

유도형 고온초전도한류기의 DC 리액터 설계를 위한 솔레노이드 특성실험

김민철*, 안민철*, 이승제**, 김영식*, 김진기***, 고태국*
* 연세대학교 전기전자공학과, ** (주)프리컴시스템, *** 진광 이앤씨(주)

Characteristics of Prototype Solenoid for Basic Design of DC Reactor Type SFCL

Min Chul Kim*, Min Cheol Ahn*, Seungje Lee**, Young Sik Kim*,
Jin Ki Kim*** and Tae Kuk Ko*

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University,
** Freecom system Co.Ltd., *** Jin Kwang E&C Corp.

mckim@yonsei.ac.kr

Abstract - This paper deals with the characteristics of a prototype solenoid for basic design of DC reactor type superconducting fault current limiter (SFCL). The prototype high-Tc Superconducting (HTS) solenoid was manufactured with 4 stacked Bi-2223 tape. The critical currents were measured with respect to the number of stacks. In order to test the safety of HTS solenoid in quenched state, the transport tests of AC over-current were performed. These experimental results could be applied to the basic design of HTS DC reactor for SFCL effectively.

1. 서 론

현재 고온초전도체를 이용한 전력기기의 개발은 실용화, 상용화에 매우 근접해 있으며, 그 중 고온초전도한류기는 상용화 가능성이 가장 높은 기기 중 하나이다. 현재 국내는 물론 미국, 일본 등의 선진국에서도 DC 리액터형 고온초전도한류기의 개발이 활발하게 연구 중에 있다. 유도형 고온초전도한류기용 DC 리액터를 설계하는데 있어서 고온초전도 마그넷의 제작은 매우 중요한 부분이다. 한류기용 DC 리액터는 높은 임계전류를 가져야 하며, 고압에서의 절연이 용이해야 한다. 따라서, 많은 연구기관에서는 솔레노이드 권선법을 주로 이용하고 있다[1]. 솔레노이드 권선법을 이용한 고온초전도 마그넷은 적층수, 과전류 특성에 따라 마그넷의 특성을 좌우한다.

본 논문은 4개의 적층 선재를 감은 prototype 고온초전도 솔레노이드를 만들어 몇 가지 실험을 통해 특성을 조사하였다. 임계전류의 측정과 과전류 통전 실험을 실행하였고, 이 결과는 6.6kV/200A 유도형 고온초전도한류기에서의

DC 리액터를 설계하는데 있어 기초 설계로 사용되어 질 것이다.

2. 유도형 고온초전도한류기용 DC 리액터의 설계조건

그림1은 DC 리액터형 고온초전도한류기의 개략도를 나타내었다[2]. 6.6kV/200A DC 리액터형 고온초전도한류기에서 정상상태에서는 DC 리액터에 283A까지 흐르게 되고, 사고상태에는 정상상태 전류값의 수배까지 흐르게 된다[3]. 따라서 DC 리액터의 초전도 마그넷의 임계 전류 값은 283A보다 충분히 커야 한다. 현재 개발되어 있는 고온초전도 선재의 임계전류는 최대 1백 수십 A 정도이기 때문에, 이러한 높은 임계전류를 가진 마그넷을 만들기 위해서는 선재의 적층이 필요하다. 지금까지 단척시료 (short sample)에서 선재 적층수에 따른 임계전류의 특성연구는 수행되어 왔지만[4], 솔레노이드 마그넷에서는 연구가 미비했다. 따라서 prototype 솔레노이드를 제작하여 선재의 적층수에 따른 임계전류 특성을 파악하고, 이를 기초로 적층수를 결정하였다. 또한, DC 리액터의 인덕턴스가 클수록 사고전류는 큰 폭의

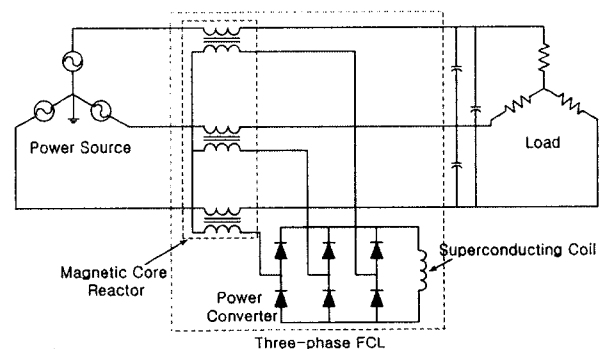


Fig. 1. Schematic drawing of three-phase DC reactor type FCL

로 제한된다. 따라서 코일의 인덕턴스는 클수록 유리하지만, 코일의 인덕턴스는 선재의 길이에 비례하고, 이는 비용에 있어서 직접적인 영향을 미치므로 최적의 선재 길이를 찾아낼 필요성이 있다. 코일의 인덕턴스가 충분히 크지 않을 경우 사고시간에 따라서 DC 리액터는 켄치가 발생할 수 있으며, 켄치시 마그넷의 안정성을 알아보는 것도 필요하다.

