

0.7 MJ μ SMES코일 제작을 위한 소형 초전도코일의 특성

論 文
48B-1-3

Characteristics of a Small SC Coil for fabrication of the 0.7 MJ μ SMES Coil

柳 炘 佑*, 金海鍾**, 成者哲***, 柳康植[§]
(Kyung-Woo Ryu, Hae-Jong Kim, Ki-Chul Seong, Kang-Sik Ryu)

Abstract - To fabricate a 0.7 MJ, 100 kVA μ SMES device for improving power quality in sensitive electric loads, we developed a design code for a μ SMES device and designed the 0.7 MJ μ SMES device by using it. In this study special emphasis was placed in influence of winding tensions on quench currents of superconducting coils because dry superconducting coils are usually quenched by local disturbances due to strand motions. We first investigated the quench currents of a few kA class superconducting cables for various winding tensions experimentally. To prove the validity of the code and develop all techniques related to fabrication and test of the 0.7 MJ μ SMES device, a smaller size superconducting coil was wound with high winding tension of about 15 kgf/mm² based on the test results of superconducting cables and tested. It is shown from the test results that designed parameters for the smaller size superconducting coil are in good agreements with measured ones and the quench current of the coil with high winding tension reaches nearly to the critical current of the superconducting cable without any training effects.

Key Words : μ SMES, Power Quality, Dry Superconducting Coil, Winding Tension, Quench Current, Training Effect

1. 서론

효율적인 전력 관리를 위하여 초전도 자계에너지 저장(Superconducting Magnetic Energy Storage: 이하 SMES라 함) 시스템에 대한 연구가 최근 수 십년 동안 미국, 유럽 및 일본등 세계 각국에서 진행되어 왔다. 이들 SMES 시스템의 주요 응용 분야로써는 정보 기기, 제어 장치 및 정밀 전기·전자 기기와 같은 민감한 산업용 전력 부하에 양질의 전력을 공급하기 위해 최근 미국에서 상용화된 바가 있는 저장 에너지가 수 MJ이하의 소형 SMES 장치(이하 μ SMES라 함)에서부터 전력 계통의 주·야간 부하 평준화를 그 목적으로 하는 수 천 MWh급의 대형 SMES 장치에 이르기까지 매우 다양하다고 말할 수 있다. 초전도 자계에너지 저장 시스템에 대한 연구의 한 일환으로 2년 전부터 국내에서도 전력의 질에 대단히 민감한 산업용 전력 부하에 대하여 양질의 전력을 공급하는 기능을 갖는 0.7 MJ급 μ SMES 장치 및 켄치 검출 기능을 내장한 100 kVA급 전력 변환기의 개발을 목표로 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 급속한 자계에너지의 충·방전이 가능한 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 제작 및 개발을 위하여, 먼저 μ SMES 장치의 저장 에너지가 주어질 때 최소량의 초전도체를 사용하여 제작할 수 있는 최적의 초전도 자계에너지 저장 장치를 설계할

수 있는 코드를 개발하였으며, 이 설계 코드를 이용해 본 연구·개발의 목표인 0.7 MJ급 μ SMES 장치에 대한 설계를 완료하였다. 그리고 특히 급속한 자계에너지의 충·방전이 요구되는 펄스용 μ SMES 장치에 대한 설계 및 제작에서는 충·방전시 발생하는 교류 손실을 효과적으로 냉각시키기 위하여 초전도 코일 내부에 냉각 채널을 두는 비합침 방식의 코일(Dry Superconducting Coil)구조가 일반적이며, 이와 같은 구조의 초전도 코일에서 켄치는 초전도선의 운동으로 인하여 발생하는 국부적 마찰 발열이 그 중요 원인으로 작용한다. 따라서 초전도선의 운동과 밀접한 관계를 가지는 권선 장력이 초전도 케이블 및 코일의 켄치 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으며, 시험 대상 케이블로써는 0.7 MJ급 μ SMES 장치 제작에 사용할 전류 용량이 수 kA급인 초전도 케이블을 그 대상으로 하였다. 또한 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 제작 및 운전에 선행하여 장치 설계 코드의 타당성 입증 및 장치 개발에 관련된 각종 요소 기술들을 확보하기 위하여 제작할 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 특성과 매우 흡사한 소형 초전도 코일을 제작하여 코일의 직류 및 펄스 특성을 조사함으로써 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 제작·운전에 관련된 데이터를 도출하였다.

