

1MJ급 초전도에너지저장시스템 제작 및 평가

김해중, 성기철, 조전욱, 김석환, 배준한, 이안용, 권영길, 류경우*
한국전기연구원, *전남대학교

Test and Fabrication of the 1MJ Superconducting Magnetic Energy Storage System

H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, S.W. Kim, J.H. Bae, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, K. Ryu*
KERI, *Chonnam National Univ.

Abstract - For several decades researches and developments on superconducting magnetic energy storage (SMES) system have been done for efficient electric power management. Korea Electrotechnology Research Institute(KERI) have developed of a 1MJ, 300kVA SMES System for improving power quality in sensitive electric loads. We developed the code for design of a SMES magnet, which could find the parameters of the SMES magnet having minimum amount of superconductors for the same stored energy, and designed the 1MJ SMES magnet by using it. This paper describes the design, fabrication and experimental results for the SMES magnet, cryostat, HTS current lead and power converter.

표 1에 나타내었다.

Cable	Width	10.15mm
	Thickness	1.15 mm
	Number of strands	30
	Transposition pitch	55 mm
	Transposition direction	Left
Insulation		Kapton
Strand	Diameter	0.648 mm
	Cu/NbTi Ratio	1.85/1
	Filament diameter	6 μ m
	No. of filaments	4182

1. 서 론

민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력을 공급할 목적으로 수 십년 동안 초전도에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구 및 개발이 되어왔다. SMES장치는 전력 품질을 제어하기 위한 작은 규모의 SMES로부터 부하 평준화를 목적으로 하는 저장용량이 수 천 MWh급의 대용량 SMES 장치에 이르기까지 다양하다. SMES장치는 단순히 에너지저장 측면(부하 평준화)의 기능뿐만 아니라, 계통의 주파수 및 안정화제어와 같은 여러 가지 용도로 활용할 수 있는 새로운 기술로, 최근 수 MJ급 저장용량의 장치가 상용화되어 운영되고 있다. 이러한 SMES 장치는 에너지를 저장하기 위한 초전도 마그네트, 극저온을 유지시켜 주기 위한 Cryostat, 상온부와 초전도마그네트를 연결하여 대전류를 통전하기 위한 전류리드 및 계통과 에너지를 수수하기 위한 전력변환기로 구성되어있다. 본 논문에서는 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력 공급을 목적으로 하는 저장용량이 1 MJ급의 SMES장치를 설계·제작하였으며, 각종 핵심 기술에 대한 개발내용 및 평가 결과를 소개한다.

1MJ의 에너지저장용량을 갖는 초전도마그네트의 최적 설계를 위해 이미 검증된 설계프로그램을 활용하여 최적 설계를 했다. 본 연구에서 코일의 설계 기준은 원하는 저장에너지를 만족하면서도 도체의 사용량을 최소화하는 개념을 기준으로 설계형상을 결정했다. 그리고 마그네트의 안정성을 위해 초전도도체의 회복전류 실험한 결과를 바탕으로 운전 전류를 설정했으며, 회복전류실험에서도 알 수 있듯이 초전도도체는 동시에 무관하게 냉각에 대한 의존함을 알 수 있다[1-2].

따라서 이러한 모든 조건을 만족하면서 SMES 마그네트의 가격 요소 중 중요한 도체량을 최소로 하는 1MJ SMES 마그네트를 설계 및 제작하였다. 그림 1에서 보는바와 같이 1MJ SMES 마그네트의 높이는 512.5mm이며 내·외경은 각각 535.5mm 와 749.5mm 이다. 또한 전류리드의 효과적인 인출을 위해 충수를 짝수 층인 48층으로 했으며 설계된 마그네트의 최대자장은 3.93T 이고, 도체 소요량은 약 4850m이며, 운전전류 900A에서 저장에너지는 1MJ이다.

