Test of a 1 MJ SMES System.”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 391-394, March 2002.

[4] K.C. Seong, H.J. Kim, S.W. Kim, J.W. Cho, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, I.K. Yu and S.Y. Hahn, “Current status of SMES in Korea.”, Cryogenics, Vol. 42, Issue 6-7, pp. 351-355, June 2002.