

0.7MJ μ SMES 코일의 특성

김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 배준한, 류강식, 신상윤*, 류경우**, 박종수, 장승찬***
한국전기연구소, 창원대학교*, 전남대학교**, 에너지관리공단***

Characteristics of the 0.7MJ μ SMES Coil

H.J Kim, K.C Seong, J.W. Cho, E.Y Lee, J.H. Bae, K.S. Ryu, S.Y. Shin*, K. Ryu**,
J.S. Park, S.C. Chang***

Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)
Changwon National Univ.*, Chonnam National Univ.**
Korea Energy Management Corporation***
hjkim@keri.re.kr

Abstract - This paper describes the design, fabrication and experimental results for the 0.7MJ μ SMES coil made by using the design code of a μ SMES device that we developed. The 0.7MJ μ SMES coil was wound with high winding tension of about 14kgf/mm² in order to prevent wire motion from Lorentz force. This coil was charged up to a current of 1820A with a ramping rate of about 10A/s, where a quench occurred. This quench current is about 82% of the coil critical current.

1. 서 론

사회가 고도화되고 정보화 됨에 따라 정보통신기기, 전산 기기, 온라인 서비스 기기, 자동생산라인 및 정밀 제어기기가 확충되면서 이러한 민감한 부하에 양질의 전력을 공급할 목적으로 이미 여러 선진국에선 초전도 자계에너지 저장(Superconducting Magnetic Energy Storage: 이하 SMES라 함)에 대한 연구가 오래 전부터 진행되어 왔으며 최근 미국에서는 저장에너지가 수MJ이하인 μ SMES가 상용화되어 이미 수년간의 필드 운전으로 그 효과를 입증하고 있다. 뿐만 아니라 잦은 반복 운전을 해도 축전지와 같은 열화가 없으므로 반영구적으로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 사용효율 측면에서도 타 에너지저장장치에 비해 우수하여 μ SMES에 대한 연구의 한 일환으로서 이미 3년전 부터 전력품질 개선용 μ SMES 장치 개발을 목표로 0.7MJ급 μ SMES 장치 및 100kVA급 전력변환기 요소기술개발에 대한 연구가 진행되어 왔다.

μ SMES 코일은 수백 A/mm²의 고 전류밀도의 급격한 펄스모드로 운전되기 때문에 다른 코일에 비해 매우 가혹한 조건에서 운전된다고 볼 수 있다. 그러므로 초전도코일 내부의 도체간의 국부적인 마찰에 의한 발열로 인해 초전도코일 전체가 켄치 될 수도 있다. 이러한 불안정성을 줄이

기 위해 권선시 초전도도체의 기계적 강도 한계 내에서 가능한 한 강한 장력을 가해 전자력에 의한 도체의 움직임이 없도록 해야하며, 또한 충·방전시 발생하는 교류손실을 효과적으로 냉각시키기 위해 일반적으로 초전도코일 내부에 냉각채널을 설치하는 비함침 방식의 초전도코일을 제작 해야한다.

본 논문에서는 이러한 조건을 만족하는 0.7MJ급 초전도코일의 최적 설계·제작 및 켄치특성에 대해 기술 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 코일용 도체

고 전류밀도의 펄스모드로 운전되는 μ SMES 코일용의 도체 선정은 바로 코일의 특성을 결정하는 중요한 인자로 작용한다. 본 연구에 사용된 도체는 GEC Alsthom사의 직경 1mm인 9본의 초전도소선을 케이블화시킨 폭 4.8mm, 두께 1.8mm의 초전도케이블을 사용하였으며, 그 개략적인 사양을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters of the Alsthom 9 cable

Cable	Width	4.8 mm
	Thickness	1.8 mm
	Number of strands	9
	Transposition pitch	46.0 mm
	Transposition direction	Left
Strand	Diameter	1 mm
	Cu/CuNi/NbTi Ratio	5/1/1
	Twist pitch	19.3 mm
	Twist direction	Right

2.2 코일의 설계 및 제작

본 연구개발의 목표인 0.7MJ μ SMES코일의 최적 설계를 위하여 이미 개발되어 코드화된 초전도 자계에너지 저장용 설계프로그램을 이용하여 설계하였다[1-2]. 본 연구에서 코일의 설