2. 본 론

2.1 도체 및 마그네트

SMES용 초전도 마그네트는 수백 A/mm²인 고 전류밀도의 급격한 펄스모드 및 고 자장 하에서 운전되기 때문에 보통의 초전도 마그네트에 비해 매우 가혹한 조건에서 운전된다고 할 수 있다. 따라서 SMES용 초전도도체는 대전류 통전특성은 물론 Pulse운전조건에 부합하는 도체 특성이 요구된다. 1MJ SMES 마그네트용으로 선정된 도체는 기술한 대로 이미 소선에 대한 특성시험을 마쳤으며 GEC Alstom사의 직경 0.648 mm인 30본의 초전도소선을 케이블화시킨 폭 10.25mm, 두께 1.25 mm의 초전도케이블을 선정했으며 중요한 사양은

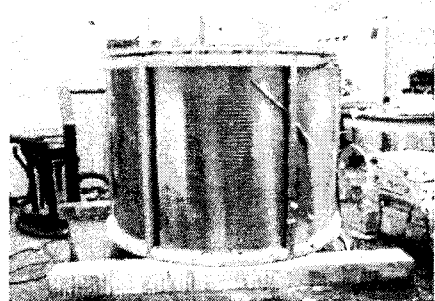


그림 1. 1 MJ SMES 마그네트

2.2 전력변환기

전력변환기는 계통에서 발생하는 순간정전이나 각종 왜란을 보상하기 위한 장치로서 SMES 장치를 구성함에 있어서 중요한 부분을 차지한다. 따라서 계통라인에 발생하는 순간적인 전압Sag 보상, 전압 상승/강하보상, 고조파 전류 및 역률보상 등의 기능을 갖도록 전력변환기를 설계 및 제작하였으며, 세부사양은 다음 표 2와 같다.

표 2. 300kVA 전력변환기 주요사양

계통전압	3상 380V ± 20%
출력전압	3상 380V
출력전력	300kVA
출력전압 고조파	3% 이내
입력전류 고조파	5% 이내
On-line 효율	96% 이상
순간정전보상	3초까지
Charging	0 ~ 20A/sec

그림 2는 제작된 300kVA 전력변환기로서 순간정전 보상을 위해서 직렬 병렬 보상방식을 채택했기 때문에 기본적으로 2개의 인버터가 각각 계통에 직렬과 병렬로 부착되었으며, Quench Protector는 방전저항과 MC 스위치로 구성되어 SMES 마그네트에 Quench가 발생했을 때에 저장된 에너지를 빨리 방전시켜 SMES 마그네트를 보호하도록 구성되어있다[3].

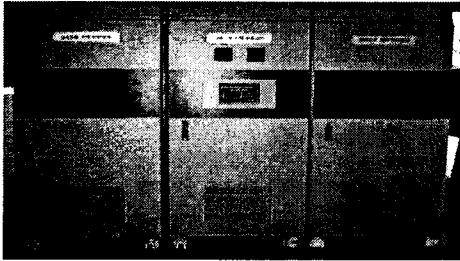


그림 2. 300kVA 전력변환기

2.3 Cryostat

상용화된 SMES 장치는 이동형으로서 초전도마그네트의 안정적 운전과 액체헬륨의 증발을 최소화할 위해서는 고효율의 Cryostat가 필요하다. 따라서 1MJ SMES용 Cryostat는 이러한 지지구조 및 단열구조 해석 결과를 바탕으로 설계 및 제작되었다[4]. 표 3 과 그림 3은 제작된 Cryostat의 주요사양 및 사진을 나타내고 있다. 제작된 Cryostat의 전체크기는 직경이 1750 mm, 높이는 2300 mm이고 초전도마그네트의 무게를 포함한 총 Cryostat의 중량은 약 3000 kg 정도의 크기 및 중량을 갖는다.

