

3MJ SMES용 초전도 마그네트 특성연구

김해중, 성기철, 조전욱, 배준한, 심기덕, 류경우*, 김상현**
 한국전기연구원, *전남대학교, **경상대학교

Characteristic of a Superconducting Magnet for 3MJ SMES

H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, J. H. Bae, K. D. Shim, K. Ryu, S. H. Kim
 KERI, Chonnam National Univ., Gyeongsang National Univ.

hjkim@keri.re.kr

Abstract - For quite a long time various researches and developments of superconducting magnetic energy storage(SMES) device for enhancement of power quality control of sensitive electric load. This paper describes the design, fabrication and experimental results for the 3MJ SMES magnet made by using the design code of a SMES device that we developed. A computer code was developed to find the parameters of the SMES magnet which has minimum amount of superconductor for the same stored energy, and the 3MJ SMES magnet was designed based upon that. And 3MJ SMES magnet made base of several research result which was ramp up to 1kA without quench.

1. 서 론

도화되고 정보화된 사회로 발전함에 따라 정보통신기기, 전산 기기, 온라인 서비스 기기, 자동생산라인 및 정밀 제어기기가 확충되면서, 이러한 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력을 공급할 목적으로 초전도자계에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구 및 개발이 오래 전부터 진행되어왔다. 이러한 장치는 전력품질을 제어하기 위한 작은 규모의 SMES 와 부하 평준화를 목적으로 하는 대용량 SMES 장치에 이르기 까지 다양하다. 최근에는 민감한 부하의 전력 품질을 제어할 목적으로 수 MJ급 소규모 SMES (μ SMES)장치가 상용화되어 산업체 및 군용으로 펄드에 적용되어 그 효과를 입증하고 있다. SMES 장치의 주요 부분은 초전도 마그네트와 초전도 마그네트를 수용하는 Cryostat 그리고 초전도 마그네트의 두 단자를 Cryostat 외부로 인출하는 Current lead 및 전력계통으로부터 전력을 변환시켜 공급하는 전력변환기로 크게 나눌 수 있다.

본 논문에서는 이러한 SMES 장치의 개발에서 중추적 기능을 하는 SMES용 초전도 마그네

트를 설계·제작하여 그 특성을 평가·분석 하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 초전도 도체

SMES용 초전도 마그네트는 수백 A/mm²인 고전류밀도의 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 Pulse 운전조건에 부합하는 도체 특성이 요구된다.

Table 1 Specifications of the conductor

Wire	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/0/1.85
	RRR	50
	Diameter(mm)	0.648
	Filament diameter(μ m)	6
	Number of filaments	4182
	Filament twist pitch(mm)	13
	Filament twist direction	Right
	Insulation	Bare
Conductor	Dimension(mm)	11.8 × 1.3
	Number of wire	36
	Transposition pitch(mm)	94
	Transposition direction	Left
	Critical current	9780A, 5.6T

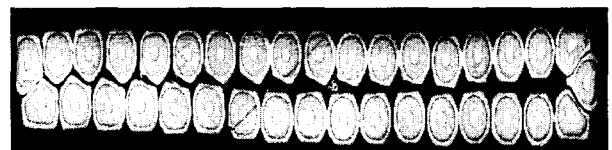


Fig. 1. Cross-section of the conductor

3MJ SMES 마그네트용으로 선정된 도체는 기술한 데로 이미 소선에 대한 특성시험을 마쳤으며 일본 Hitachi 전선의 직경 0.648mm인 36본의 초전도소선을 케이블 화시킨 폭 11.88mm, 두께 1.3mm의 초전도케이블을 선정했으며 중요한 사양은 표 1에, 36본 케이블의 단면사진은 그림 1에 나타내었다.