계기준은 원하는 저장에너지를 만족하면서도 도체의 사용량을 최소화하는 개념을 기준으로 설계 형상을 결정했다. 그리고 코일의 내·외경과 도체의 형상 및 냉각채널을 위한 spacer의 형상도 입력 파라미터로써 고려되었다. 코일의 내경 및 외경은 각각 450mm 및 530.64mm로 하였고 spacer는 두께 1mm, 폭 20mm의 FRP를 사용하였다. 이는 초전도 소선의 마이크로한 운동에 의해 도체가 국부적으로 상전도가 되었다 할지라도 초전도코일 전체가 초전도 상태로 다시 회복되기 위해서는 최소전반경이(Minimum Propagation Zone: 이하 MPZ라 함)보다는 spacer의 폭이 좁아야 상전도 상태의 양단부가 냉각채널의 액체헬륨으로 충분히 냉각되어 코일은 다시 초전도상태로 회복되어 진다. 따라서 0.7MJ 초전도코일에 사용된 케이블의 시험결과 MPZ는 약 25mm로써 이보다 작은 20mm를 spacer 폭을 설정했으며, spacer 폭과 냉각채널 폭의 비는 약 1:1로 하였다. 그리고 spacer의 두께는 1mm로 하였다. 또한 도체의 안정성을 고려해 코일 설계시, 안정성마진을 고려하였으며, 코일의 내벽에서 발생하는 최대자장보다 안정성마진을 고려한 자장이 커야되는 조건을 설정한 후 제약조건을 만족하면 종료하고 그렇지 않으면 다시 새로운 코일 형상을 설정하여 상기의 과정을 반복한다. 또한 이번 0.7MJ 초전도코일의 설계에서 있어서는 코일에서 발생하는 손실보다는 안정성에 더 큰 비중을 두고 초전도케이블을 선정했으며, 상기에서 언급한 설계 조건 아래에서 설계 코드를 이용해 설계된 0.7MJ μ SMES 코일의 최적 형상을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Specification of the 0.7MJ μ SMES coil

Dimensions	Coil	Inner diameter	450 mm
		Outer diameter	530.64 mm
Height		480 mm	
Conductor fraction		66.93 %	
Cable	Thickness	1.88 mm	
	Width	4.88 mm	
	Number of layer	14 layers	
	Number of turns per layer	97 turns	
	Total number of turns	1358 turns	
Spacer	Total conductor length	2087.6 m	
	Thickness	1 mm	
	Width	20 mm	
	Number of layer	14 layers	
	Number of spacers per layer	36	
Characteristics	Total number of spacers	504	
	Stored energy	0.7 MJ	
	Inductance	0.58 H	
	Operating current	1,555 A	
	Maximum field	4.48 T	
	Center field	3.89 T	
Critical condition	2200A, 6.33T		

표2 에서와 같이 코일의 높이는 480mm이며 내·외경은 각각 450mm 및 530.64mm 이며, spacer를 보빈의 최내층에 1층을 설치한 후 권선 했으며 전류리드의 효과적인 인출을 위해 층수를 짝수 층인 14층으로 했으며 설계된 코일의 최대자장 및 임계자장은 각각 4.48T 와 6.33T 이고, 도체 소요량은 약 2087m이며, 운전전류 1555A에서 저장에너지는 0.7MJ이다.

초전도코일의 운전 중에 발생하는 전자력에 의한 초전도소선의 움직임을 방지하기 위하여 코일 권선시 장력을 인가하여 권선 하여야한다. 이러한 이유에서 초전도소선에 걸리는 허용응력을 조사하여 권선시 초전도 소선의 권선 장력과 자기력을 합하여 허용응력 이하로 되도록 장력을 설정하여 권선 하였다[3]. 따라서 코일 각각의 턴 상호간의 자기력은 서로 영향을 주지 않는다고 가정할 때, 초전도코일의 외부반경 방향으로 작용하는 자기력에 의해 초전도 코일 턴이 받는 응력을 알 수 있다. 따라서 코일 여자시 코일의 축 방향 자장 및 권선 방향 전류에 의한 자기력(σ_m)은 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{J_\phi B_z R}{9.8 \times 10^6} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (1)$$

여기서 J_ϕ 는 전류밀도, B_z 는 초전도 코일 턴에 인가되는 자장, R 은 초전도 코일 턴의 반경이다. 그리고 코일 권선 시 인가하는 권선 응력(σ_w)은 식(2)과 같이 표현된다.

$$\sigma_w = \frac{T}{A} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (2)$$

여기서 T 는 코일 제작시 인가되는 권선장력, A 는 초전도 코일 턴의 단면적이다.

