

6.6kV/200A급 유도형 초전도한류기의 DC리액터용 고온 초전도 솔레노이드의 제작

김현석*, 안민철*, 이승제**, 이안수*, 이상진***, 고태국*
*연세대학교 전기전자공학과, **프리컴시스템(주), ***위덕대학교 전기공학과

Fabrication of the HTS Solenoid for DC Reactor of 6.6kV/200A Inductive Superconducting Fault Current Limiter

Hyun Seok Kim*, Min Cheol Ahn*, Seungje Lee**, Ansu Lee*, Sangjin Lee*** and Tae Kuk Ko*

*Dept. of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University, **Freecom system Co.Ltd. , ***Dept. of Electrical Engineering Uiduk University.

seoks@yonsei.ac.kr

Abstract - This paper deals with the fabrication of high temperature superconducting(HTS) solenoid for DC reactor of 6.6kV/200A inductive superconducting fault current limiter(SFCL). The winding machine which is suitable to wind HTS wire was manufactured. The proper inductance was calculated by circuit simulation and G10-FRP bobbin was fabricated with this inductance. HTS solenoid was wound by using the winding machine. The V-I characteristic of completed DC reactor in sub-cooled nitrogen(65K) was measured. The full quench current of this magnet is about 490A.

1. 서 론

고온초전도체를 이용한 전력기기의 응용분야 중에서 전력계통에서의 이상전류 및 사고전류를 제한하는 초전도 한류기는 상용화 가능성이 가장 높은 초전도전력기기 중 하나이다[1]. 초전도한류기는 초전도체 퀘치시 급격한 저항증가 특성을 이용하여 사고전류를 제한하는 저항형 한류기와 초전도마그네틱의 인덕턴스를 이용하는 유도형 한류기로 크게 구분된다. 그 중 DC 리액터형 고온초전도한류기는 국내는 물론 미국, 일본 등의 선진국에서도 개발이 활발하게 연구되고 있다. 유도형 고온초전도한류기는 인덕턴스 값에 의해 사고전류 제한율이 결정되어지기 때문에 높은 인덕턴스를 갖는 것이 상당히 중요하다. 높은 임계전류와 함께 고려할 사항이 고압에서의 절연이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 많은 연구기관에서는 솔레노이드 권선법을 주로 이용하고 있다[2].

이러한 점들을 감안하여 본 논문에서는 연세대학교에서 제작한 6.6kV/200A급 유도형 초전도한류기의 DC 리액터용 고온초전도 솔레노이드의 제작과정에 대해서 알아본다.

2. DC 리액터용 솔레노이드 제작

2.1 DC 리액터의 요구사항

그림 1은 DC 리액터형 고온초전도한류기의 개략도이다. 한류기는 전력계통의 선로와 한류기를 연결해주는 자기철심리액터, 계통의 교류전원을 직류로 전환해주는 전력변환기 그리고 사고전류를 제한하는 DC 리액터로 크게 분류할 수 있다.

정상시 DC 리액터에 흐르는 전류는 283A이다. 따라서 DC 리액터 제작 시 임계전류는 이 값보다 충분히 크게 하면 된다. 인덕턴스는 클수록 사고전류 제한율은 매우 높지만, 비용은 많이 들어가기 때문에 적절한 값을 선택해야만 한다.