2. 코일 설계 및 제작

UPS용 SMES의 소형 초전도 코일 및 전력 변환기 요소 기술 개발에 관한 연구에서 이미 코드화된 자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램을 이용하여[1], 본 연구·개발의 목표인 0.7 MJ, 100 kVA UPS용 초전도 코일을 설계하였다[2]. 또한 0.7 MJ 초전도 코일의 실제 제작 및 운전에 선행하여, 개발된 자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램에 대한

* 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 助敎授·工博
** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 超傳導應用研究事業팀 研究員
*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 超傳導應用研究事業팀 Part장
[§] 正 會 員 : 韓國電氣研究所 超傳導應用研究事業팀 팀장·工博
接受日字 : 1998年 5月 11日
最終完了 : 1998年 11月 2日

실험 적 입증 및 0.7 MJ 초전도 코일의 제작·운전과 관련하여 요구되는 각종 시험 데이터의 사전 도출을 목적으로 코일의 저장 에너지는 작지만, 실제의 0.7 MJ 초전도 코일과 비교해 구조 및 코일 특성(즉 1773 A의 운전 전류에서 최대 자계가 4.5 T등)이 매우 유사한 초전도 코일(이하 소형 코일이라 함)을 설계하였으며 표1에 그 상세 사양을 나타내었다.

표 1 소형 코일의 사양
Table 1 Specifications of the small coil

재원	코일	내경	60 mm	
		외경	152.1 mm	
		높이	100 mm	
		도체 분율	66.7%	
	초전도 케이블	폭	폭	4.88 mm
			두께	1.88 mm
		절연 테이프	재료	Kapton
			두께	25 μ m
			폭	10 mm
		층수	16 층	
		턴수/1층	20 턴	
		총 턴수	320 턴	
	총 케이블 길이	105.6 m		
	스페이서	재료	FRP	
폭		5 mm		
두께		1 mm		
층수		16 층		
스페이서 수/1층		15 개		
코일 특성	총 스페이서 수	240 개		
	저장 에너지	6 kJ		
	인덕턴스	5.33 mH		
	운전 전류	1500 A		
	최대 자계	4.51 T		
	중심 자계	4.24 T		
임계 조건	2,170 A 6.52 T			

표1에서 초전도 케이블을 구성하는 초전도 선은 그 단면 중심부에는 고저항의 CuNi장벽으로 분할된 다량의 동(즉 Cu/NbTi=5/1)이 존재하는 반면 외부에는 CuNi장벽으로 분할되지 않은 소량의 동이 존재하는 동 코어(Cu core)구조를 갖고 있어 본질적으로 손실 측면보다는 안정성에 치중한 직경 1 mm의 초전도 선이며, 초전도 케이블은 이들 초전도선 9본을 케이블 화시켜 Kapton테이프로 전기 절연을 한 Alsthom사 제품(이하 Alsthom 9본 케이블이라 함)으로써, 이는 0.7 MJ 초전도 코일에 사용될 수 kA급의 초전도 케이블이다. 또한 초전도 코일의 층·방전 운전에서 발생하는 교류 손실을 효과적으로 제거하기 위해 설치하는 스페이서으로써는 코일 권선시 인가되는 권선 장력과 코일 여자시 발생하는 자기력에 대해 기계적으로 충분히 강한 FRP를 선정하였으며, 참고문헌[2]의 결과에 근거하여 Alsthom 9본 케이블의 초전도 선에 대해 예상되는 최소전파길이(Minimum propagation zone)가 약 25 mm임을 고려해 그 폭을 5 mm로, 그 두께는 참고문헌[3]등의 조사·분석 결과를 참고하여 1 mm로 하였으며, 코일 최내층의 초전도 케이블을 효과적으로 냉각시키기 위해 소형 코일 제작시 보빈 상부에 스페이서를 1층 설치하였다.

코일의 여자시 초전도 케이블의 권선 방향 즉 길이 방향으로

작용하는 응력으로써는 코일의 축 방향 자계 및 권선 방향 전류에 의한 자기력(σ_m), 코일 권선시 인가하는 권선 장력(σ_w) 및 코일의 냉각시 발생하는 초전도 케이블의 열 수축에 기인하는 힘을 들 수 있으며, 초전도 코일의 각 턴에 작용하는 자기력 및 권선 장력에 의한 응력은 각각 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_m &= (J_\phi B_z R) / 9.8 \quad (\text{kgf/mm}^2) \\ \sigma_w &= T / A \quad (\text{kgf/mm}^2) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 J_ϕ 는 권선 방향 전류(A), B_z 는 축 방향 자계(T), R 은 초전도 코일의 각 턴의 반경(m), T 는 권선 장력(kgf), A 는 초전도 케이블의 단면적(m^2)을 각각 나타낸다. 설계된 표1의 소형 코일에서 코일이 이상적으로 제작되어 퀵치가 발생되지 않고 임계 조건 즉 6.52 T에서 2170 A의 통전이 가능하다고 할 때 소형 코일에서 예상되는 최대 자기 응력은 표1의 데이터 즉 $A=7.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $I_{op}=2170 \text{ A}$, $B_z=6.52 \text{ T}$, $R=76 \times 10^{-3} \text{ m}$, $J_\phi = I_{op}/A = 3.07 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 및 식(1)을 사용하면 $\sigma_m=15.5 \text{ kgf/mm}^2$ 로써 Alsthom 9본 케이블에 대한 Alsthom사의 항복 강도 데이터 즉 40 kgf/mm^2 와 비교해 약 40 %정도임을 알 수 있다.