설계된 표2의 초전도코일에서의 예상되는 최대 자기응력은 표2의 파라미터 즉, 코일 턴의 단면적이 $\pi(0.5)^2 \times 9 \times 10^{-6} = 7.06 \times 10^{-6} \text{m}^2$, 운전전류가 1555A, 따라서 전류밀도는 $1555/7.06 \times 10^{-6} = 2.2 \times 10^8 \text{A/m}^2$, B_z 는 코일의 최대자장 즉 4.48T로, R 은 코일의 내반경 즉 $225 \times 10^{-3} \text{m}$ 로 하였으며, 이들 값을 식(1)을 사용하여 계산된 권선 방향 자기응력은 22.6kgf/mm^2 으로서 Alsthom 9본케이블의 항복강도인 40kgf/mm^2 과 비교하면 약 57%정도임을 알 수 있다.

이러한 μ SMES 코일은 냉각채널형 구조 이기에 헬륨공간이 존재하므로 여자시 초전도선의 움직임을 의한 마찰 발열로 인한 퀀치로 코일 전체가 불안정해 질 가능성이 크다고 할 수 있다. 이와 같이 초전도선의 마찰 발열에 의한 퀀치전류 열화현상은 실험적 연구결과[4]에서 알 수 있다. 따라서 이러한 초전도선의 운동에 의한 국부적 퀀치가 코일 전체로의 전반을 방지하기 위해서는 초전도도체의 항복강도내에서 최대의 강한 권선장력으로 코일을 권선 해야 하며 본 0.7MJ

μ SMES 코일에서는 약 100 kgf 의 고 권선 장력을 인가했으며 식(2)로 계산하면 권선응력은 14.1 kgf/mm²이된다. 여기서 코일 운전시 자기력 및 권선장력 에 의해 초전도 케이블에 작용하는 최대 응력은 36.7kgf/mm²로써 Alsthom 9본 케이블의 항복강도와 비교해도 약 3.3 kgf/mm²정도 여유가 있음을 알 수 있다.

2.3 실험 및 결과

0.7MJ μ SMES 코일의 설계프로그램을 실험적 검증 및 제작된 μ SMES 코일의 특성을 실험하기 위해 이용된 장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

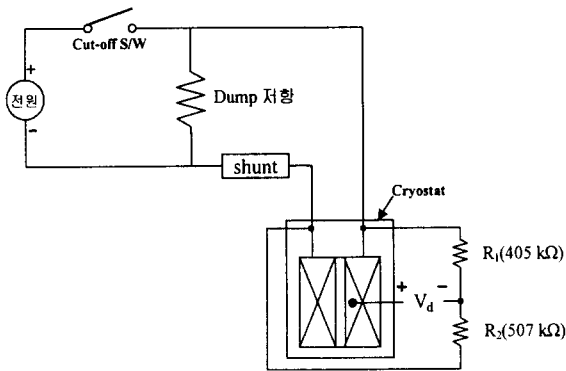


Fig.1 Schematic of the test apparatus

그림 1에서 V_d 는 초전도코일에 퀘치가 발생했을 경우 퀘치를 검출하기 위해 코일 양단 및 중간에 전압탭을 내어 두개의 저항과 병렬로 연결한 브리지 평형 회로의 퀘치 검출용 전압이다.

0.7MJ μ SMES 코일의 각종 특성 실험을 위해 사용한 전원으로는 3000A, 10V DC Power Supply를 사용하였으며, 코일에 흐르는 전류를 검출하기 위해서 3000A 50mV Shunt를 사용하였고, 퀘치시 전원으로부터 공급되는 전류를 차단하여 코일을 보호하기 위해 Cut-off S/W를 사용하여 외부 전원과 초전도 코일을 완전히 분리시켜 초전도 코일에 축적된 자계 에너지를 저항을 통해 소비시켜야 한다. 따라서 이 에너지를 소비 하기 위한 부하가 요구되며 이를 위해 Dump 저항을 초전도코일에 병렬로 연결하여 실험했다. 이때 감쇠 시정수는 코일의 인덕턴스 L 과 보호저항 R에 의해 결정되며 시정수를 줄이기 위해 보호저항을 크게 하면 액체헬륨 증발을 감소시키는데는 매우 유익한 반면 초전도코일의 급격한 전류 감소로 인해 유도되는 전압에 의해 절연파괴의 위험이 있기에 코일 양단에 인가할 수 있는 최대전압을 고려해 적절하게 선택해야 한다. 따라서 0.7MJ 초전도코일 실험에서는 코일의 인덕턴스가 0.58H임을 고려해 시정수를 약 1초로 해서 Dump 저항을 0.5Ω으로 설정하여 실험했다.

