

SMES용 초전도마그네트 제작 및 특성시험

김해중*, 성기철*, 조전욱*, 권영길*, 류강식*, 류경우**
*한국전기연구원, **전남대학교

Test and Fabrication of the Superconducting Magnet for a SMES

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

Abstract - This paper describes the design, fabrication and experimental results for the 1MJ SMES magnet made by using the design code of a SMES device that we developed. The inductance and field measurements indicate that the developed code is applicable to the design of a SMES device. The test results show that the magnet is excellent in comparison with previously fabricated magnets outside.

1. 서 론

고도화되고 정보화된 사회로 발전함에 따라 정보통신 기기, 전산 기기, 온라인 서비스 기기, 자동생산라인 및 정밀 제어기기가 확충되면서, 이러한 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력을 공급할 목적으로 초전도장치에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구 및 개발이 오래 전부터 진행되어왔다. 이러한 장치는 전력품질을 제어하기 위한 작은 규모의 SMES와 부하 평준화를 목적으로 하는 대용량 SMES 장치에 이르기까지 다양하다. 최근에는 민감한 부하의 전력품질을 제어할 목적으로 수 MJ급 소규모 SMES(μ SMES)장치가 상용화되어 산업체 및 군용으로 필드에 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 나눌 수 있다. 본 연구에서는 이러한 SMES 장치의 개발에서 중추적 기능을 하는 초전도 마그네트를 설계·제작하여 그 편지특성을 평가하였으며, 평가 결과를 기존에 제작된 동일 기능의 마그네트와 비교·분석을 하였다.

2. 본 론

2.1 초전도 도체

SMES 마그네트 제작에 사용된 대전류 용량의 초전도 도체의 단면은 그림 1과 같으며 주요 사양은 표 1에 나타내었다. 도체의 각 소선 사이는 절연되지 않은 30개의 소선으로 구성되었으며, 도체의 단면은 거의 사각형이다. 또한 두께 25 μ m 과 폭 10mm의 Kapton 테이프로 도체 주위를 나선형으로 둘러싸서 텨간의 절연을 했다,

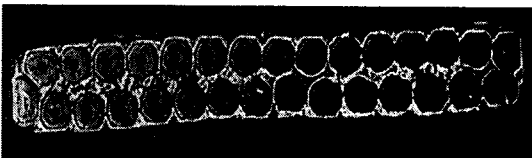


그림 1. 초전도도체 단면
표1. 초전도도체의 주요사양

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

2.2 설계 및 제작

초전도마그네트의 설계기준으로서 저장에너지를 설정한 후 마그네트의 내·외경과 도체의 형상 및 냉각채널을 위한 spacer의 형상을 입력한다. 또한 마그네트의 설계기준과 설정한 제약조건을 만족하는 마그네트의 형상은 많으나 1 MJ의 에너지 저장용량을 갖는 마그네트의 제작에 소요되는 초전도도체의 길이가 최소인 마그네트의 형상을 설계하였다.

표2 및 그림2는 설계한 1 MJ SMES 마그네트의 주요사양 및 제작된 마그네트 사진을 나타내었다.

표2. 1MJ SMES 마그네트 주요사양

Inner diameter	535.5 mm
Outer diameter	749.5 mm
Height	512.5 mm
Conductor fraction	56.07 %
No. of layers	48
Total conductor length	4.85 km
Inductance	2.48 H
Nominal current at B _{max}	900A at 3.9 T
Stored energy	1 MJ