또한 소형 코일의 단면 내에는 초전도 케이블뿐만 아니라 액체 헬륨의 공간도 존재하게 됨으로 따라서 상기와 같은 강한 자기력에 의해 초전도 케이블을 구성하는 초전도 선의 운동 가능성은 크다. 이와 같은 초전도선의 운동으로 인한 마찰 발열에 의해 초전도 코일 및 케이블의 퀵치 전류는 열화될 수 있으며, 이에 대한 실험적 연구 결과[4]에서도 명백한 퀵치 전류의 열화가 관찰된 바 있다. 따라서 초전도 케이블의 항복 강도 한계 내에서 가능한 한 강한 권선 장력을 인가해 초전도 선의 운동에 의한 퀵치를 방지시켜야 하며, 본 소형 코일의 제작에는 보유하고 있는 권선기의 최대 한계 장력인 100 kgf 즉 $\sigma_w=14.1 \text{ kgf/mm}^2$ 로 권선 하였으며, 코일 운전시 자기력 및 권선 장력에 의해 초전도 케이블에 작용하는 최대 총 응력은 29.6 kgf/mm^2 로써 Alsthom 9본 케이블의 항복 강도인 40 kgf/mm^2 와 비교해 약 74 %정도로 소형 코일에 있어서는 아직 약 26 %의 여유가 있음을 알 수 있다. 소형 코일의 운전시 앞서 지적한 반경 방향의 운동뿐만 아니라 코일 축방향의 자기력에 의한 운동을 억제시키기 위해서 권선시 큰 압축력을 인가했으며, 동시에 코일 권선시 어쩔 수 없이 발생하는 공간은 에폭시-유리천 테이프로 채워 초전도 선의 운동을 가능한 한 억제시켰다.

3. 시험 방법

3.1. 퀵치 검출 회로

수 미터의 짧은 초전도 선 또는 케이블로 만들어진 샘플 시험에 있어서 퀵치 검출은 샘플의 인덕턴스가 매우 작아 유도성 전압이 대단히 작을 뿐 아니라 전압탭의 신호선을 초전도 선 또는 케이블과 평행하게 권선(Bifilarly)하여 샘플에 유도된 전압을 상쇄시키는 것이 가능한 구조이다. 따라서 전압탭의 양단에 나타나는 전압은 퀵치에 의해 발생된 상전도부 저항에 의한 전압 강하가 됨으로 퀵치의 검출이 용이한 반면, 소형 코일에서 처럼 수백 턴으로 구성되는 초전도 코일의 시험에서는 인덕턴스도 대단히 클 뿐만 아니라 코일에 유도된 전압을 상쇄시키도록 전압탭의 신호선을 권선하기가 거의 불가능한 구조이다. 따라서 초

전도 코일의 시험에 있어서는 퀘치를 검출할 수 있는 방법의 고안은 필수 불가결하고, 가장 일반적인 방법으로써는 코일 양단 및 중간 정도에 전압탭을 내어 두 개의 고 저항과 병렬로 연결한 브리지 회로로써 그림1과 같다.

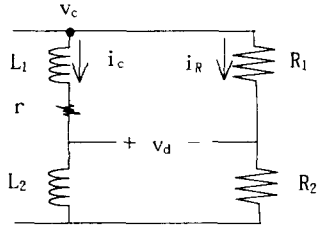


그림 1 퀘치 검출 회로
Fig. 1 Quench detection circuit

그림1에서 L₁, L₂는 초전도 코일의 중간 전압탭에 의해 분리된 두 코일의 인덕턴스로서 분리된 두 코일간의 상호 인덕턴스를 포함한 것이며, r은 초전도 코일의 퀘치에 의해 발생하는 상전도부 저항 또는 교류 손실에 의한 등가 저항이며, R₁, R₂는 검출 저항, v_c, i_c는 각각 코일 양단 전압 및 전류를 나타낸다. 먼저 퀘치 검출 회로에서 검출 저항에 흐르는 전류(i_R)는 식(2)로 나타낼 수 있으며,

$$i_R = \frac{v_c}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

코일 전원에 의하여 검출 저항으로 전류가 흘러 전원의 부하로 작용하지 않도록 하기 위해서는 가능한 한 검출 저항의 크기를 크게 해 주어야함을 알 수 있다. 또한 저항 r이 각각 L₁ 또는 L₂에 발생했을 때 검출 전압(v_d)은 식(3)로 나타낼 수 있으며,

$$v_d = \frac{-R_2}{R_1 + R_2} r i_c + (-L_1 R_2 + L_2 R_1) \frac{di_c}{dt} \quad (3)$$

또는

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_2} r i_c + (-L_1 R_2 + L_2 R_1) \frac{di_c}{dt}$$