3. 실험 및 고찰

3.1 고온초전도 솔레노이드의 설계와 제작

6.6kV/200A DC 리액터형 고온초전도환류기에 응용하기 위해 4개로 적층한 테잎 선재를 감은 솔레노이드를 제작하였다. 보빈은 2mm 깊이의 홈을 낸 베이클라이트로 만들었고, 선재는 AMSC (American Superconductor)사에서 만든 high-strength reinforced Bi-2223 선재를 사용하였다. 이 선재는 4.1mm의 너비와 0.3mm의 두께를 가진다. 77K의 온도에서 선재의 임계전류는 약 135A이다. 선재를 4개의 층으로 적층하여 보빈에 감았으며 선재의 층 사이에는 캡톤 테잎으로 절연하였다. 적층한 선재는 보빈의 홈에 따라 감아졌으며 터미널은 구리로 된 전류리드에 연결하였다. 표1은 솔레노이드의 재원을 나타내었고, 그림2는 솔레노이드를 제작한 모습이다.

Table 1. Specification of HTS Solenoid

지름(mm)	100
턴 수	10
선재 길이(m)	3.14
적층 수	4
인덕턴스(mH)	0.01

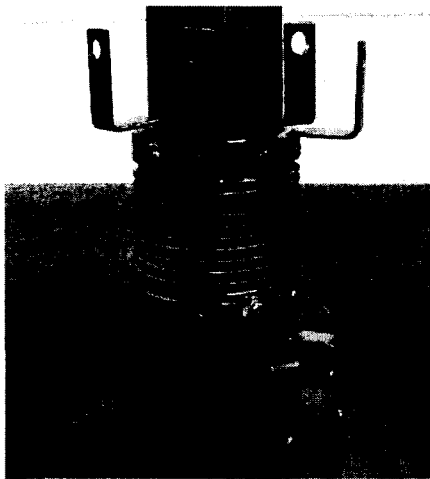


Fig. 2. Manufactured HTS Solenoid

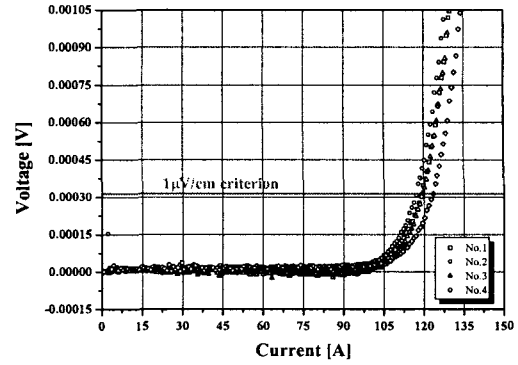


Fig. 3. I-V Characteristics of HTS Solenoid

3.2 임계전류 측정

고온초전도 솔레노이드의 임계전류는 77K의 온도에서 측정되었다. 측정을 위해, 마그넷 파워 서플라이를 사용하였으며 전류의 증가율은 1A/s로 하였다. 측정방법은 4단자법으로 하였으며 전압 탭 사이의 간격은 3.14m이다. 이 길이는 솔레노이드 선재의 전체 길이에 해당된다. 그림3은 솔레노이드의 I-V 특성을 나타내는 것이다. 우리는 켄치 검출을 위해 널리 알려진 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 표준법을 이용했고 전압 탭의 간격을 고려해 봤을 때, 켄치 전압은 0.314mV이다. 그래프에서 가로 표시선은 기준 전압을 나타내고 있다. 선재의 가장 안쪽의 것부터 바깥쪽으로 no.1~no.4 선재라고 할 때, 각각의 임계전류는 118A, 117A, 119A, 122A로 나왔다. 솔레노이드에서 임계전류 값들이 조금씩 차이가 나는 이유는 선재 자체의 임계전류들이 125~135A로 측정되기 때문에 각각의 선재의 임계전류들도 조금씩 차이가 나는 것으로 볼 수 있다. 또한, 솔레노이드에 통전되는 전류에 의해 발생하는 자기장도 분석되어졌다. 분석은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 유한요소법에 의해 실행되었다. 솔레노이드의 윗부분과 아랫부분의 선재표면에서 수직으로 향하는 자속 밀도의 최대값은 약 0.05T로 나타났다. AMSC사에서 제공하는 Bi-2223 데이터시트(5)를 보면 0.05T에서 I_c/I_0 는 약 0.9이다. 사용된 선재의 I_0 가 약 130A이므로 마그넷의 임계전류를 약 117A로 산출해 낼 수 있다. 따라서 측정된 임계전류들은 신뢰할 수 있는 값들이다.

