

6.6kV/200A급 DC 리액터형 초전도한류기의 단시간운전 및 단락시험

안민철*, 이승재**, 강형구*, 배덕권*, 윤용수***, 고태국*
*연세대학교, **프리컴시스템(주), ***안산공과대학

Short-term Run and Short-circuit Test of 6.6kV/200A DC reactor Type Superconducting Fault Current Limiter

Min Cheol Ahn*, Seungje Lee**, Hyoungku Kang*, Duck Kwoen Bae*,
Yong Soo Yoon***, Tae Kuk Ko*

*Yonsei Univ., **Fræcomsystem Co. Ltd., ***Ansan College of Technology

mcahn@yonsei.ac.kr

Abstract - 6.6kVrms/200Arms DC reactor type superconducting fault current limiter (SFCL) has been developed. This paper deals with the manufacture and short-circuit test of the SFCL. DC reactor was the HTS solenoid coil whose inductance was 84mH. AC/DC power converter was performed as the dual-mode operation. The short-term run(1 sec) and short-circuit test of this SFCL was performed successfully. The experimental results have a similar tendency to the simulation results. In short-circuit test, at 2 cycles after the fault, fault current limitation rate was about 30%.

1. 서 론

초전도체를 이용한 새로운 전력기기인 고온초전도한류기(SFCL: Superconducting Fault Current Limiter)는 단락사고 시 전류를 제한하는 역할을 하는 기기이다. 초전도 응용기기에 대한 연구개발이 전세계적으로 활발하게 진행되고 있는 가운데 특히 초전도한류기는 그 실용화에 매우 근접해 있다. 현재 초전도한류기는 미국의 Los Alamos National Lab.이나 일본의 도시바 전력 등의 기관에서 연구를 진행 중이며, 국내에서도 연세대학교를 비롯한 연구기관에서 21C 프론티어 사업의 일환으로 연구를 수행 중에 있다. 연세대학교가 개발한 한류기는 초전도 DC 코일의 인덕턴스를 이용하여 사고시 전류를 제한하는 DC 리액터형 한류기이다. 이러한 한류기는 초전도체에 직류가 흐르며 사고시 전류가 서서히 증가하는 특성이 있으며, 대용량 한류기로의 확장에 유리하다는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 6.6kV_{rms}/200A_{rms}급 DC 리액터형 한류기의 제작과 단시간 운전, 그리고 단락시험을 설명하였다.

2. 한류기 시스템의 제작

2.1 3상 DC 리액터 한류기의 구조

일반적으로 3상 DC 리액터형 한류기는 각 상마다 AC/DC 전력변환기와 초전도 코일을 위치시키는 형태와 3상 변압기와 3상 전력변환기를 이용하여 초전도 코일을 1개만 사용하는 형태가 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 초전도 코일을 한 개만 사용하여 3상 한류기 시스템을 제작하였다. 그림 1에서 Magnetic Core Reactor(MCR) 부분은 3상 변압기로서 1차측은 계통에 직렬로 연결되고 2차측은 전력변환기 쪽으로 전력을 연계한다. 전력변환기 부분은 변압기 2차측의 3상 전원을 직류로 변환하는 역할을 한다. DC 리액터는 이 한류기의 핵심부품으로서 사고전류를 제한해 주는 역할을 한다.

2.2 DC 리액터와 냉각시스템

본 연구에서는 DC 리액터용 고온초전도 코일의 형태를 솔레노이드로 권선하였다. 솔레노이드 권선을 선택한 이유는 한류기용 DC 리액터로 사용하는데 있어서 높은 임계전류를 갖기에 용이하고, 전기절연의 측면에서 유리하다고 판단되었기

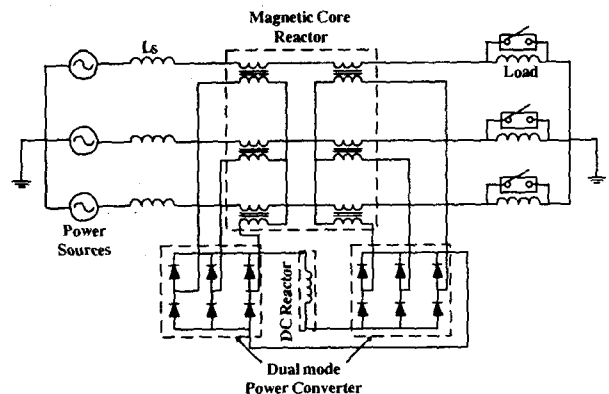


Fig. 1. Schematic Drawing of 3 Φ DC reactor type SFCL

때문이다[1]. 사용한 선재는 고강도 Bi-2223 테이프를 사용하였으며 선재의 임계전류는 약 115A였다. 보빈에는 선재를 권선하기 위한 홈을 가공하였으며 안쪽부터 구리 테이프 2개와 고온초전도선재 4개를 적층하여 권선하였다. 보빈의 재질은 GFRP로 하였으며 지름이 각기 다른 5개의 보빈들을 직렬로 연결하여, 총 권선길이는 3.6km이다. 제작된 코일의 인덕턴스는 약 84mH이다. 제작된 DC 리액터용 고온초전도 코일의 제원은 표1과 같다. 초전도 코일의 냉각에는 냉동기 1대를 이용하는 자연대류 방식의 과냉질소 냉각시스템을 구성하였다. 냉각조건은 65~66K, 1기압 환경이다. 그림 2는 제작된 고온초전도 코일을 포함한 냉각시스템의 모습이다.