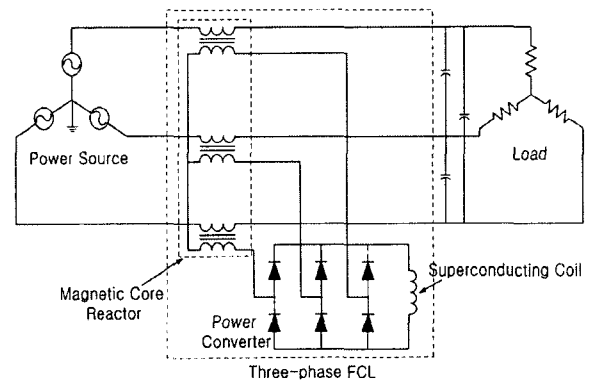


Fig. 1. Schematic drawing of three-phase DC reactor type FCL

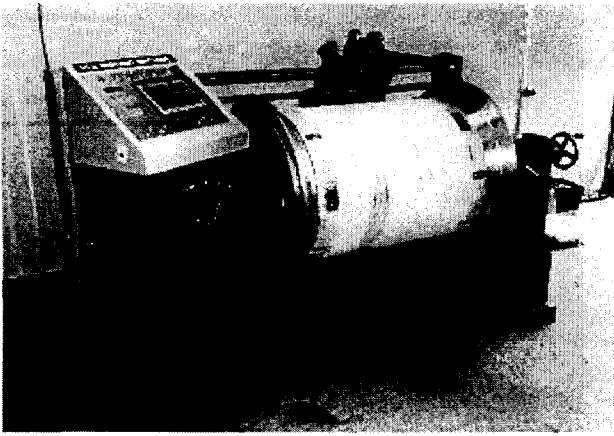


Fig. 2. Winding Machine for HTS Solenoid

간단한 회로시뮬레이션을 통해 6.6kV/200A급 DC 리액터형 한류기에서 인덕턴스와 사고 후 1/2주기에 제한되는 사고전류를 알아본 결과 50mH에서 1075A정도로 제한되고, 100mH에서 750A정도로 제한된다. 시뮬레이션 결과를 통해 인덕턴스를 75~100mH로 결정하였다.

2.2 솔레노이드용 권선기 제작

권선에 사용되는 선재는 high-strength reinforced Bi-2223 선재를 사용하였다. 이 선재의 내부는 비스무스(Bi)라는 세라믹 물질이 들어있다. 따라서 솔레노이드 권선 시 일정한 장력 유지와 함께 권선피치(pitch)의 정확도도 필요하다.

본 연구에서는 DC 리액터 솔레노이드를 제작하기 위하여 최대 직경 800mm의 보빈을 권선할 수 있는 권선기를 설계, 제작하였다. 보빈의 회전에는 서보 모터가 사용되었으며 선재의 이동에는 마이크로 스테핑 모터가 사용되었다. 최대 93turn의 권선이 이뤄져야하기 때문에 한 피치의 이동오차는 1회전당 $\pm 0.01\text{mm}$ 이내이다. 권선기의 회전방향은 한 방향으로 일정하고 선재를 이동시키는 마이크로 스테핑 모터가 보빈의 좌측 끝에서 시작하여 우측 끝까지 가면 한번의 권선되는 것이다. 보빈의 종류에 따라 스테핑모터의 시작점이 달라지는데, 총 다섯 개의 보빈 중에서 제일 안 쪽의 보빈을 1번 바깥쪽으로 가면서 차례로 2,3,4,5번이라고 한다면 1,3,5번의 보빈이 권선되는 방향이 같고 2,4번은 나머지 보빈들과 권선 방향이 반대가 된다.

2.3 극저온용 솔레노이드 보빈 제작

표 1에서의 제원은 본 연구에 사용된 5개의 보빈들의 제원표이다. 그림 3에서 보듯이 5개의 보빈을 겹쳐서 조립시키기 위해서 일정한 비율을 가지고 크기가 다르게 가공하였다. 그리고 각각의 보빈에는 초전도 선재의 적층권선을 위해서 홈(groove)을 가공했고 이 홈은 턱 간의 절연에도 매우 유리하다. 홈의 폭은 4.5mm이고, 깊이는 5mm이다. 홈 간의 거리는 1.85mm이다. 보빈의 재질은 G10-FRP이며, 권선이 다 된 보빈 하나의

Table 1. Specifications of the bobbins for DC reactor

no.	I.D.(mm)	O.D.(mm)	height(mm)	turns
1	600	624	800	93
2	640	664	800	88
3	680	704	800	83
4	720	744	800	78
5	760	784	800	73

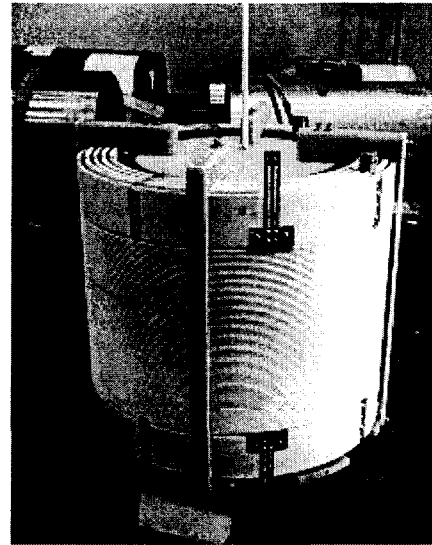


Fig. 3. Assembly of five bobbins

무게는 약 50kg 정도이다. 각 보빈들은 그림 3에서 보듯이 FRP bar를 이용하여 고정, 조립하였다.