식(3)의 검출 전압에서 제2항의 유도성 전압을 상쇄시켜 즉 L₁R₂=L₂R₁인 조건(이하 브리지 평형 조건이라 함)을 만족시켜 주면 검출 전압에는 저항 r에 의한 저항성 전압만 남게 되고 따라서 코일의 퀘치에 의해 발생하는 저항 r의 발생 위치에 관계없이 브리지 평형 상태에서 검출되는 전압으로부터 초전도 코일의 퀘치에 의한 상전도부 저항의 성장 과정 및 퀘치 여부를 알 수 있다. 또한 식(3)으로부터 브리지 평형 상태에서도 저항 r의 발생 위치에 따라 검출 전압의 극성 및 크기가 상이하며 중간 전압탭으로 분리된 두 코일의 어느곳에 퀘치가 발생하여도 동일한 검출 전압의 감도를 유지하기 위해서는 코일 제작시 L₁이 L₂와 거의 같아지는 위치에 중간 전압탭을 내는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이를 고려하여 본 소형 코일의 제작시 L₁이 L₂와 거의 같아지는 중간 전압탭의 위치를 결정하기 위해 초전도 코일의 설계 프로그램을 이용하여 검토한 결과 11층의 제 1턴에 중간 전압탭을 낼 경우 두 코일의 인덕턴스는 각각 L₁=2.80 mH, L₂=2.53 mH로 거의 같아지게 되고, 동일한 검출 전압의 감도를

유지하기 위해 소형 코일의 제작시 11층의 제 1턴에 중간 전압탭을 설치하였다.

3.2. 시험 방법

자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램에 대한 실험적 입증 및 0.7 MJ 초전도 코일의 제작·운전과 관련하여 요구되는 각종 실험 데이터의 사전 도출을 목적으로 제작된 소형 코일의 특성 시험에 이용된 장치의 개략도는 그림2와 같다.

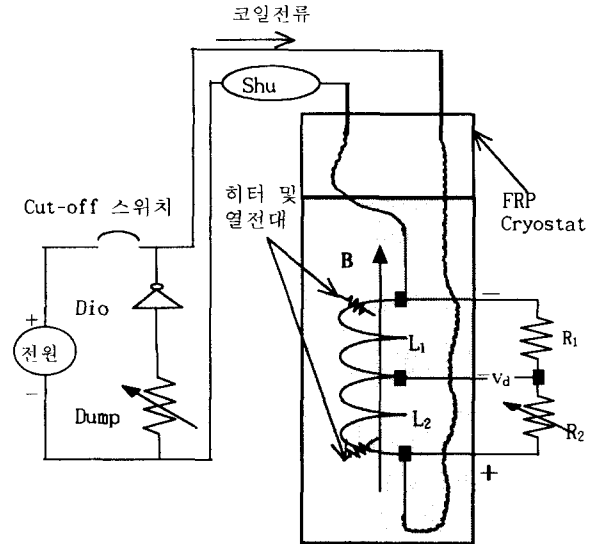


그림 2 시험장치 개략도
Fig. 2 Schematic of the test apparatus

소형 코일의 특성 시험에서 코일에 퀘치가 발생되었을 때 외부 전원으로부터 공급되는 전류를 차단하여 어떤 조치를 취하지 않으면 발생한 상전도부가 초전도 코일 전체로 전파되어 다량의 액체 헬륨을 증발시킬 뿐만 아니라 코일이 소손될수도 있다. 이와 같은 것들을 이론적으로 예측하는데 일반적으로 이용되는 초전도 코일의 퀘치시 코일의 냉각을 무시한 가장 열악한 냉각 조건인 단열 상태를 가정하면 초전도 코일의 최대 온도 상승(T_{max}) 및 코일의 퀘치시 액체 헬륨의 증발량의 척도가 되는 Dump효율(η)은 각각 식(4) 및 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\int_{t_0}^{t_m} i_c^2 dt = A^2 \int_{T_0}^{T_{max}} \frac{C(T)}{\rho(T)} dT \quad (4)$$

$$\eta = \frac{W-E}{W}, \quad E = \int_{t_0}^{t_m} r i_c^2 dt, \quad W = \frac{1}{2} L i_c^2(0), \quad (5)$$

여기서 t₀는 최초 퀘치 출현 시각, i_c는 코일 전류, t_m은 i_c가 0로 되는 시각, A는 초전도 케이블의 단면적, T₀는 t₀에서 초전도 케이블의 온도 즉 4.2 K, C(T)는 유효 체적 비열, ρ(T)는 유효 저항율, T_{max}는 t_m에서 초전도 케이블의 온도으로써 코일에서 최대 온도가 되고, r은 코일의 퀘치시 발생하는 저항, E는 퀘치시 코일에서 소비되는 에너지로써 액체 헬륨 증발의 원인이 되며, L은 코일의 인덕턴스, i_c(0)는 t₀에서 코일 전류 및 W는 t₀에서 코일에 축적된 자계에너지를 각각 나타

