6 kJ SMES 코일의 설계 및 퀜치특성

류경우*, 김해종**, 성기철**, 이언용**, 조전욱**, 진흥범**, 류강식**, 최병주***
* 전남대학교, ** 한국전기연구소, *** 서라벌대학교

Design and Quench Characteristics of a 6 kJ SMES Coil

K. Ryu*, H.J. Kim**, K.C. Seong**, E.Y. Lee**, J.W. Cho, H.B. Jin**, K.S. Ryu, B.J. Choi
* Chunnam National Uni., ** KERI, *** Sorabol College

Abstract - For the development of the 0.7 MJ small-sized superconducting magnetic energy storage (μSMES) device, quench currents of a kA class superconducting cable were tested for various winding tensions because a dry superconducting coil is usually quenched by an abrupt heat pulse due to strand motions. The test coil similar to parameters of the optimally designed 0.7 MJ μSMES except a stored energy and a size was fabricated based on the test results of the kA class superconducting cable and tested. These experimental results show that the highly prestressed test coil has an excellent DC performance in spite of a dry type coil but its quench current is much degraded even at the low field ramping rate of about 0.4 T/s.

1. 서 론

효율적인 전력 관리를 위해 초전도 자계 에너지 저장(SMES) 장치에 대한 연구가 수십년 동안 진행되어 오고 있다. 그 에너지 저장 용량도 수 MJ에서 수천 MWh에 이르기 까지 매우 다양하며, 특히 정밀 전기·전자 기기와 같은 민감한 전력 부하에 양질의 전력을 공급하는 기능을 하는 μSMES 장치의 개발에 대한 연구개발의 진전은 최근 이들의 상업화 단계까지 진행되고 있다.

양질의 전력을 공급하는 기능을 하는 μSMES 장치의 개발에 선행하여 저장 에너지가 주어지면 가장 작은 초전도 케이블을 사용해 제작 가능한 μSMES 장치의 설계 코드를 개발하여 0.7 MJ 장치를 설계하였으며, 설계 코드의 타당성의 확인 및 0.7 MJ μSMES 장치의 실제 제작·시험에서 표출될 각종 문제점들을 발견 및 보완하기 위하여 저장 에너지 및 사이즈를 제외하고는 0.7 MJ 장치와 그 특성이 거의 같은 시험 코일을 설계하여 특히 다음의 두가지 관점에 중점을 두고 제작·시험하였다. 비함침 코일에서 퀜치는 보편적으로 초전도선의 운동에 의한 작은 발열이 주된 원인으로 알려져 있기 때문에 권선시 장력을 매우 크게 하였으며[1], μSMES 장치의 운전 모드를 고려하여 급속 충·방전에 따른 퀜치특성을 조사하였다.

2. 초전도 케이블 및 시험 코일

μSMES 장치에 사용할 수 kA급 초전도 케이블의 선정시 급속 충·방전에 동반되는 교류손실보다는 장치의 안정성에 중점을 두고 선정하였으며, 그 단면은 사각형으로 초전도선간에는 절연이 되지 않는 9본의 초전도선으로 구성되어 있다. 또한 턴간의 전기절연을 위하여 두께 25 ㎛, 폭 10 mm의 Kapton 태이프를 나선형으로 감았으며 그 단면을 그림1에 나타내었다.

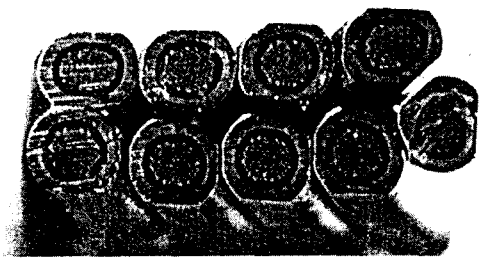

그림1 초전도 케이블의 단면도

그림1에서 각각의 초전도선은 5712개의 직경 5 ㎛인 NbTi 필라멘트와 NbTi:CuNi:Cu=1:1:5의 조성으로 되어있으며, 중심부의 동은 고저항의 CuNi장벽으로 구분되어있으나 원주 근처의 동은 CuNi장벽으로 구분되어있지 않는 구조를 갖고 있어 안정성에 중점을 둔 초전도선이라 할 수 있으며 표1에 그 사양을 나타내었다.