그림4는 적층한 테잎을 감은 고온초전도 솔레노이드의 I-V 특성을 보여주고 있다. 표2는 적층한 수에 따른 임계전류들을 보여주고 있다. 그림3에서 1번 테잎과 2번 테잎의 임계전류값의 합은 235A이다. 그러나 2개 적층한 테잎을 감은 솔레노이드의 임계전류는 210A이고, 이는 앞의 것의 89.4%에 해당된다. 3개 적층한 테잎을 감은 솔레노이드의 임계전류는 3개 각각의 임계전류들의 합인 78.2%가 나오고, 4개 적층한 테잎을 감은 솔레노이드의 임계전류는 그 각각의 합인 76.7%가 나온다. 적층을 더 많이 할수록

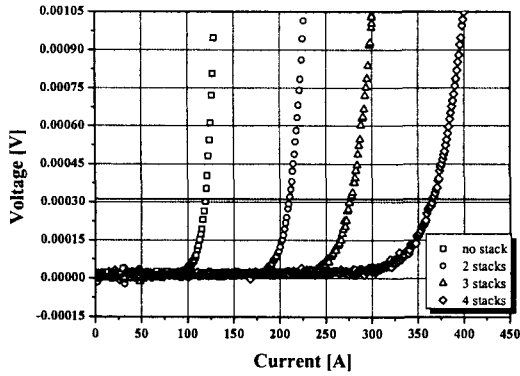


Fig. 4. I-V Characteristics of HTS Solenoids Wound the Stacked Tape

Table 2. Critical current of the solenoids according to number of stack

적층 선재 수	임계전류
1	119A
2	210A
3	277A
4	365A

임계전류비의 감소는 더욱 커진다. 이 원인은 선재의 수직으로 향하는 자기장의 세기와 테잎들 사이에서의 전류분배 효과로 볼 수 있다.

3.3 임계전류 이상의 교류전류에서의 특성

DC 리액터형 고온초전도한류기에서 사고발생 시 차단기가 작동하기 전까지 수 cycle동안 임계전류 이상의 과전류가 흐를 가능성이 있다. 이 과전류에 의해 마그넷이 손상을 입는지에 대해 알아볼 필요가 있다. 솔레노이드의 안정성을 테스트하기 위해 임계전류보다 큰 교류 전류를 흘려 보았다. 흘린 시간은 약 80ms정도이고, 실효치 약 1402A의 전류를 흘렸다. 이것은 임계전류에 비해 3.84배에 해당된다. 이 실험에서 전

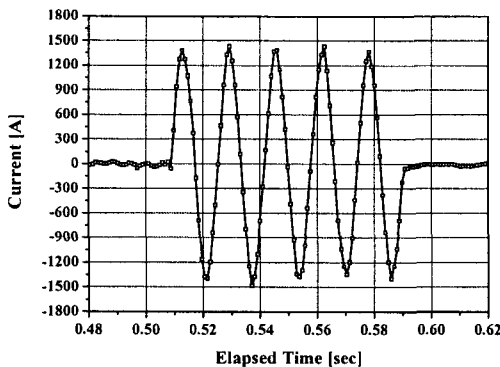


Fig. 5. Result of the transport ac over current

자기장을 견디기 위한 어떤 지지물도 사용하지 않았으며, 60Hz의 5cycle 동안 흘리면서 아무런 기계적, 전기적 문제가 발생하지 않았다. 단지 과전류가 흐르고 있는 동안에 약간의 거품만이 일어났었고, 이는 과냉각소를 사용한 냉각방식에 의해 해결할 수 있을 것이다.

4. 결 론

이 논문은 6.6kV/200A 유도형 고온초전도한류기에서의 DC 리액터를 설계하는데 있어 prototype 솔레노이드의 특성을 조사해 보았다. Prototype 솔레노이드는 4개의 테잎 선재를 적층하여 제작하였으며 적층한 테잎의 임계전류는 365A로 각각의 임계전류 값들을 합한 것의 76.7%에 해당된다. 이 원인은 인덕턴스 차이에 의한 전류분배현상 때문으로 볼 수 있다. 고온초전도 솔레노이드의 켄치 상태에서의 안정성을 실험하기 위해서 임계전류 이상의 교류전류를 흘려 보았다. 교류전류는 1402A이며, 이 실험에 의해 전자기장의 힘이 가해졌음에도 불구하고 전기적이나 기계적인 손상을 입지 않았다. 이 실험의 결과로 6.6kV/200A 유도형 고온초전도한류기에서의 DC 리액터에 4개 테잎을 적층한 솔레노이드를 응용설계 가능함을 보였다. 적층한 테잎 선재에서의 전류분배현상에 대해선 더 많은 연구가 필요할 것이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Yazawa *et al.*, "66kV-class High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet Model Coil Experiment", presented at ASC 2002, Houston, August, 2002.
- [2] 이용로, "전력용 스위칭 소자를 이용한 3상 DC 리액터형 초전도한류기의 단락특성연구", 연세대학교 석사논문, pp.5-8, 2001.
- [3] Eung Ro Lee, Seungie Lee, *et al.*, "Test of DC reactor type fault current limiter using SMES magnet for optimal design.", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume.12 issue:1, pp.850-853, 2002.
- [4] Wansoo Nah, Joonsun Kang, *et al.*, "Numerical Calculation of Critical Current in Bi-2223 Stacked Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume.11 No.1, pp.3908-3911, March 2001.
- [5] <http://www.amsuper.com/3plyfact.htm>