낸다. 식(4) 및 (5)로부터 코일 전류를 가능한 한 빨리 0로 만들수록 코일의 최대 온도 상승 및 액체 헬륨의 증발을 작게 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 초전도 코일의 시험 중 3.1절에서 소개한 코일의 켄치 검출 회로를 이용하여 켄치가 검출되는 즉시 외부 전원을 차단시켜주면 코일에 흐르는 전류는 감소하게 되고 그림2에 표시한 코일 양단 전압의 극성이 반대로 되어 Diode가 On상태로 된다. 이 때 Cut-off스위치를 Off시켜주지 않으면 일반적으로 외부 전원은 전력용 반도체 소자로 구성되어 있어 거의 단락 상태에 가까운 반면 On상태의 Diode와 직렬로 연결된 Dump저항은 이에 비해 비교적 큰 저항이기 때문에 초전도 코일에 축적된 자계에너지는 전원을 통해 방전이 된다. 이와 같은 단락 상태의 전원을 통한 방전에서 초전도 코일에 야기되는 문제는 코일의 인덕턴스는 일반적으로 큰 반면 전원의 저항이 대단히 작아 코일의 자계에너지 방출 시간이 매우 길어지며, 켄치시 앞서 지적한 다량의 액체 헬륨 증발과 코일의 소손 문제는 여전히 남게된다. 따라서 Cut-off스위치를 Off시켜 외부 전원과 초전도 코일을 완전히 분리시키면 초전도 코일에 축적된 자계에너지는 저항이 비교적 큰 Dump저항을 통해 방전이 되고, 이와 같은 방전에서는 물론 코일의 전기 절연 능력의 한계로부터 Dump저항의 최대 크기가 제한되지만 Dump저항의 크기를 한계 범위 내에서 임의적으로 가변시킬 수 있다. 그러므로 코일의 전류 감소 즉 자계에너지 방출 시간을 자유로이 제어하여 코일의 최대 온도 상승 및 액체 헬륨 증발을 억제함으로써 켄치시 앞서 지적한 다량의 액체 헬륨 증발 및 코일의 소손 문제를 해결할 수 있다.

표1에서 나타낸 소형 코일의 특성으로부터 알 수 있는 바와 같이 소형 코일이 이상적으로 제작되었을 때 코일에 흘릴 수 있는 최대 전류가 2170 A임을 고려하여 그림2의 시험장치에서 먼저 코일에 흐르는 전류를 측정하는 Shunt는 3000 A, 50 mV를, 코일이 켄치되어 외부 전원을 차단할 때 코일에 축적된 자계에너지의 방출 경로를 만들어 주는 Diode는 3000 A, 0.8 V를 사용하였다. 또한 코일에 축적된 자계에너지를 소비하는 Dump저항은 약 수 초간 2000 A의 전류를 흘려도 용융되지 않도록 설계·제작하였으며, 또한 표1에서 소형 코일의 인덕턴스가 5.33 mH임을 고려해 7 mΩ에서 70 mΩ까지 가변시킬 수 있도록 하였다.

4. 시험 결과 및 검토

자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램을 이용하여 계산된 소형 코일의 인덕턴스와 측정된 인덕턴스 값을 비교하기 위해 먼저 발전기의 주파수가 20 Hz - 1 MHz 사이인 LCR미터 (HP Model 4284A)를 사용하여 인덕턴스를 측정하였으며 그 결과를 그림3에 나타내었다. 소형 코일의 인덕턴스 측정에서 발전기 주파수는 0.7 MJ, 100 kVA 초전도 코일의 운전 모드가 직류 또는 수십 mHz 정도로 매우 낮은 주파수임을 고려하여 LCR미터의 최저 발전기 주파수인 20 Hz에서부터 측정하였다. 그림3에서 측정된 인덕턴스 값은 상온에서 LCR미터로 측정된 소형 코일의 임피던스가 매우 작아 직렬 측정 모드로 측정된 값이며, 측정 조건이 바뀔 때마다 코일의 인덕턴스를 제외한 각종 에러 인덕턴스를 배제시키기 위해서 LCR미터의 자체 보상 기능으로 보정을 하였다.

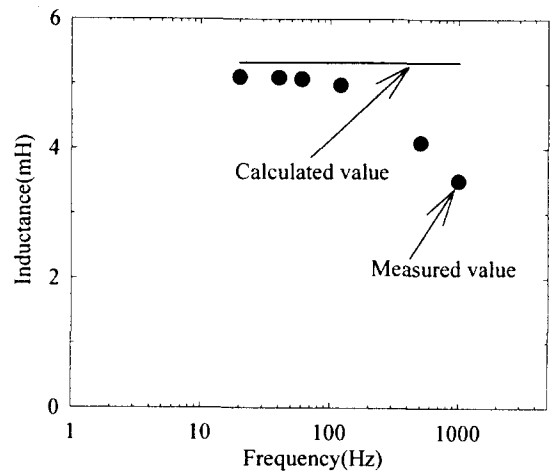


그림 3 주파수에 따른 소형 코일의 인덕턴스
Fig. 3 Inductance vs. frequency for the small coil

그림3의 시험 결과에서 실선은 설계 프로그램을 이용하여 계산된 인덕턴스로서 5.33 mH이고, ●는 측정된 것으로 약 100 Hz 부터 인덕턴스가 포화되기 시작하여 LCR미터의 최저 발전기 주파수인 20 Hz에서는 5.1 mH로써 계산된 인덕턴스와 비교해 약 5%의 오차가 있으나 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램을 이용하여 계산된 소형 코일의 중심 자계와 측정된 값을 비교하기 위해 코일을 권선한 후 그 중심부에 코일 축방향으로 Hall형의 자계 센서(LS Model HGCA-3020)를 설치하여 소형 코일의 중심 자계를 측정하였으며, 그 결과를 그림4에 나타내었다.