표1 초전도 케이블의 사양

Wire	Cu/CuNi/NbTi Ratio		5/1/1
	RRR		120
	Diameter		1.0 mm
	Filament diameter		5 μm
	Number of filaments		5,712
	Filament twist pitch		19.5 mm
	Filament twist direction		Right
	Yield strength		40×10^{6} kgf/m^{2}
	Insulation		Bare
Cable	Width		4.8 mm
	Thickness		1.8 mm
	Number of strands		9
	Transpostion pitch		45.0 mm
	Transposition direction		Left
	Insulation	Material	Kapton tape
		Thickness	25 μm
		Width	10 mm

또한 권선장력이 퀜치전류에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림1의 약 1.6 m 길이의 초전도 케이블을 직경 50 mm의 베크라이트 보빈에 권선피치를 10 mm,

권선방향을 Z형으로, 권선장력은 25 N/mm²에서 권선기의 최대 장력인 140 N/mm²의 범위에 걸쳐 서로 달리하여 시험 샘플을 준비하였다.

시험 코일의 제작은 개발된 코드를 이용한 설계 결과에 따라 보빈 재료는 기계적으로 충분히 강한 FRP로 하였으며, 교류손실 및 초전도선의 운동에 의한 손실을 효과적으로 냉각하기 위해 폭 5 mm, 두께 1 mm의 FRP 스페이서를 층간에 두었으며, 충·방전시 초전도선의 여자에 의해 발생되는 자기력에 의한 움동을 방지하기 위해 권선기의 한계 장력인 약 138 N/mm²로 강하게 권선하였으며, 최외층에는 아무런 보강재도 설치하지 않았다. 이와 같이 제작된 시험 코일의 임계전류 및 임계자계는 각각 2170 A 및 6.52 T이며, 그림2에 조립된 시험 코일의 사진을, 표2에 그 주요 사양을 각각 나타내었다.

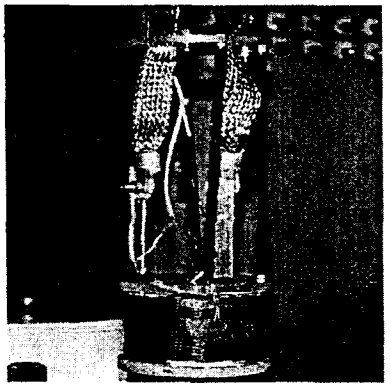

그림2 조립된 시험 코일의 사진

표2 시험 코일의 사양

Inner diameter	60 mm
Outer diameter	152 mm
Length	100 mm
Number of layers	16
Number of turns a layer	20
Thickness of the FRP spacer	1 mm
Winding prestress	138 N/mm²
Inductancce	5.33 mH
Coil constant at center	353.8 A/T
Coil critical current	2170 A
Coil critical field	6.52 T

인덕턴스 및 저장 에너지가 작은 시험 샘플의 경우는 퀜치가 발생해도 샘플의 소손 위험성이 작아 비교적 시험이 용이한 반면, 이들이 큰 시험 코일의 경우는 퀜치시 코일의 저장 에너지를 저온부 밖에서 방출시키는 덤프 저항이 반드시 요구되며, 3000 A를 수초간 흘릴 수 있고, 그 저항을 7 mΩ에서 70 mΩ까지 가변시킬 수 있는 덤프 저항을 제작하였다. 또한 가능한 한 가장 민감한 감도로 퀜치를 감지하기 위해 브리지회로를 채택하였으며, 브리지회로의 저항을 R_1=10 kΩ 및 R_2=9.1 kΩ으로 각각 대단히 크게하여 브리지회로가 전원에 대해 부하가 되지않토록 하였으며, 코일의 시험시 브리지 평형조건 아래서 브리지 양단전압은 수 백 μV로 감도가 대단히 우수함을 확인하였으며, 그림3에 코일에 대한 시험장치의 개략도를 나타내었다.

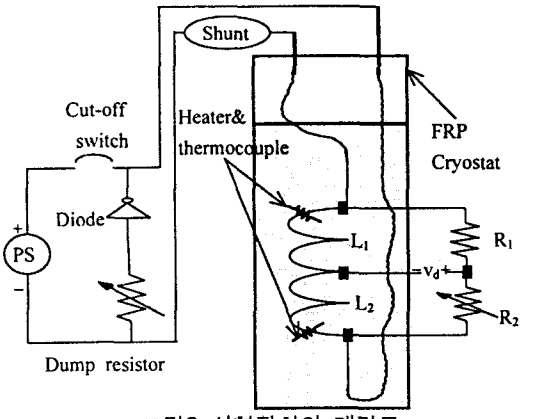

그림3 시험장치의 개략도

3. 시험 결과 및 토론

μSMES 장치에 사용될 초전도 케이블의 기초 특성을 조사하기 위해 여러 가지의 권선장력으로 권선한 시험 샘플의 퀜치전류를 측정하였으며, 그 결과를 그림4에 나타내었다.