그림 2. 1 MJ SMES 마그네트

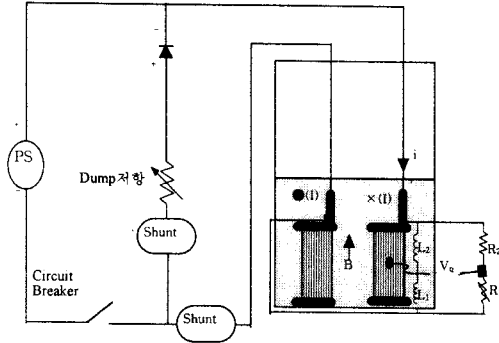


그림 3. 실험장치의 개략도

2.3 특성시험

그림 3은 제작된 1 MJ SMES 마그네트의 특성시험을 위한 실험장치의 개략도이다. 1 MJ SMES 마그네트의 각종 특성 실험을 위해 사용한 외부전원으로는 5000A, ± 50 V DC Power Supply를 사용하였으며, 마그네트에 흐르는 전류를 검출하기 위해서 3000A 50mV Shunt를 사용하였고, 1 MJ 마그네트의 정격전류를 고려하여 덤프저항과 직렬로 연결된 다이오드 및 차단기의 용량은 3000 A로 하였다. 켄치 시 전원으로부터 공급되는 전류는 마그네트를 보호하기 위해 차단기를 사용하여 외부 전원과 초전도 마그네트를 완전히 분리시켜 초전도 마그네트에 축전된 자체 에너지를 저항을 통해 소비시켜야 한다. 따라서 이에너지를 소비 하기 위한 부하가 요구되며 이를 위해 Dump 저항을 초전도마그네트에 병렬로 연결하여 실험했다. 이때 감쇠 시정수는 마그네트의 인덕턴스 L 과 보호저항 R 에 의해 결정되며 시정수를 줄이기 위해 보호저항을 크게 하면 액체헬륨 증발을 감소시키는데는 매우 유익한 반면, 초전도마그네트의 급격한 전류 감소로 인해 유도되는 전압에 의해 절연파괴의 위험이 있기에 마그네트 양단에 인가할 수 있는 최대전압을 고려해 적절하게 선택해야 한다. 따라서 마그네트의 인덕턴스가 약 2.5 H이므로 전류감쇄 시정수를 1초로 하면 2.5 Ω 의 Dump 저항이 필요하나, 현재 보유하고있는 SMES 마그네트의 정격전류를 안전하게 흘릴수있는 Dump 저항은 0.5 Ω 으로서 켄치 시 1 MJ SMES 마그네트 전류감쇄 시정수는 약 5초 정도임을 알 수 있다. 따라서 1 MJ 마그네트의 켄치시험 시 초전도도체의 회복전류부근의 전류에서 마그네트가 켄치될 때는 액체헬륨의 증발량이 거의 없는 반면 training 효과에 의해 켄치 전류가 증가함에 따라 시정수(5 초)가 너무 큰 결과 액체헬륨의 증발량이 현저히 증가하는 것이 관찰되었다.

1 MJ SMES 마그네트 켄치시 초전도마그네트의 보호 및 액체헬륨의 증발을 막기위해 켄치 검출기에 의해 켄치를 검출하며, 차단기 및 Dump 저항으로서 마그네트 전류를 차단 및 소모시켜 초전도마그네트를 보호한다. 이때 사용되어지는 켄치 검출방식으로는 일반적으로 많이 사용하는 브리지 회로 방식을 사용하였으며, 특히 동일한 켄치검출 감도를 유지하기 위하여 마그네트를 두개로 분리하는 전압탭의 위치를 개발된 설계코드를 사용하여 가능한 한 동일한 인덕턴스가 되도록 정하였다[1].

또한 1 MJ SMES 마그네트의 직류 켄치시험에서는 마그네트의 전류상승률을 4 A/s(20 mT/s)로 대단히 천천히 충전하였다.

3. 시험결과 및 검토

제작된 1 MJ SMES 마그네트에 대해 설계 코드를 사용하여 계산한 인덕턴스값과 실제 LCR Meter(HP 4284A)로 측정된 값을 비교하기 위하여 이들을 그림 4에 나타내었다. 그림 4 에서와 같이 실선은 설계코드로 계

산한 인덕턴스 값이고, 검은 Dot로 표시된 것이 LCR Meter로 측정된 측정치로서 초전도마그네트의 운전모드에서의 직류인 점을 고려해 LCR Meter의 최저 주파수인 20Hz부터 측정했다. 그림 4의 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.