제작된 시스템을 65K에서 전압-전류 특성을 측정하였다. 측정결과 시스템의 full quench는 약 490A 정도에서 발생하였으며, 한류기 정상운전 전류인 283A의 전류 통전시 DC 리액터 양단의 전압은 0.135V 만이 발생하였다.

2.3 전력변환기

삼상 AC/DC 전력변환기를 개발하였으며 전력변환소자는 팹트리거형 사이리스터 12개를

Table I. Specifications of the coil

Item	Value
I. D.	600 mm
O. D.	784 mm
Height	800 mm
Layers	5 ea
Turns	415
stacks	6 ea (2 copper + 4 HTS tapes)
Inductance	84 mH

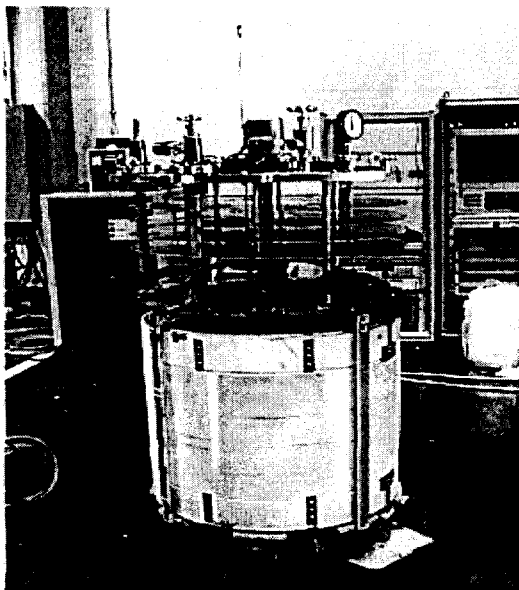


Fig. 2. Cryogenic System with the DC reactor

사용하였다. 사용한 사이리스터의 역방향 항복전압이 최대 7kV이며 본 용량의 한류기에서 사고시 각 전력변환소자에 걸리는 전압은 약 9kV이다. 따라서 2개의 사이리스터를 직렬로 연결하여야 하는데, 전력변환소자의 직렬연결에서 발생할 수 있는 여러 가지 문제를 해결하기 위하여 그림 1의 구조와 같이 듀얼모드 운전을 채택하였다 [2]. 그림 3은 듀얼모드에서 한 부분의 전력변환소자 모듈이다.

2.4 자기철심리액터

단시간 운전용 자기철심리액터를 설계, 제작하였다. 단시간 운전이라는 특별한 운전 조건을 고려하여 전체 용량을 0.7MVA급으로 제한하였다. 단시간 시험용으로 부피를 줄이는 측면의 설계에 치중하였으며, 제작된 자기철심리액터의 전압강하는 3.7%이다. 몰드형으로 제작하였으며, 전력변환기를 듀얼모드로 운전하기 위하여 2차측 권선은 중앙탭을 설치하였다. 그림 4는 제작된 자기철심리액터이다.