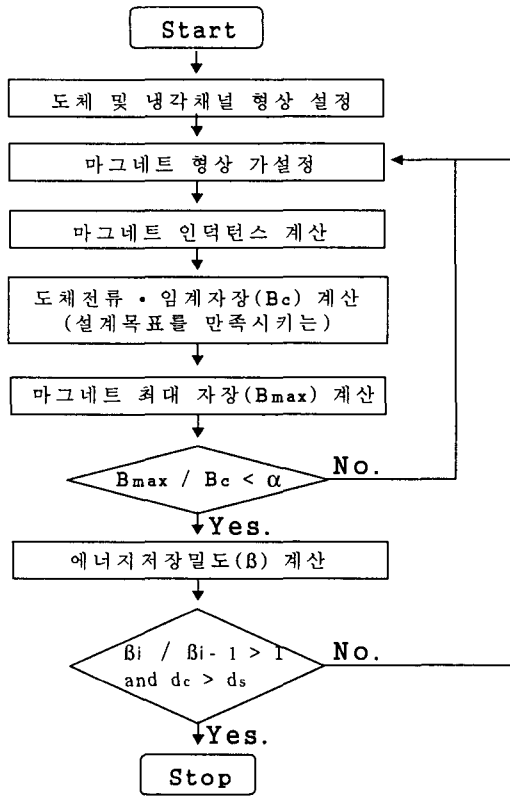


Fig. 2. Flow of SMES magnet design program

2.2 설계 및 제작

3MJ SMES 마그네트 제작에 적합한 초전도도체의 전류용량을 검토하기 위해 사용된 설계프로그램은 SMES 마그네트 모델에 대해 측정된 인덕턴스 및 자장이 설계프로그램에 의해 계산된 값과 비교해 오차가 5%이하로 그 타당성이 입증된 것을 사용하였고[1], 그 개괄적인 흐름도를 그림2에 나타내었다.

상용화된 SMES 마그네트의 에너지저장 용량이 수 MJ임과 연구·개발 목표를 고려하여 설계 대상 SMES 마그네트에 저장되는 에너지를 3 MJ로 하였으며, 마그네트의 저장에너지는 (W_H) 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_H = \frac{\mu_0}{2} \int_v H^2 dv = \frac{1}{2} L I_{op}^2 \quad [J] \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 자유공간의 투자율, H 는 자장의 세기, L 및 I_{op} 는 각각 SMES 마그네트의 자기인덕턴스 및 운전전류이며, 식으로부터 마그네트의 저장에너지는 인덕턴스 및 운전전류의 제곱에 비례함을 알

수 있다.

또한 액체헬륨에서 운전되는 초전도 응용 기기의 전기 절연내력은 3 kV정도가 그 한계로써 낮기 때문에 급속 충·방전이 요구되는 SMES 마그네트의 인덕턴스는 제약을 받게되고, 따라서 SMES 마그네트의 저장에너지를 크게 하기 위해서는 식 (1)로부터 초전도도체의 전류용량을 크게 해야 함을 알 수 있다. 그림 2의 설계프로그램에서 마그네트 형상이 가설정되면 인덕턴스가 계산될 수 있고, 식 (1)로부터 SMES 마그네트의 저장에너지를 만족시키는 마그네트 운전전류가 결정되며, 이 전류가 마그네트에 흐를 때 발생하는 최대 자장은 NbTi 초전도도체의 고유특성으로부터 결정되는 임계자장보다는 최소한 작으면 된다. 그러나 초전도도체의 국부적 운동 등과 같은 외란에 의해 SMES 마그네트는 불안정하게 되는 것을 피할 수 없다. 따라서 SMES 마그네트의 설계 및 제작에 있어서는 이와 같은 불안정성이 반드시 고려되어야 하며, 마그네트 및 도체의 안정성 척도로써 식 (2)와 같은 안정성인자를 (α : Stability factor) 사용하였다.

$$\alpha = B_{max} / B_c \quad (2)$$

여기서 B_{max} , B_c 는 각각 SMES 마그네트의 최대 자장 및 임계자장이고, 앞서 언급한 바와 같이 안정성인자는 최소한 1보다 작아야 하고 α 가 작을수록 SMES 마그네트 및 도체는 더욱 안정함을 의미하며 이를 결정짓는 중요 사항들로서는 초전도도체의 안정성, 마그네트의 구조 및 제작기술에 관련된 마그네트의 안정성을 들 수 있다. 마지막으로 그림 2에서 d_c 및 d_s 는 SMES 마그네트 설계 시 임시적으로 가설정되는 마그네트의 외 직경 및 조사 직경을 각각 나타낸다.

따라서 3MJ의 에너지저장용량을 갖는 초전도 마그네트의 설계 기준은 원하는 저장에너지를 만족하면서도 도체의 사용량을 최소화하는 개념을 기준으로 설계형상을 결정했다. 또한 초전도 마그네트의 냉각채널을 위해선 두께 1mm, 폭 10mm의 FRP 재질의 Spacer를 사용했다. 이러한 냉각채널을 설치한 이유는 초전도 소선의 마이크로한 운동에 의해 도체가 국부적으로 상전도가 되었다 할지라도 초전도 마그네트 전체가 초전도 상태로 다시 회복되기 위해서이며, 또한 Spacer 폭을 10mm로 한 이유는 Quench 발생시 최소전반길이(Minimum Propagation Zone; MPZ)보다는 작은 폭의 Spacer를 사용해야만 상전도 상태의 양단부가 냉각채널의 액체헬륨으로 충분히 냉각되어 마그네트는 다시 초전도상태로 회복되어진다.