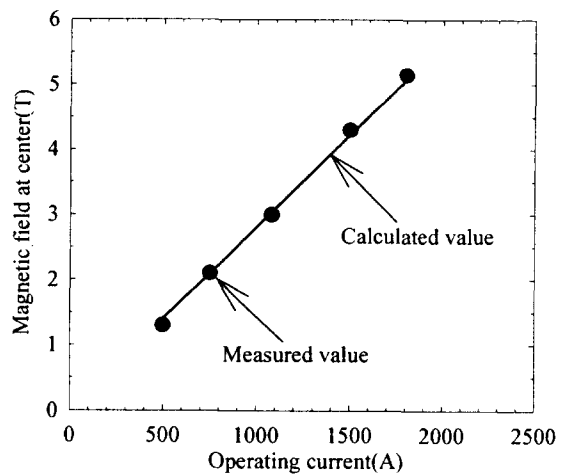


그림 4 운전 전류에 따른 소형 코일의 중심 자계
Fig. 4 Magnetic field at center vs. operating current for the small coil

소형 코일의 중심 자계 측정에서는 3000 A, 10 V의 전원을 사용하여 코일을 여자 하였으며, 일반적으로 초전도 코일의 초기 여자에서 나타나는 낮은 운전 전류에서 켄치가 발생하여 수회의 반복적인 켄치 과정을 경험한 후에야 비로소 안정되는 Training 효과 및 운전 전류의 급속한 변화 때문에 발생하는 교류 손실에 의해 소형 코일이 켄치될 가능성을 고려하여 먼저 운전 전류를

500 A로 설정한 후 약 2 A/s(약 6 mT/s)로 매우 느린 속도로 소형 코일을 여자시켜 중심 자계를 측정하였다. 그 다음 동일한 여자 속도로 코일의 운전 전류를 750, 1080, 1500, 1800 A 까지 증가시키면서 동일한 측정을 반복했으며 소형 코일에는 퀘치가 발생하지 않았다.

그림4의 시험 결과에서 실선은 설계 프로그램을 이용하여 계산된 소형 코일의 중심 자계이고, ●는 측정된 것으로 500 A에서 약 7%의 오차를 제외하고는 본 시험의 운전 전류 범위에서 1%정도의 오차로 계산값과 측정값이 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 0.7 MJ, 100 kVA 초전도 코일의 운전에서 필수 불가결한 요소 기술이면서도 중요한 것은 코일의 퀘치 검출 기술로써 3.1절에서 소개한 바와 같이 유도성 전압이 큰 코일에서 퀘치를 검출하는데 일반적으로 이용되는 브리지 회로에 대한 검증 시험을 하였으며, 그 결과를 그림5에 나타내었다.

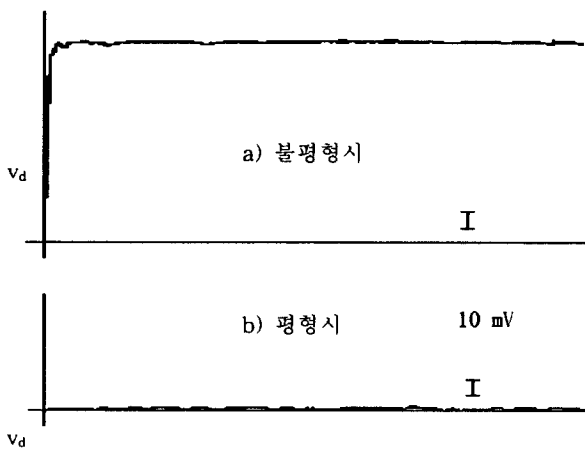


그림 5 소형 코일의 퀘치 검출 전압
Fig. 5 Quench detection voltage for the small coil

그림5의 시험에서 전원은 비교적 안정하게 전류를 상승시킬 수 있는 500 A, 10 V(EM Model EMSII)의 전원을 사용하여 목표 전류를 500 A로하여 100 A/s (300 mT/s)의 속도로 여자할 경우 X-Y레코더로 기록한 브리지 회로의 퀘치 검출 전압으로써 a)는 브리지 평형 조건에서 약 2배 정도 불평형(약 $R_1/R_2=2.2$)인 경우 퀘치 검출 전압이고, b)는 브리지 평형 조건(약 $L_1/L_2=R_1/R_2=1.1$)에서 퀘치 검출 전압을 각각 나타낸다. 그림5의 결과로부터 브리지 평형 조건에 맞도록 검출 저항 (R_1, R_2)을 조정하여 주면 초전도 코일의 퀘치에 의해 발생된 상전도부에서 전압 강하가 수십 μV 정도로만 되어도 퀘치 판단이 가능함을 알 수 있다.