표 3. 1MJ SMES용 Cryostat 주요사양

Cryostat	외경	1750 mm
	높이	2300 mm
액체헬륨조	외경	1300 mm
	높이	1200 mm
20 K 열차폐판	외경	1490 mm
	높이	1310 mm
80 K 열차폐판	외경	1590 mm
	높이	1430 mm
액체헬륨 내용적		1500 ltr

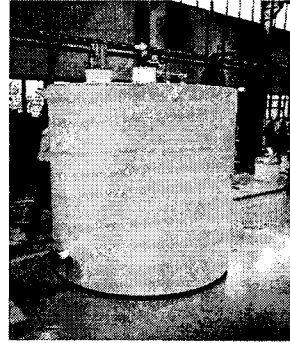


그림 3. 1MJ SMES용 Cryostat

2.4 고온초전도 전류리드

SMES 마그네트와 같은 액체헬륨을 냉매로 사용하는 저온초전도 시스템에서의 열손실 중 전류리드에 의한 열손실이 전체 냉각 시스템에 큰 영향을 끼친다. 따라서 전류리드에 의한 열손실을 줄이기 위해서는 고온초전도(이하 HTS) 전류리드의 사용이 매우 효과적이라 할 수 있다. 1MJ SMES 장치에 사용된 HTS 전류리드는 Bi-2223/AgAu 테이프를 적층한 구조로서, 적층된 도체를 16개로 분할하여 원통형태로 배치하였다[5]. Cryostat의 외부에서 고온초전도 전류리드까지 연결되는 부분은 가스냉각 구리 리드로 되어있으며, 고온초전도 전류리드 저온단부에서 마그네트까지는 구리 막(Cu bar)와 마그네트용 도체로 구성되어 있다. 고온초전도 단위도체의 양쪽 끝은 무산소 동 (OFC) 터미널에 Pb-Sn으로 납땜하였고 Kapton 필름으로 표면 처리하였다. 그 길이는 35 cm로 하였으며 112 개의 Bi-2223/Ag-Au 테이프를 내경 23 mm인 포머에 적층 하였다. 고온초전도 전류리드의 포머는 원주방향으로 16 개의 사각 홈이 나 있는 스테인레스 튜브를 사용하였다. 그림 4에 제작된 HTS 전류리드를 나타내고 있다.

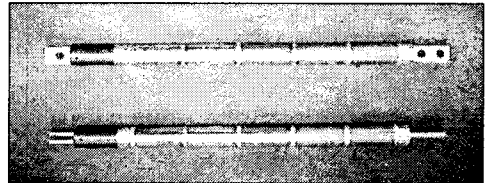


그림 4. 고온초전도(HTS) 전류리드

3. 특성시험 및 검토

3.1 충·방전 시험

SMES 장치의 모든 동작은 초전도 마그네트의 충·방전에 의해 이루어지므로 충·방전 특성은 SMES 장치의 가장 기본적인 특성이다. 기본 특성인 초전도 마그네트에 에너지를 충전 및 방전시키는 특성을 측정하기 위해 300 kVA 전력변환기로 전류를 900A까지 인가한 후 Dump 저항으로 방전시키면서 Shunt 저항법으로 전류를 측정하였다. Dump 저항으로는 0.5Ω/1600A 정격인 SUS로 제작된 저항을 사용했고, Shunt로는 1000A 50 mV 정격의 Shunt 저항이 사용되었다.

그림 5는 충·방전 시험 결과 중 전형적인 한 예를 보여 준다. 우선, 마그네트는 직류 퀘칭시험의 경우와 같이 4 A/s(20 mT/s)의 전류 상승률로 천천히 충전되어 220 초 후 900 A에 도달하였다. 그 후 약 40초 간 900 A

를 유지하고 나서 Dump 저항을 통해 방전되었다. 시험 결과 마그네트의 인덕턴스가 약 2.5 H이고 Dump 저항은 0.5Ω이므로 방전 시정수는 약 5초 정도로 방전되었다. 따라서 SMES 시스템의 기본 특성인 전력변환기로서 초전도마그네트에 1MJ급 에너지를 충·방전하는 시험은 성공적으로 수행했다.

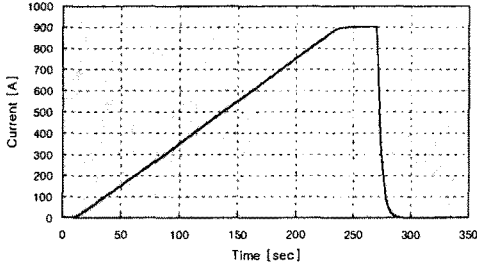


그림 5. 운전전류 충·방전 시험(운전전류:900A)

3.2 UPS 동작 시험

SMES 장치의 목적인 순간정전보상장치를 실험하기 위해서는 순간정전 모의뿐만 아니라 다양한 전압 Sag를 만들어 줄 수 있는 전압 Sag generator를 설계, 제작하였다. 따라서 UPS 동작 시험을 위한 시스템 구성은 그림 6과 같다.