제작된 0.7MJ μ SMES 코일에 대해 설계 프로그램을 사용하여 계산한 인덕턴스값과 실제 LCR Meter(HP 4284A)로 측정된 값을 비교하기 위하

여 이들을 그림 2에 나타내었다.

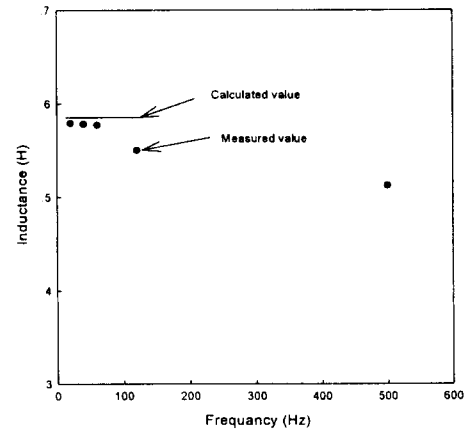


Fig.2 Inductance vs. frequency for the 0.7MJ μ SMES coil

그림 2 에서와 같이 실선은 프로그램으로 계산한 인덕턴스값인 0.58H이고, 검은 Dot로 표시된 것이 LCR Meter로 측정한 측정치로서 초전도코일의 운전모드가 거의 직류인 점을 고려해 LCR Meter의 최저 주파수인 20Hz부터 측정했다. 그림 2의 결과로부터 초전도코일의 운전모드인 저주파영역에서 즉 20Hz에서 60Hz까지는 계산치와 최대 6%이내의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다.

그리고 0.7MJ 초전도코일의 자장변화를 측정하기 위해 코일보빈 중앙 벽면에 Hall sensor(Lake Shore HGCA-3020)를 설치하여 코일의 최대 자계점에서 자계의 세기를 측정했다. 여기서도 마찬가지로 μ SMES 코일 설계 프로그램을 사용하여 계산한 자장과 Hall sensor를 사용해 측정된 자장을 비교하기 위해 이들을 그림 3에 나타내었다.

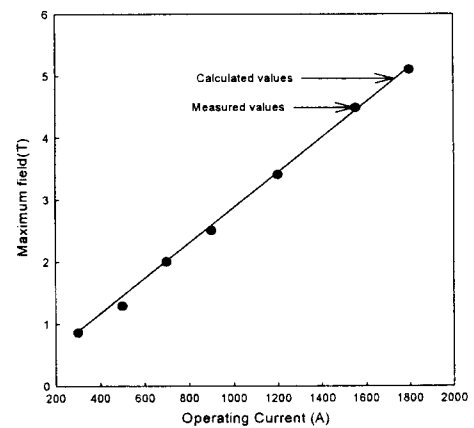


Fig.3 Maximum field vs. operating current for the 0.7MJ μ SMES coil

최대 1800A까지 여자 하면서 측정했으며, 특히 코일의 초기 여자시 자계의 시간변화에 의해 발생하는 교류손실에 의해 초전도코일이 조기퀘치되는 것을 방지를 위해 코일의 여자속도를 매우 완만한

0.03T/s, 즉 전류상승률 10A/s로 유지하였다. 그림 3에서 코일 설계 프로그램으로 계산된 자장값은 실선으로, Hall sensor에 의해 측정된 값은 검은 색 점으로 나타냈으며, 이들 결과로부터 계산치와 측정치 사이에는 최대 5% 정도의 오차를 보이고 있으므로 계산치와 측정치는 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 0.7MJ μ SMES 코일의 직류 특성시험을 위해 3000A, 10V 전원을 사용하여, 우선 운전전류를 전원의 최대 전류인 3000A에 설정한 후 10A/s 정도의 매우 완만한 전류상승률로 전류를 인가 시켰다. 그 결과 그림 4와 같이 약 1820A에서 퀘치가 발생했으며, 전류 상승률을 40A/s로 설정하고 전류를 인가 시켰을 경우는 그림 5와 같이 약 1450A에서 퀘치가 발생했고, 전류 상승률을 100A/s로 설정하고 전류를 인가했을 경우는 그림 6과 같이 약 1090A에서 퀘치가 발생했다. 그림에서 맨 밑의 곡선이 전류 파형이며 윗쪽의 파형은 코일의 양단전압 및 브리지회로의 양단 전압을 표시하고 있다.