2.4 DC 리액터 권선

본 연구를 위해 제작한 솔레노이드 전용 권선기를 사용하여 권선작업을 수행했다. 크기가 다른 5개의 보빈들을 각각 권선하였고, 각각의 권선들을 직렬로 연결하였다. 6.6kV/200A급 DC 리액터에는 평상시 283A의 전류가 흐르기 때문에 이보다 충분히 큰 임계전류를 가지게 하기 위해서 4개의 선재를 적층하였다. 전력변환기에서 변환된 직류전류가 마그넷에 흐르기 때문에 사고 시 전류의 분배는 인덕턴스의 영향으로 적층된 선재 중 안쪽에 권선된 쪽으로 많이 흐르게 된다.

이에 대한 안정화용으로 각각의 보빈에는 2개의 구리선재를 초전도선재 안쪽에 권선하였다. 적층 방법은 안쪽부터 구리2층, 고온초전도선재 4층을 차례로 권선하였고, 각각의 선재들 사이에는 절연층 없이 overlap하여 권선하였다. 선재들은 그림 4에서 보여지는 하나의 구리터미널에 접합되어 전류를 흘리게 된다. 구리 저항을 고려하여 터미널로 전류를 통해주는 구리바에는 최대

Table 2. Specifications of the DC reactor

Item	Value
I. D.	600 mm
O. D.	784 mm
Height	800 mm
Layer	5 ea
Turns	415
Winding length	900 m
Inductance	84 mH

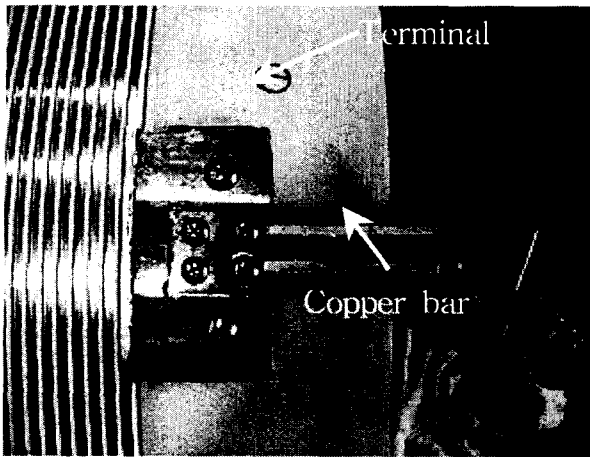


Fig. 4. Copper bar & Terminal

한 저항을 줄이기 위해 고온초전도선재를 길이에 맞게 접합하였다. 각각의 보빈에 권선된 선재의 길이는 약 180m이다. 5개의 보빈의 사이즈가 다르기 때문에 표 1에서 보듯이 턴 수도 차이가 난다. 조립된 DC 리액터의 전체 인덕턴스는 84mH이다. DC 리액터의 제원은 표 2와 같다.

3. 솔레노이드 특성 실험

제작된 솔레노이드는 운전조건 65K, 1기압 과냉질소 상태이며, 이를 위해 냉동기 1대가 사용되었으며, 냉각시스템과 솔레노이드의 조립모습은 그림 5와 같다. 과냉질소 상태에서의 DC 리액터의 전압-전류 특성을 알아보기 위한 실험을 하였다. 실험은 MPS(Magner Power Supply)를 DC 리액터에 연결하여 일정한 전류상승률(0.5A/s)로 전류를 증가시켰다. 이때 흐르는 전류는 셉트저항을 통해 4단자법으로 측정하였다. 일반적으로 초전도체의 특성을 파악하기 위해서는 초전도체 양단에 전압탭을 설치하나 본 연구에서는 냉각시스템을 결합한 전체시스템에서 외부의 bushing에서의 특성을 파악하였다.

그림 6은 과냉질소에서의 DC 리액터 전압-전류 특성을 나타내는 그래프이다. 과냉액체질소의 운전온도는 약 65K 이었다. 그림에서 보여지는 전류에 따른 전압의 비례적인 증가는 전류도입 부분이나 보빈과 보빈 사이의 구리단자 부분 등

의 상전도체에 의한 것이다. 그러한 부분을 고려한다면 본 실험에서는 전압-전류 특성 곡선에서 전압값이 급격하게 증가하는 시점에서의 전류를 full quench 시점으로 한다. 그림 6의 과냉질소 결과에서 약 490A에서 전압이 급격하게 증가한다. 6.6kV/200A급 유도형 한류기의 DC 리액터로 사용되는 관점에서 본다면 상시전류 283A 보다 훨씬 큰 임계전류를 가지기 때문에 정상시 매우 안정하다. 실제로 283A를 통전했을 때 DC 리액터 양단의 저항은 약 275 $\mu\Omega$ 이다. 이러한 수치적 결과는 유도형 한류기의 시스템 특성을 나타내는 중요한 결과이며 DC 리액터에서 리액터의 솔레노이드 제작이 한류기 시스템 운용에 매우 적합하다고 판단되어지는 중요한 자료가 된다.