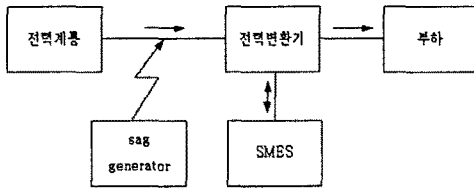


그림 6. UPS 동작 시험회로

전력변환기를 포함한 순간정전보상장치의 동작에 관한 실험결과에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 그림 7은 정격입력전압 (380 VAC)과 정격부하 (300 kVA)에서의 입력전압, 입력전류, 및 출력전압 파형을 보여준다. 입력전압은 380 VAC 정격전압이므로 출력전압과 같은 크기이며, 직렬보상기의 작용에 의해서 입력전류가 제어되므로 입력전류는 입력전압과 동상이며, 완전한 정현파가 된다는 것을 볼 수 있다. 실제로 입력전류의 THD (Total Harmonic Distortion)와 역률을 측정한 결과 THD는 3.5%이고 입력역률은 0.99가 나왔다.

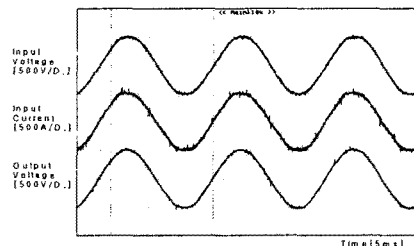


그림 7. 정상상태의 입력전압·전류, 출력전압 파형

그림 8은 3초간의 순간정전 발생시의 입력전압, 입력전류, 출력전압 파형을 보여준다. 정전이 되면 입력전압과 전류는 영이 되지만 출력전압은 SMES에 저장된 에너지를 이용하여 일정하게 유지되어 순간정전이 효과적으로 보상이 됨을 알 수 있다.

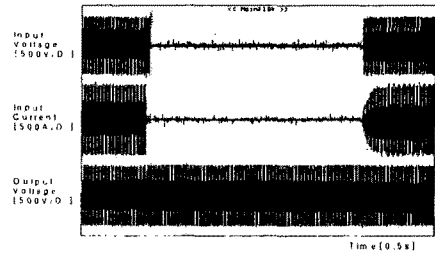


그림 8. 순간정전시의 입력전압·전류, 출력전압 파형

4. 결 론

본 연구 특성시험 결과 개발된 1 MJ 초전도 전력저장 장치는 초전도마그네트에 저장된 에너지를 이용하여, 전압 Sag를 포함한 순간정전 뿐만 아니라 왜곡된 전압을 정현파로 보상은 물론, 계통전류를 부하에 상관없이 역률 1로 보상할 수 있어 고조파 및 저역률 문제를 완전히 해결할 수 있으며, ±25%이내의 전압강하나 상승도 보상할 수 있는 다기능 품질보상 장치로 손색이 없었다. 따라서 민감한 중요부하에 대해 양질의 무정전 전원공급이 가능한 새로운 개념의 UPS 시스템을 개발하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "μSMES 마그네트용 Model coil의 제작 및 특성시험", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 89 - 91, 2001.
- [2] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "μSMES용 초전도도체의 회복전류 특성", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.807 - 809, 2000.
- [3] "Protects large industrial facilities from momentary voltage sags", AmSuper Co. Ltd. PQ-IVR Data Sheet.
- [4] 조전욱, 심기덕, 하홍수, 김해중, 성기철, 권영길, 류강식의 6인, "SMES용 Cryostat 시제작 및 평가", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 117-120, 2001.
- [5] 장현만, 오상수, 조전욱, 조영식, 하홍수, 하동우, 성기철, 권영길, 류강식, "SMES 마그네트용 고온초전도 전류 도입선 설계", 한국 초전도·저온공학회 논문지, 2권, 2호, pp.6-10, 2000