

SMES용 kA급 초전도도체의 운전전류 특성

류경우*, 최병주**, 김해중***, 성기철***
*전남대학교, **서라벌대학, **한국전기연구원

Operating Current Characteristics of a kA Class Conductor for a SMES device

K. W. Ryu*, B. J. Choi**, H. J. Kim***, K. C. Seong***
*Chonnam National University, **Sorabol College, KERI***

kwryu@chonnam.ac.kr

Abstract - We have developed a small-sized superconducting magnetic energy storage (SMES) device, which provides electric power with high quality to sensitive electric loads. In large magnets such as the SMES magnets the stability, which is determined by several factors, e.g. conductors cooling condition and operating current, magnets winding structure, is a crucial problem. The effect of the cooling condition, the copper ratio, and the conductor's size upon the recovery currents was investigated experimentally. The results indicate that the recovery current characteristics of the strands vary considerably according to their insulation method. In the fully insulated strands with a low copper ratio, the recovery current densities range from 10 to 20 % of their engineering critical current densities. The recovery current density of the 30-conductor with a cooling channel is about a factor of 1.8 higher than that without a cooling channel.

1. 서 론

효율적인 전력관리를 위하여 저장용량이 수 천 MWh급에 달하는 SMES장치에 이르기까지 많은 연구·개발이 진행되어 왔다. 최근 특히 저장용량은 수 MJ로 작지만 출력이 약 1 MW 정도로 비교적 큰 SMES장치가 현장 시험운전을 통해 그 효과도 잘 입증되고 있는 실정이다. 이와 같은 SMES장치에서 장치의 급속한 충·방전운전 시, 초전도도체에서 발생하는 교류손실을 냉매로 신속히 제거할 수 있는 장점에 비함침 구조로 제작되고 있다[1]. 이와 같은 비함침 구조의 장점 이면에는 특히 직경이 크고, 운전전류가 kA급인 대형인 경우에는 소형에서는 볼 수 없는 초전도선의 미세한 운동에 의

하여 SMES장치가 임계전류의 약 10 ~ 20 % 정도에서도 켜치되어 불안정하게 되는 본질적인 문제점이 있다[2].

따라서 SMES장치 상용화에 앞서 이와 같은 대형 마그네트의 본질적인 불안정성에 대하여 먼저 밝혀져야 할뿐만 아니라 장치를 안전하게 운전할 수 있는 운전전류 레벨, 그리고 이에 영향을 미치는 주요 인자 등에 관한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 SMES장치 제작에 실제로 이용되고 있는 kA급 초전도도체를 대상으로 하여 이들에 대한 실험적·이론적 검토를 하였다.

2. 안정성 이론

MRI장치의 경우, 대형 마그네트(직경이 1000 mm정도)임에도 불구하고 안전한 운전전류 레벨이 임계전류의 약 70 %로 매우 높다. 이는 장치의 운전전류가 수백 A급으로, 1본의 초전도선으로도 가능하여 선의 미세한 운동을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 동비도 크기 때문이다. 반면 SMES장치의 경우는 운전전류가 수 kA급이고, 다수본의 초전도선으로 구성된 복잡한 구조의 도체이며, 장치 또한 앞서 지적인 바와 같이 비함침 구조여서 선의 운동을 억제하는 것이 거의 불가능하고 따라서 낮은 운전전류에서도 마그네트는 불안정하게 된다. 또한 SMES장치와 같은 대형 초전도마그네트의 설계·제작에 있어서는 그 무엇보다도 안정성이 최우선적으로 고려되어야 하며, 안전한 운전전류 레벨에 대한 지침으로서 보편적으로 이용되고 있는 것은 초전도도체의 회복전류(I_r)이며, 이는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$I_r = \frac{I_c}{\sqrt{\alpha}},$$
$$\alpha = \frac{\rho I_c^2}{APh(T_c - T_b)},$$
$$T_c = 9.2(1 - B/14.5)^{0.56} \quad (1)$$

여기서 I_c 는 초전도도체의 임계전류, a 는

Stekly 수(도체의 안정성 파라미터), ρ 는 상전도 상태에서 도체의 저항률, A 는 도체의 단면적, P 는 도체의 냉각주변 길이, h 는 액체헬륨의 열전달 계수, T_c 는 초전도도체의 임계온도, T_b 는 액체헬륨의 온도, B 는 외부자장을 각각 나타낸다.