또한 상기의 퀘치 검출 회로를 소형 코일의 퀘치 시험에 적용하여 0.7 MJ, 100 kVA 초전도 코일의 운전과 관련되는 소형 코일의 직류 및 펄스 특성 시험을 하였으며, 그 결과를 그림6에 나타내었다. 그림6의 시험 결과에서 실선은 Alsthom 9 본 케이블의 임계 전류 - 외부 자계 관계로써 0.1 $\mu V/cm$ 를 기준으로 측정된 실험 데이터이고, 파선은 자계에너지 저장용 초전도 코일의 설계 프로그램을 이용하여 계산된 운전 전류와 코일 중심 면상의 내벽에서의 자계(B_{max})관계를 나타낸다. ●는 목표 전류를 3000 A로하여 코일의 전류 상승 속도를 100 A/s(약 300 mT/s) 이하로 했을 경우 측정된 소형 코일의 퀘치 전류이며, ▲는 코

일의 전류 상승 속도를 각각 150 A/s(약 450 mT/s)로 했을 경우 소형 코일의 퀘치 전류이다.

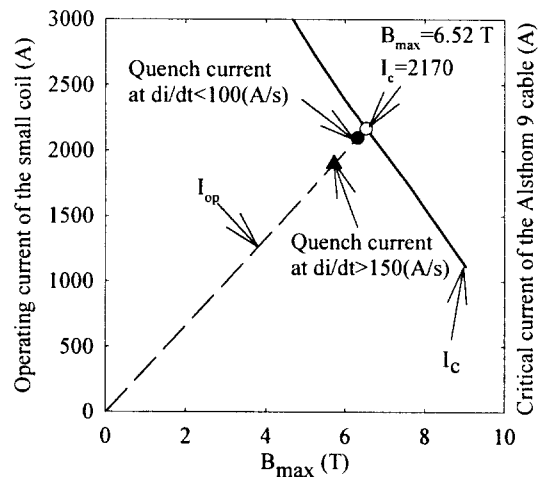


그림 6 소형 코일의 부하선
Fig. 6 Load line for the small coil

소형 코일의 직류 및 펄스 특성 시험에서는 코일의 중심 자계 측정 시험에서와 마찬가지로 3000 A, 10 V의 전원을 사용하여 여자 하였다. 먼저 소형 코일의 직류 특성을 조사하기 위해 중심 자계 측정 시험에서 수 A/s(수 mT/s)의 매우 느린 속도로 소형 코일을 여자할 경우 1800 A 까지 코일의 운전 전류를 상승시켜도 코일에는 퀘치가 발생하지 않는다는 사실에 근거하여, 최종 도달 전류를 전원의 최대 한계인 3000 A로 설정하고 25 A/s(약 75 mT/s)의 느린 상승 속도로 코일을 여자하였으며, 최초 퀘치 시험에서 소형 코일은 2130 A에서 퀘치가 발생하였다. 또한 소형 코일의 펄스 특성에 대한 기초 데이터를 조사하기 위해 최종 도달 전류를 3000 A로 고정하고 코일의 전류 상승 속도를 각각 2배 즉 50 및 100 A/s로 가변시키면서 동일한 과정을

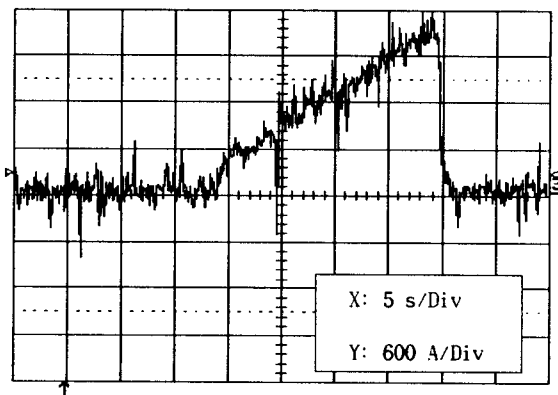


그림 7 시간에 따른 소형 코일의 전류
Fig. 7 Current vs. time for the small coil

반복 하였으나 소형 코일의 퀘치 전류는 2130 A로 모두 동일 하였으며, 100 A/s로 여자할 경우 코일 전류를 그림7에 나타내었다. 그러나 코일의 전류 상승 속도를 각각 150 A/s(약 450 mT/s)로 여자를 할 경우 코일의 임계 전류인 2170 A의 약 87%인 1890 A에서

소형 코일에는 퀘치가 발생되었으며, 수 회에 걸쳐 동일한 조건에서 퀘치 시험을 하였으나 코일의 퀘치 전류는 모두 동일하였다.