실험에서 알 수 있듯이 전류 상승률이 느린 경우는 코일의 임계조건인 6.33T, 2200A의 약 82%에서 퀘치가 발생했으며 전류 상승률이 빠른 경우는 임계전류의 약 50%에서 퀘치가 발생했다.

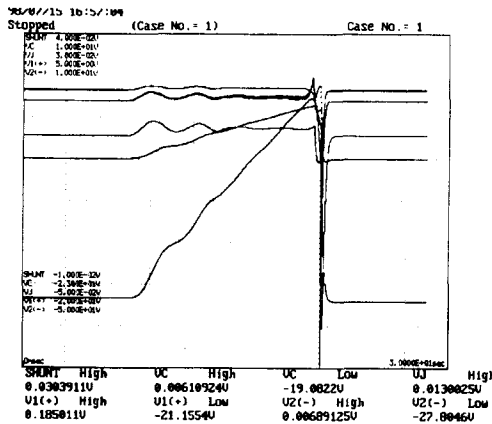


Fig.4 Quench current of the 0.7MJ μ SMES coil for a rate of 10A/s

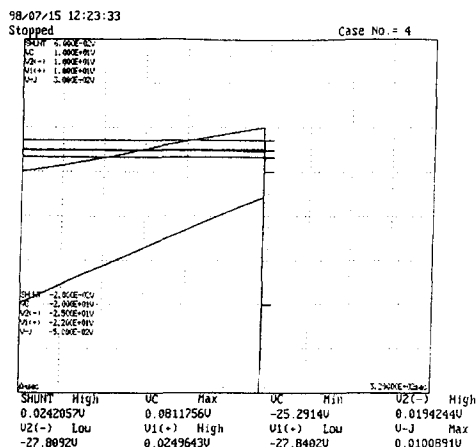


Fig.5 Quench current of the 0.7MJ μ SMES coil for a rate of 40A/s

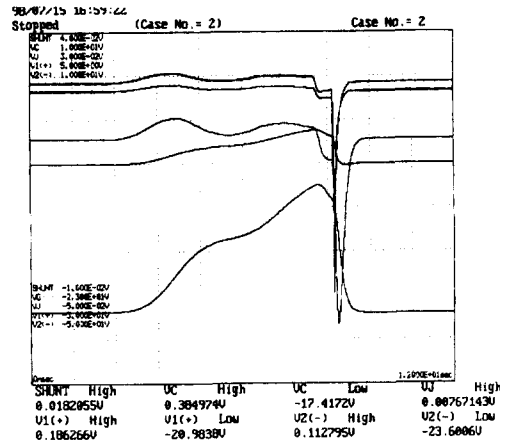


Fig.6 Quench current of the 0.7MJ μ SMES coil for a rate of 100A/s

3. 결 론

본 연구에서는 1MJ급 μ SMES 장치의 상용화와 관련하여 각종 요소기술의 확보에 중점을 두었으며 0.7MJ μ SMES 코일의 설계·제작 및 특성평가를 요약하면 다음과 같다.

- 1) μ SMES 코일의 설계 프로그램에 의해 계산된 인덕턴스와 자계를 측정된 값과 비교한 결과, 약 5% 정도의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다.
- 2) 여자속도에 따라서 코일의 퀘칭전류 열화가 발생됨을 알 수 있으며, 이는 0.7MJ μ SMES 코일 제작에 사용되어진 Alsthom 9본 케이블이 동비가 5로써 매우 크고, 동코아 구조로 되어 있어 급속 여자에 따른 과도한 교류손실에 의한 열화로 사료되며, 또한 μ SMES 코일과 같이 직경이 큰 초전도 코일에서는 자기력도 또한 대단히 크기 때문에 초전도선이 움직일 가능성이 커진 결과로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류강식의 26인, "UPS용 SMES의 소형초전도코일 및 전력변환기 요소기술 개발에 관한 중간보고서(1차년도)", 통상산업부, pp.87-100, 1996.
- [2] 류강식의 27인, "UPS용 SMES의 소형 초전도코일 및 전력변환기 요소기술 개발에 관한 중간보고서(2차년도)", 통상산업부, pp.208-227 1997.
- [3] Richard P. Reed, et al., "Materials At Low Temperatures", American Society for Metals, p.499, 1983.
- [4] 류경우, 김해중, "0.7MJ UPS용 초전도케이블의 퀘칭특성", 한국전기전자재료학회, Vol.11, No.7, pp.565-570, 1998.