그리고 마그네트의 안정성을 위해 이미 실험한 초전도도체의 회복전류 실험한 결과를 바탕으로 운전 전류를 설정했으며, 회복전류실험에서도 알 수 있듯이 초전도도체는 동비에 무관하게 냉각에 대단히 의존함을 알 수 있다[2]. 따라서 초전도도체의 냉각을 위해 3MJ SMES 도체의 절연물인 Kapton tape의 Lapping방법도 기존의

50%보다 냉각효과가 뛰어난 30%로 Overlapping 하였다. 이러한 모든 조건을 만족 하면서 SMES 마그네트의 가격 요소 중 중요한 도체량을 최소로 하는 3MJ SMES 마그네트를 설계하였다. 표2에 설계한 3MJ SMES 마그네트의 주요사양을, 그림 3에 제작된 3MJ SMES 마그네트 사진을 나타내었다.

Table 2. Specifications of a 3MJ SMES magnet

Inner diameter	865.6 mm
Outer diameter	1,160 mm
Height	475.2 mm
Conductor fraction	56.9 %
No. of layers	64
No. of turns for layer	40
Total number of turns	2,560
Total conductor length	8,137 km
Inductance	6 H
Nominal current at B_{max}	1 kA at 4.2 T
Stored energy	3 MJ

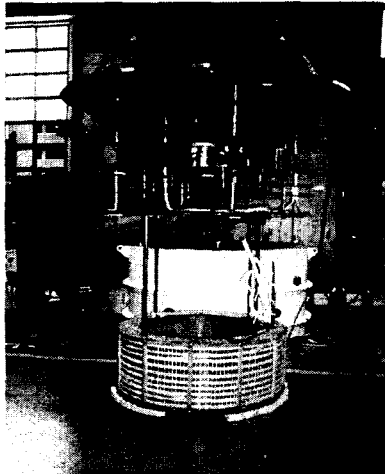


Fig 3. Assembled 3MJ SMES magnet

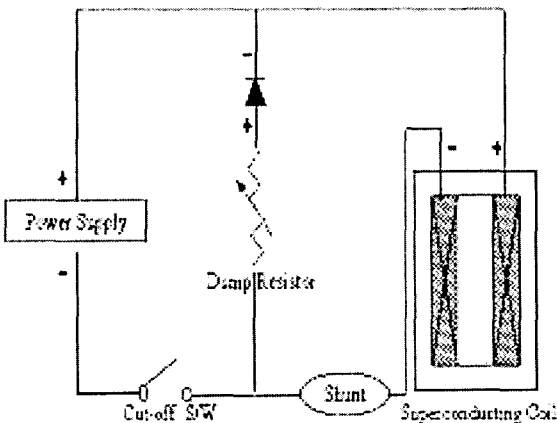


Fig. 4. Schematic of the test apparatus

2.3 시험

그림 4은 제작된 3MJ SMES 마그네트의 특성 시험을 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 그림에서 보는바와 같이 특성시험에 사용된 전원은 5000A, 50V DC Power Supply(독일 FUG사)를 사용하였으며, 마그네트의 보호를 위해 내부에 Dump Resistor 및 다이오드가 장착된 차단기를 사용하여 Quench시 초전도 마그네트에 축적된 에너지를 Dump 저항을 통해 소비하도록 하였다. 이때 감쇠 시정수는 마그네트의 인덕턴스 L 과 보호저항 R 에 의해 결정되며 시정수를 줄이기 위해 보호저항을 크게 하면 액체헬륨 증발을 감소시키는 데는 매우 유익한 반면, 초전도 마그네트의 급격한 전류 감소로 인해 유도되는 전압에 의해 절연파괴의 위험이 있기에 마그네트 양단에 인가할 수 있는 최대전압을 고려해 적절하게 선택해야 한다. 따라서 3MJ SMES 마그네트의 인덕턴스가 6 H이므로 전류감쇄 시정수를 1초로 하면 6Ω의 Dump 저항이 필요하나, 이럴 경우 마그네트 양단에 걸리는 전압이 최대 6kV로 절연에 문제가 있으므로 Dump 저항을 2Ω으로 제작 하여 전류 감쇄 시정수를 약 3초로 하였다.

그리고 3MJ SMES 마그네트 Quench시 초전도마그네트의 보호 및 액체헬륨의 증발을 막기 위해 Quench 검출기에 의해 Quench를 검출하며, 차단기 및 Dump 저항으로서 마그네트 전류를 차단 및 소모시켜 초전도 마그네트를 보호한다. 이때 사용되어지는 Quench 검출방식으로는 일반적으로 많이 사용하는 브리지 회로 방식을 사용하였으며, 특히 동일한 Quench검출 감도를 유지하기 위하여 마그네트를 두 개로 분리하는 전압탭의 위치를, 개발된 설계코드를 사용하여 가능한 한 동일한 인덕턴스가 되도록 정하였다 [3]. 또한 3 MJ SMES 마그네트의 직류 충전 시험에서는 마그네트의 전류상승률을 4 A/s(20 mT/s)로 대단히 천천히 충전하였다.