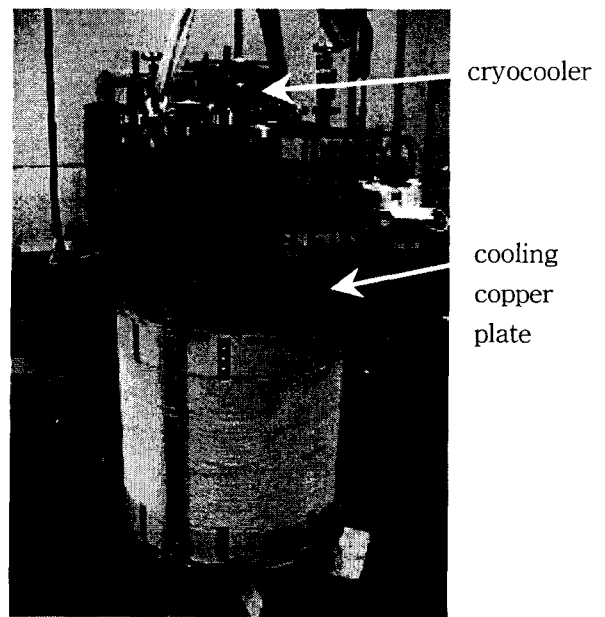


Fig. 5. Manufactured cryogenic system for sub-cooled nitrogen cooling

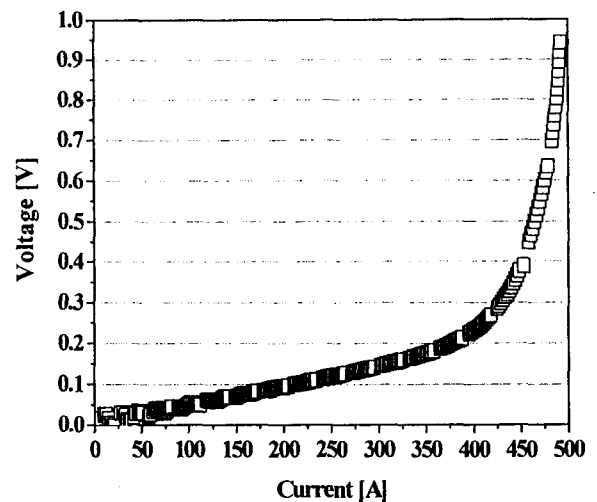


Fig. 6. I-V curve of the DC reactor in sub-cooled LN2

4. 결 론

6.6kV/200A급 유도형 한류기 개발의 핵심 요소인 DC 리액터용 고온초전도 솔레노이드를 설계, 제작하였고 그에 대한 특성을 간단히 살펴 보았다. 이를 통하여 본 논문에서 얻어진 결과들을 정리해 보면 다음과 같다. 본 연구에서는 대형 솔레노이드 권선을 위하여 전용의 권선기를 설계, 제작 하였으며, G10-FRP 극저온 보빈들을 제작하였다. 5개의 보빈에 각각 솔레노이드 권선하여 직렬로 연결하는데 quench시 안정화를 위하여 고온초전도선재 내부에 구리 선재를 권선하였다. DC 리액터 특성실험에서 과냉질소 냉각을 사용하였으며, 운전온도는 65K 이었다. 제작된 마그네틱의 인덕턴스는 84mH이며, 65K에서 full quench 전류는 약 490A 이다.

본 연구에서 제작된 6.6kV/200A급 DC 리액터용 고온초전도 솔레노이드의 제작에 중점을 두고 진행되었으며, 과냉질소에서의 전압-전류 특성에 관해서도 간단히 알아보았다. 하지만 실제 초전도 응용기에 적용하기 위해서 장시간 운전, 과전류 통전 등의 추가적인 특성 실험이 필요하다. 특히 DC 리액터의 특성을 결정하는

솔레노이드 권선법 및 제작에 관한 더 많은 연구가 요구된다.

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

(참 고 문 헌)

- [1] Cerulli, J., " State of the art of HTS technology for large power applications: current programs and future expectations, " Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE , Vol. 2 , pp. 1096-1100, 1999
- [2] T. Yazawa et al., "66kV-class High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet Model Coil Experiment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.13, No.2, pp. 2040-2043, 2003