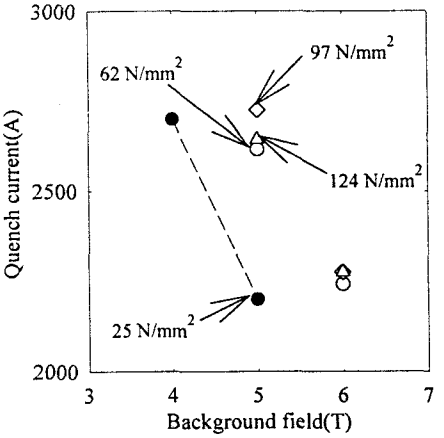

그림4 권선장력에 따른 초전도 케이블의 퀜치전류 - 외부자계 관계

시험 결과에서 권선장력이 25 N/mm²인 경우, 특히 초전도 케이블의 퀜치전류는 이보다 큰 장력으로 권선된 시험 샘플과 비교해 대단히 열화되는 것을 알 수 있다. 샘플과 동일한 구조의 솔레노이드형 코일에서 각 턴에 작용되는 자기 후프 스트레스는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\sigma = JBR \ (N/m^2)$$

여기서 J는 전류밀도, B는 외부자계, R은 각 턴의 반경이다. 시험 샘플의 보빈 반경이 R=25 mm, 외부자계 B=5 T, 5 T의 외부자계에 대한 퀜치전류를 고려하면 J= 353 A/m²로 이들을 상기 식에 대입하면 샘플의 자기 후프 스트레스는 45 N/mm²로 권선장력 즉 25 N/mm²보다 큼을 알 수 있다. 이는 충·방전시 초전도선의 운동이 가능함을 의미하며, 이에 의한 발열에 의해 퀜치전류의 열화가 발생되는 것으로 사료된다.

또한 시험 샘플의 퀜치전류의 열화 정도를 양적적으로 계량하기 위하여 임계전류도 0.1 μV/cm를 기준으로 측정하였으며, 샘플 시험 결과에 근거하여 권선기의 한계 권선장력인 138 N/mm²로 제작한 시험 코일에 대해 직류 및 펄스 퀜치특성을 조사하였으며, 그 결과를 그림5

에 나타내었다.

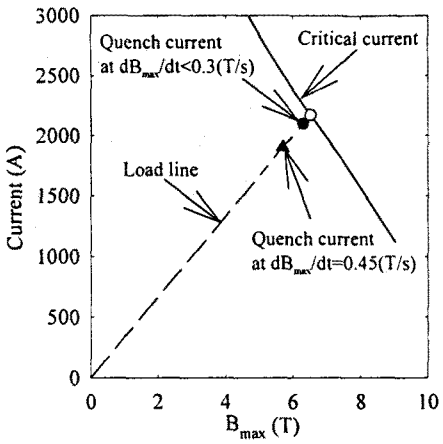

그림5 시험 코일의 부하선 및 초전도 케이블의 임계전류

시험 코일의 직류 퀜치특성을 시험하기 위해 운전전류를 전원 장치의 한계인 3000 A로 고정하고 매우 느린 0.05 T/s의 여자속도로 여자를 했을 때 2130 A에서 시험 코일은 퀜치되었으며, 특히 비함침 코일에서 일반적으로 나타나는 training효과가 없었다. 시험 코일의 퀜치전류 즉 2130 A는 코일내 최대자계 즉 6.4 T에 대응되는 운전전류로써 표2의 코일 임계자계 즉 6.52 T에 거의 육박함을 알 수 있다. 직류 퀜치시험에서 브리지 양단전압에는 초전도선의 운동에 의한 전압스파이크가 관찰되지 않았으며, 이와 같은 시험 결과는 코일의 우수한 직류 퀜치특성이 제작시 인가한 138 N/mm^{2}의 고권선 장력에 의해 코일의 여자시 발생되는 자기력에 의한 초전도선의 운동이 억제된 결과임을 의미한다.