3. 시험결과 및 검토

제작된 SMES 마그네트에 대해 설계 코드를 사용하여 계산한 인덕턴스값 과 실제 LCR Meter(HP 4284A)로 측정한 값을 비교하기 위하여 이들을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서와 같이 실선은 설계코드로 계산한 인덕턴스 값이고, 검은 Dot로 표시된 것이 LCR Meter로 측정한 측정치로서 초전도마그네트의 운전모드가 거의 직류인 점을 고려해 LCR Meter의 최저 주파수인 20Hz 부터 측정했다. 그림 5의 결과로부터 일반적인 인덕턴스의 주파수 의존성과 같이 발전기 주파수가 감소함에 따라 인덕턴스는 증가하여 최소 발전기 주파수에서는 계산된 인덕턴스와 측정치가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 3MJ SMES 마그네트의 직류전류 인가 시험을 한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 초전도 마그네트에 운전전류를 300A,

600A, 900A 및 1000A의 순으로 순차적으로 인가 시켰으며, 목표 운전전류인 1,000A 까지 Quench없이 운전하였다. 그림에서 점선은 마그네트 운전전류 및 SMES용 마그네트 설계 코드로부터 계산된 마그네트의 최대 자계 관계를 나타낸 부하선(load line)을 나타내었으며, ●는 제작된 초전도 마그네트에 인가한 충전 전류를 각각 나타내었다.

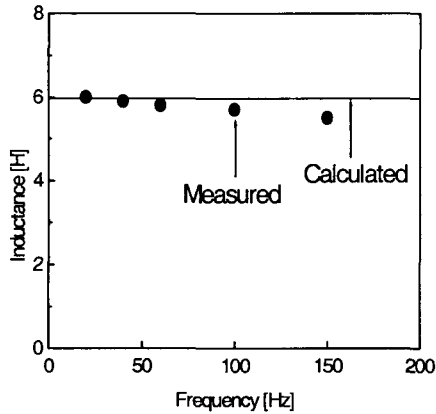


Fig. 5 Inductance vs. frequency in the SMES magnet

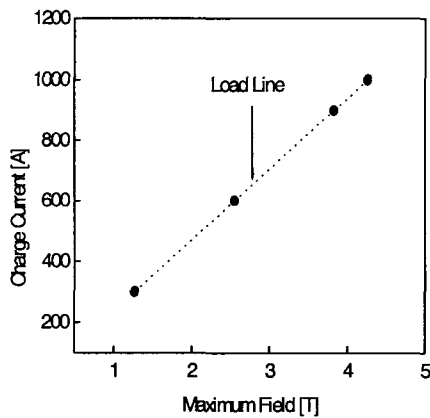


Fig. 6 Charge current vs. maximum magnetic field

4. 결 론

3MJ SMES 마그네트의 설계, 제작 및 특성평가 연구결과를 요약하면 개발된 SMES 마그네트 설계프로그램은 실제제작된 마그네트의 특성결과 잘 일치 했으며, 대형 초전도마그네트 제작을위한 요소기술로서 Model Coil의 특성시험결과, 직경 및 권선장력에 따른 마그네트의 특성도 중요하지만 냉각효과에 따른 마그네트 특성이 가장 중요한 요소임을 알 수 있었다. 그리고 SMES 도체의 고 운전전류 밀도 연구로서 Rutherford 도체에 Soldering 함으로써 고 운전전류 밀도가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 요소기술은 향후 SMES 마그네트 연구방향을 결정하는 중요한 결과라 할 수 있다. 따라서 이러한 각종 연구결과를 바탕으로 제작된 3MJ SMES 마그네트는 운전전류인 1kA까지 Quench 없이 운전 할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김해중, 성기철, 조전욱, 진홍범, 류강식, 류경우, "μSMES용 초전도도체의 전류용량에 관한 연구", 한국 초전도·저온공학회, Vol. 1, No. 1, pp.22 - 27, 1999.
- [2] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "μSMES용 초전도도체의 회복전류 특성", 2000년도 대한전기학회 하계 학술대회논문집, pp.807 - 809, 2000.
- [3] Y. Iwasa and M. W. Sinclair, "Protection of large superconducting magnets: maximum permissible undetected quench voltage," Cryogenics, vol. 20, pp. 711, 1980.