이와 유사한 안전한 운전전류 레벨에 대한 또 다른 지침으로서 최소전파전류(I_{mpc})를 들 수 있다. 이는 어떤 외란에 의해 국부적으로 상전도로 전이된 부분이 더 이상 초전도도체의 모든 영역으로 전파되지 않고 그 상태로 유지되는 도체의 전류를 의미한다. 또한 이는 식(1)의 회복전류보다 더 큰 운전전류에서도 대형 마그네트를 안정하게 운전할 수 있음을 이론적으로 암시하는 것으로, 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{mpc} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8a}}{2a} I_c \quad (2)$$

여기서 I_c 및 a 는 식(1)에서와 동일하다.

식(2)에서 $a \leq 1$ 인 경우는 최소전파전류(I_{mpc}) \geq 임계전류(I_c)로 되어 운전전류가 도체의 임계전류가 되어도 어떠한 외란에 대해서도 안정한 것을 알 수 있으며, 이와 같은 초전도도체를 완전안정화된 도체라 한다. 하지만 완전안정화된 도체의 경우, 운전전류밀도는 수십 A/mm^2 정도로 매우 낮아 초전도도체의 장점인 높은 운전전류밀도 특성을 상실하게 되어 장치의 경제성을 저하시키게 된다. 반면 실용 초전도도체의 경우는 a 가 수십 정도로 매우 커, 최소전파전류는 도체 임계전류의 10 ~ 20 % 정도가 된다.

3. 실험 샘플 및 방법

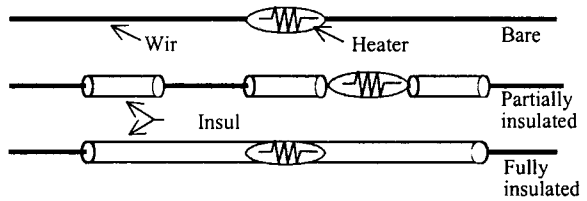
본 연구에 사용된 kA급 초전도도체들의 사양을 표1 및 표2에 각각 나타내었으며, 그림 1에는 이들 실험 샘플에 대한 개략도를 나타내었다.

Table 1. Specifications of the Alstom-30 conductor

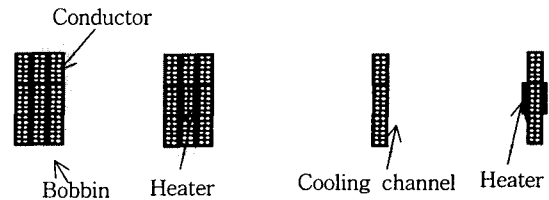
	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/0/1.8
	Diameter	0.65 mm
Wire	Filament diameter	6 μ m
	Filament twist pitch	13 mm
	RRR	50
	No. of wires	30
Conductor	Dimension	1.25 mm \times 10.2 mm
	Wire transposition pitch	55 mm
	Kapton tape insulation	25 μ m \times 10 mm

Table 2. Specifications of the Alstom-9 conductor

	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/1/5
	Diameter	1 mm
Wire	Filament diameter	5 μ m
	Filament twist pitch	19.5 mm
	RRR	120
	No. of wires	9
Conductor	Dimension	1.8 mm \times 4.8 mm
	Wire transposition pitch	45 mm
	Kapton tape insulation	25 μ m \times 10 mm



a) Wire samples



b) Conductor samples

Fig. 1. Schematic of the samples.

그림 1의 실험 샘플에 대한 회복전류 및 최소전파전류를 측정하기 위한 배경 자장용 자석으로는 자석상수가 0.03 T/A인 솔레노이드형 초전도자석(내직경: 100 mm, 외직경: 240 mm, 높이: 240 mm)을 10 V, 500 A 전원으로 여자시켜 사용하였고, 샘플용 전원으로서 10 V, 3000 A 전원을, 또한 초전도선의 운동에 의한 발열을 실험적으로 모의하기 위한 히터용 전원으로서 150 V, 30 A의 펄스전원을 사용해 가열하여 회복전류 및 최소전파전류를 측정하였다.