시험 코일의 펄스 퀜치특성을 조사하기 위해 시험 코일의 여자속도를 0.05 T/s에서부터 점진적으로 증가시키며 코일의 퀜치전류를 측정하였다. 0.3 T/s까지의 여자속도 범위에서는 직류 퀜치전류 값인 2130 A에서 퀜치되었으나, 전원의 한계 여자속도인 0.45 T/s에서는 1890 A에서 시험 코일이 퀜치되었으며, 이 퀜치전류는 코일의 임계전류 즉 2170 A의 약 87 %정도의 전류이다. 펄스 퀜치특성 시험에서도 직류시험 때와 마찬가지로 브리지 양단전압에는 전압스파이크가 관찰 되지않았다. 이와 같은 시험 결과 및 참고문헌 [2]의 시험 결과 중 600 A/s의 급속 충·방전하에서도 시험 샘플의 퀜치전류가 열화되지 않는 것은 시험 코일의 펄스 퀜치전류의 열화는 코일의 충·방전시 발생되는 교류손실에 의한 과도한 온도상승이 야기되어 임계전류를 감소시킨 결과임을 의미하며, 0.3 T/s까지의 여자속도 범위에서 시험 코일이 퀜치되지 않는 것은 충·방전시 발생되는 교류 손실이 냉각 채널내의 액체헬륨으로도 충분히 잘 냉각됨을 의미하고 있다.

4. 결론

0.7 MJ μSMES 장치의 제작 및 시험과 관련하여 전단계에서 요구되는 중요 요소기술인 SMES 장치의 설계 코드를 개발하였으며[3], 이 코드의 타당성을 입증하기 위해 시험 코일을 제작 및 시험한 결과 설계 코드의 결과와 시험 결과가 잘일치 하였으며[4], SMES 장치의 보호를 위해 수 초간 수 천 A를 흘릴 수 있는 덤프 저항 및 급속 충·방전 운전에서도 수 백 μV의 감도로 SMES 장치의 퀜치를 감지할 수 있는 퀜치 검출기를 개발하였다.

또한 μSMES 장치에 사용될 수 kA급의 초전도 케이블에 대한 퀜치전류와 권선장력간의 시험 결과로부터 SMES 장치의 제작시 인가하는 권선장력은 충·방전시 발생되는 자기력보다는 최소한 커야만 초전도선의 운동을 억제시킬 수 있어, 운전 전류밀도의 향상 효과를 가져와 SMES 장치의 소형·경량화를 달성할 수 있음을 확인했다.

시험 샘플에 대한 결과에 근거하여 권선기의 한계 장력인 138 N/mm^{2}로 매우 큰 권선 장력으로 제작된 시험 코일을 시험한 결과, 충·방전시 발생되는 교류손실을 효과적으로 냉각시키기 위해 설치하는 냉각 채널을 갖는 구조의 SMES 장치라 할지라도 권선장력이 자기력보다 크게만 해주면 코일의 임계전류까지도 운전전류를 향상시킬 수 있음을 시험 코일에서 확인했다.

그러나 μSMES 장치의 응용에서 중요 운전 모드는 펄스운전으로써 시험 코일의 펄스 퀜치특성을 조사한 결과로부터 0.45 T/s의 여자속도에서도 코일 임계전류의 87 %에서 퀜치되는 문제가 발생하였다. 이는 급속 충·방전시 발생되는 교류손실에 의한 과도한 온도상승이 주요 원인임을 확인했고, 이는 서론에서 지적한 바와 같이 0.7 MJ μSMES 장치에 사용할 초전도 케이블의 선정시 SMES 장치의 손실보다는 안정성에 지나치게 강조한 결과 동비가 지나치게 클 뿐만아니라 초전도선의 원주 주위에 있는 동을 고저항의 CuNi 장벽으로 구분하지 않은 결과 코일의 충·방전시 펄스 외부자계에 의해 발생되는 초전도선 사이의 결합손실이 과대하게 커진 결과 때문이며 이 결합손실을 저감시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 μSMES 장치의 상요화 기술에서 매우 필요하다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnet, Plenum, pp.268-273, 1994

[2] 류 경우, 김해종, "0.7 MJ UPS용 초전도 케이블의 퀜치특성", 전기전자재료학회지에 게재 중

[3] 류강식, 진홍범, 류 경우, 정승기외 다수, UPS용 SMES의 소형 초전도 코일 및 전력변환기 요소기술 개발에 관한 중간보고서(2차년도), 통산산업부, pp.208-227, 1997

[4] 류 경우, 김해종, 성기철, 류강식, "고권선 장력 초전도 코일의 특성", 전기학회논문지에 투고 중