그림6의 시험 결과에서 보는 바와 같이 코일의 전류 상승 속도가 매우 느린 경우 코일의 임계 조건 즉 6.52 T에서 임계 전류인 2170 A의 약 98 %정도의 전류에서 코일이 퀘치되어, 소형 코일의 직류 운전 특성은 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 이는 소형 코일의 제작시 대단히 큰 권선 장력($\sigma_w=14.1 \text{ kgf/mm}^2$)을 인가하여 코일의 여자시 발생하는 자기력에 의한 초전도선의 운동이 억제된 결과가 그 주요 원인으로 생각되며, 또한 표1에서 보는 바와 같이 소형 코일의 제작에 사용된 Alsthom 9본 케이블은 동비가 클 뿐만 아니라 동 코아 구조를 지니고 있어 본질적으로 손실 측면보다는 안정성에 치중한 초전도선이라는 것도 한 원인으로 생각된다. 반면 소형 코일의 펄스 운전 특성은 전류 상승 속도가 150 A/s(약 450 mT/s)정도라면 되어도 코일의 퀘치 전류는 임계 전류를 기준으로 할 때 약 13 %정도의 열화가 발생됨을 알 수 있으며, 이와 같은 퀘치 전류 열화는 150 A/s이상의 여자 속도에서 전류의 급격한 상승 즉 전원의 불안정성을 한가지 원인으로 지적 할 수 있으며, 또 다른 한 원인으로서는 안정성에 중점을 둔 Alsthom 9본 케이블은 동비가 크고, 동 코아 구조이며, 초전도선 사이가 절연이 되지 않는 구조적 특징때문에 펄스 운전시 초전도 코일에 과도한 교류 손실이 발생되기 때문으로 생각되며 소형 코일의 펄스 특성 시험에 대해서는 전원의 수경·보관을 거쳐 추후 좀더 정밀한 시험 및 검토가 요구된다.

이상의 0.7 MJ μ SMES코일의 제작에 들어가기 전에 수행된 연구 결과를 요약하면 μ SMES코일의 설계프로그램은 비교적 실험과 잘 일치한다는 사실, 인덕턴스가 큰 코일에서도 적용 가능한 퀘치보호 기술이 실험적으로 확인 된 점과 마지막으로 고 권선장력이 코일의 퀘치특성을 대단히 우수하게 한다는 사실이다.

5. 결론

본 연구에서는 급속한 자계에너지의 충·방전이 가능한 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 제작 및 운전에 선행하여 개발된 설계 코드의 타당성 입증 및 μ SMES 장치 개발과 관련된 각종 요소 기술을 확보하기 위하여 0.7 MJ급 μ SMES 장치의 특성과 매우 흡사한 소형 초전도 코일을 제작하여 코일의 각종 특성을 조사하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- a) 그림3의 시험 결과에서 측정된 인덕턴스는 계산치와 비교해 약 5 %이내의 오차로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.
- b) 그림4의 시험 결과에서 측정된 자계는 계산치와 비교해 500 A에서 약 7 %의 오차를 제외하고는 1 %정도의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다.
- c) 그림6의 시험 결과에서 여자 속도가 100 A/s(약300 mT/s)이하에서 퀘치 전류는 임계 전류의 약 98 %정도에 이르며, 따라서 고권선 장력 초전도 코일의 직류 특성은 매우 뛰어나다고 말할 수 있다. 반면 150 A/s(약 450 mT/s)정도에서도 퀘치 전류는 임계 전류를 기준으로 할 때 약 13 %정도의 열화가 발생됨을 알 수 있고, 이는 전원의 불안정성 및 과도한 교류 손실이 그 원인으로 생각되며 추후 정밀한 시험 및 검토가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] 류강식, 오봉환, 한병성, 정승기의 23인, UPS용 SMES의

소형 초전도 코일 및 전력 변환기 요소기술 개발에 관한 중간 보고서(1차년도), 통상산업부, 1996, pp.87-100.

- [2] 류강식, 진홍범, 류경우, 정승기, 한병성의 23인, UPS용 SMES의 소형 초전도 코일 및 전력 변환기 요소기술 개발에 관한 중간 보고서(2차년도), 통상산업부, 1997, pp.208-227.
- [3] T. Onish, H.Tateishi and K. Koyama, "Superconductive Pulse Coils for Energy Storage", Workshop on Superconducting Magnetic Energy Storage, Madison, Oct.19-23, pp.1-20, 1981
- [4] 류경우, 김해중, 조재욱, 진홍범, 이언용, 성기철, 류강식, "0.7 MJ 펄스 코일용 초전도 케이블의 퀘치특성", '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 241-243, 1997

저 자 소 개



류 경 우(柳炅佑)

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업, 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 (일)Yokohama National Uni. 전자정보공학과 졸업(공학박사). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대 전기공학과 조교수. 주관심분야: 초전도응용기기



김 해 중(金海鍾)

1965년 11월 25일생. 1993년 경상대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 연구원. 주관심분야: 초전도응용기기



성 기 철(成耆哲)

1956년 2월 20일생. 1980년 한양대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986~현재 한국전기연구소 선임연구원, 1997년~현재 초전도응용연구part장. 주관심분야: 초전도전력계통응용분야



류 강 식(柳康植)

1958년 8월 5일생. 1980년 한양대 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~1988년 동 대학원 전기공학과 강사. 1988년~1993년 한국전기연구소 초전도연구실 실장. 1993년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀장. 주관심분야: 초전도응용기기