4. 실험 결과 및 검토

그림 2에는 표1의 Alstom-30본 선(부분적으로 절연)에 대하여 측정된 회복전류 및 최소전파전류를 나타내었다.

그림 2에서 보는 바와 같이 최소전파전류가 회복전류보다 다소 크다는 사실과 식(1) 및 식(2)으로부터 계산된 값과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 3에는 표1, 표2의 Alstom-30본 선 및 Alstom-9본 선에 대하여 냉각조건을 달리하였을 때, 측정된 회복전류를 나타내었다.

그림 3로부터 초전도도체의 회복전류는 냉각이 나빠짐에 따라 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다.

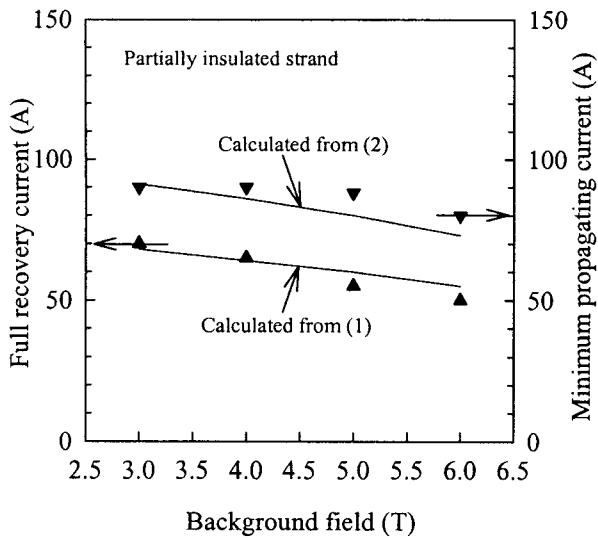


Fig. 2. Full recovery current and minimum propagating current vs. background field in the strands of the 30-conductor.

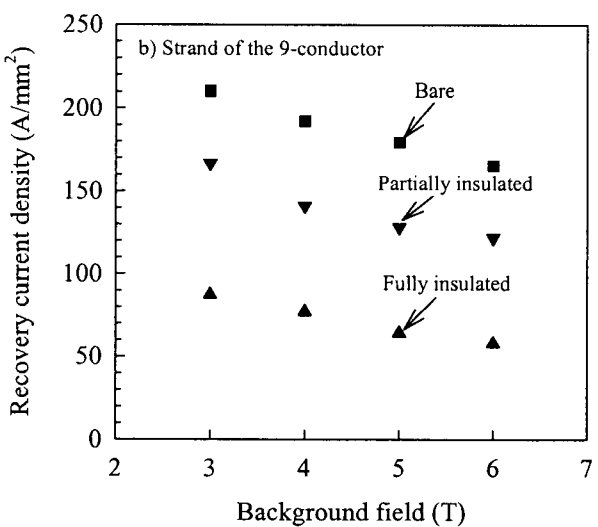
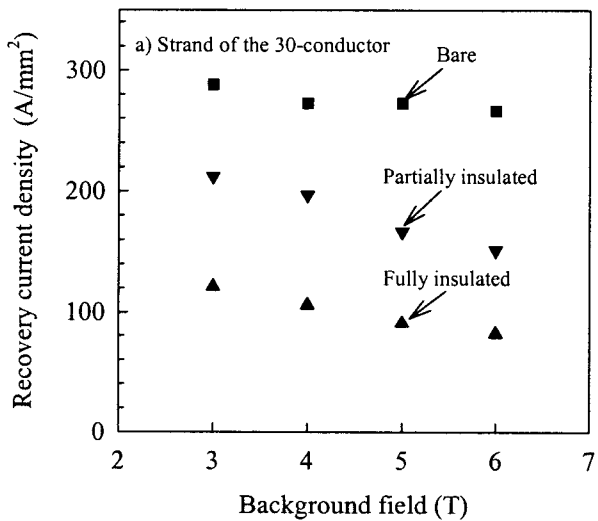


Fig. 3. Recovery current density vs. background field in differently insulated strands of the 30-conductor and the 9-conductor.

그림 4에는 초전도도체의 동비가 회복전류에 미치는 영향에 대하여 조사한 실험결과를 나타내었다.