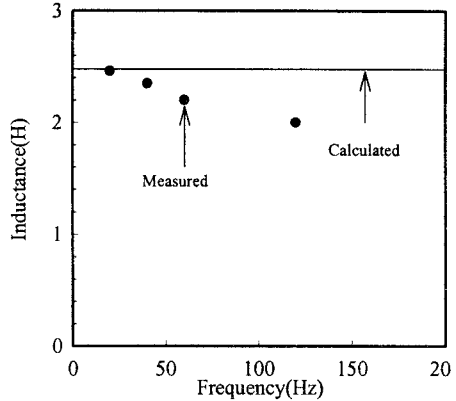


그림 4. 1MJ SMES 마그네트의 주파수별 인덕턴스

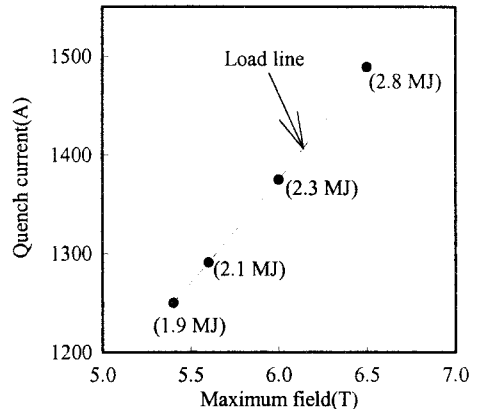


그림 5. 1MJ SMES 마그네트의 자장에 따른 켄치전류

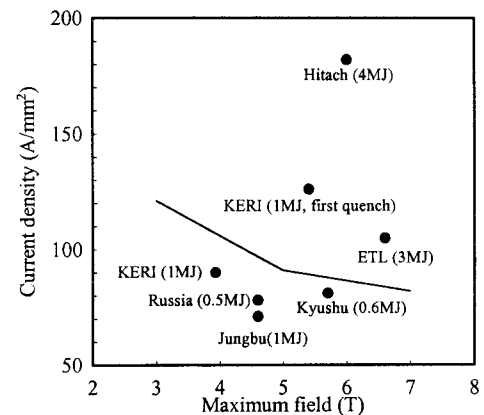


그림 6. 1MJ SMES 마그네트 및 다른 마그네트의 최대 자장에 따른 전류밀도 비교

그림5에서는 1 MJ SMES 마그네트에 대해 직류 켄치 특성 시험을 한 결과를 나타내었다. 그림5에서 점선은 마그네트 운전전류 및 SMES용 마그네트 설계 코드로부터 계산된 마그네트의 최대 자계 관계를 나타낸 부하선(load line)을, ●는 켄치특성 시험으로부터 측정된 1 MJ 마그네트의 켄치전류를, ()안의 숫자는 마그네트에 저장된 자계에너지를 각각 나타낸다.

그림5의 결과에서 1 MJ SMES 마그네트의 켄치전류는 1 MJ SMES 마그네트 정격운전전류(900 A)보다 약 40 %가 높은 1250 A에서 최초로 발생하였으며, 켄치시험 회수를 증가시킴에 따라 권선장력이 작은 마그네트에서 일반적으로 나타나는 training효과에 의해 켄치전류가 증가하였으며[2], 수회의 training에도 불구하고 정격운전전류보다 65 %가 높은 약 1500 A까지 도달하였다.

그림6에는 본 연구에서 설계·제작되어 평가된 1 MJ 마그네트의 성능을 비교·분석하기 위하여 현재까지 제작·평가된 몇몇 SMES용 마그네트의 운전전류밀도를 1 MJ 마그네트에 대한 결과와 함께 나타내었으며 그림에서 실선은 초전도선을 절연물(Kapton)로 절연한 상태에서 측정된 회복전류를 나타내고 있다[3].

그림6의 결과에서 동일한 슬레노이드형으로 제작된 Kyushu(0.6MJ), Russia(0.5MJ) 및 Jungbu(1MJ)의 경우보다 본 연구에서 제작된 1 MJ 마그네트의 정격운전전류밀도가 약 20 % 정도 높은 것을 볼 수 있고, 이는 본 연구에서 제작된 마그네트가 외국의 제작 사례와 비교하여 성능이 우수함을 의미한다. 또한 1 MJ 마그네트는 제작에 사용된 초전도선의 회복전류보다 다소 큰 전류에서 최초로 켄치가 발생하였으며, 이는 SMES용 마그네트처럼 직경이 크고 대 전류인 안전한 마그네트의 설계·제작에서 마그네트에 사용될 초전도도체의 회복전류가 대단히 중요한 설계 데이터로 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

마그네트 켄치시험 시 켄치검출기의 전압을 분석한 결과 뚜렷한 전압스파이크가 마그네트를 충전하는 중 주기적으로 관찰되었으며, 이는 일반적으로 초전도 마그네트를 불안정하게 만드는 주요 원인으로 알려진 초전도선의 운동(wire motion)이 충전 중에 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 제작된 1 MJ SMES용 마그네트는 외국사례와 비교하여 그 성능이 우수하며, 대형 및 대 전류용량 초전도 마그네트를 설계·제작하는데는 초전도도체의 회복전류가 대단히 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 김해중, 성기철, 류강식, "0.7 MJ μ SMES코일 제작을 위한 소형초전도코일의 특성", 대한전기학회논문지, 48B권, 1호, pp.13 - 18, 1999.
- [2] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, " μ SMES 마그네트용 Model coil의 제작 및 특성시험", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 89 - 91, 2001.
- [3] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, " μ SMES용 초전도도체의 회복전류 특성", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.807 - 809, 2000.