그림 4의 결과로부터 초전도도체의 동비가 작을수록 회복전류밀도는 더 커지는 것을 볼 수 있고, 또한 측정된 회복전류밀도는 도체 임계전류밀도의 10% ~ 20% 정도로 매우 작은 것을 알 수 있다.

그림 5에는 초전도도체의 전류용량이 회복전류에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 나타내었으며, 그림 5로부터 Alstom-30본 도체의 전류용량이 Alstom-30본 선보다 30배정도 큼에도 불구하고 회복전류밀도는 거의 동일한 것을 볼 수 있다.

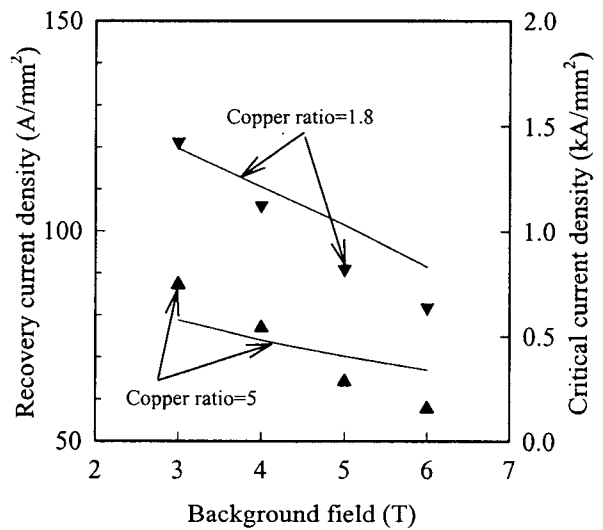


Fig. 4. Recovery current density and critical current density vs. background field for different copper ratios in the fully insulated strands.

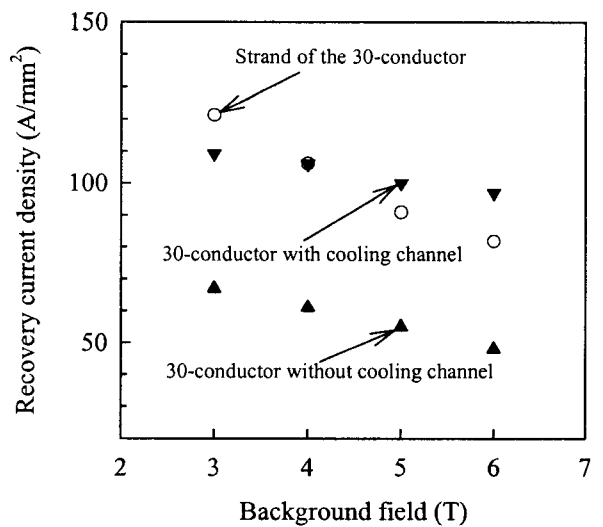


Fig. 5. Recovery current density vs. background field for different cooling conditions in the 30-conductor.

5. 결 론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정된 최소전파전류는 이론으로부터 예상되는 바와 같이 회복전류보다 다소 크지만 그 차이는 냉각조건에 따라서 매우 상이하다.
- 2) 초전도도체의 회복전류밀도는 냉각조건에 따라서 매우 상이하다. 따라서 동일한 초전도도체를 사용한다할 지라도 경제적인 SMES장치를 제작하기 위해서는 도체의 냉각조건이 좋은 구조로 설계·제작을 해야한다.
- 3) 초전도도체의 회복전류밀도는 동비에 따라서도 매우 상이하다. 따라서 동비가 초전도도체의 가격과 무관하다고 가정하면 경제적인 SMES장치를 제작하기 위해서는 동비가 낮은 도체를 사용해야한다.
- 4) 동일 사양의 초전도선을 사용하는 경우, 냉각조건만 유사하게 되도록 SMES장치를 제작하면 초전도도체의 회복전류밀도는 도체 전류용량에는 무관하다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 배준환, 류강식, 신상윤, 류경우, 박종수, 장승찬, "0.7MJ μ SMES 코일의 특성," 1999년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 134-137, 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] Lawrence Dresner, *Stability of Superconductors*, New York and London: Plenum Press, 1995. pp. 56-58.