3. 단시간운전 및 단락시험

3.1 한류기 시스템 조립

제작된 DC 리액터, 전력변환기, 자기철심리액터를 조립하여 고온초전도한류기 시스템을 완

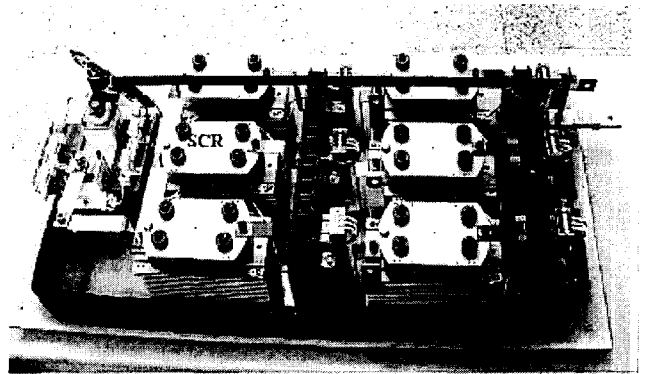


Fig. 3. Rectifier Module for 3 ϕ AC/DC power converter

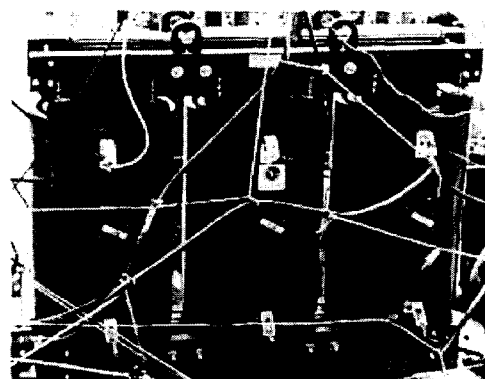


Fig. 4. Magnetic Core Reactor

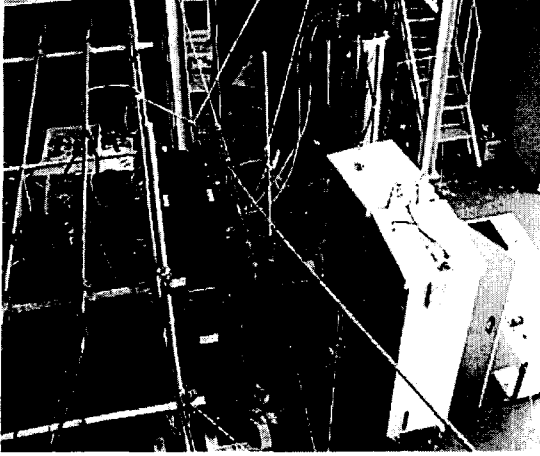


Fig. 5. Assemblage of SFCL system

성하였다. 조립된 회로의 구성도는 그림 1과 같고, 실제 조립된 사진은 그림 5에 나타내었다.

3.2 단락시험 및 결과

제작된 초전도한류기 시스템을 이용하여 한국 전기연구원 전기시험연구소(의왕)에서 한류기 단시간 운전 및 단락시험을 수행하였다. 한류기에 $6.6kV_{rms}/200A_{rms}$ 의 정상전원을 1초간 투입한 후 3상단락시험을 행하였다. 한류기가 없을 경우를 가정한 사고전류는 $4kA_{rms}$ 로 시험 세팅하였으며 단락 사고시간은 최대 3cycles(50ms)로 하였다. 그림 6은 단락 사고시간이 2cycles인 경우의 각 상의 선전류에 대한 실험 결과이다. 그래프에서 약 1.19초인 순간에 사고가 발생하여 약 1.23초 부근에서 차단기 동작하기까지 2주기동안 단락사고가 발생한 것을 볼 수 있다. 사고가 발생하기 이전의 약 1.19초간 제작된 한류기에 정격용량인 $6.6kV_{rms}/200A_{rms}$ 이 투입되었으며, 이러한 단시간 운전 시에 전혀 문제가 발생되지 않았다. 이는 제작된 모든 부품들이 정격용량에서 운전되는데 무리가 없도록 제작되었음을 확인할 수 있는 결과이다. 이는 단시간 운전이기 때문에 전류용량에 있어서는 장시간 운전 시에 발생하는 열 등의 문제점들을 파악하기는 어렵다. 하지만, 전압용량에 있어서는 단시간 운전에서의 결과를 통하여 부품들의 전기절연 설계가 제대로 이루어져 있음을 확인할 수 있다.

그림 6의 그래프에서 사고가 발생한 후 각 상의 선전류들은 써지나 피크전류가 발생하지 않고 시간의 증가와 함께 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 DC 리액터형 초전도한류기의 전형적인 특성이며, 사고발생 초기의 높은 전류에 의한 전력기기들의 손상을 효과적으로 막을 수 있는 특징이기도 하다. 3상은 각각 위상차가 있는 상태로 동시에 사고가 발생하였기 때문에 사고시의 위상각에는 차이가 있다. 따라서 사고 시의 전류또한 각기 다르며, 그림 6의 경우에는 2주기동안 가장 높게 올라간 전류는 S상으로 최대단락전류 $1.70kA_{peak}$ 였다. 한류기

가 없을 경우 최대단락전류는 $5.66kA_{peak}$ 까지 증가하였으며, 이 값과 한류기 있는 경우를 비교하여 볼 때 이 한류기의 2주기까지의 사고전류제한율은 약 30%로 계산된다. 즉, 한류기가 투입됨으로 인하여 사고발생 2주기동안 최대단락전류는 30% 수준으로 제한된다는 것이다. 물론 사고전류제한율은 인덕턴스에 반비례하기 때문에 인덕턴스를 높이면 보다 우수한 제한 효과를 볼 수 있다. 하지만, 인덕턴스를 증가시키는 것은 초전도선재의 비용을 증가시키기 때문에 한류기가 적용될 계통의 기존차단기의 용량 등을 고려하여 적절한 인덕턴스를 결정할 필요가 있다.

그림 7은 그림 6과 동일한 조건에서 회로 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 경과시간 1초인 시점에서 3상 단락을 시뮬레이션 하였다. 그림 6의 실제 단락시험 결과와 그림 7의 시뮬레이션 결과를 비교하여 거의 동일한 결과가 얻어졌음이 확인되었다.

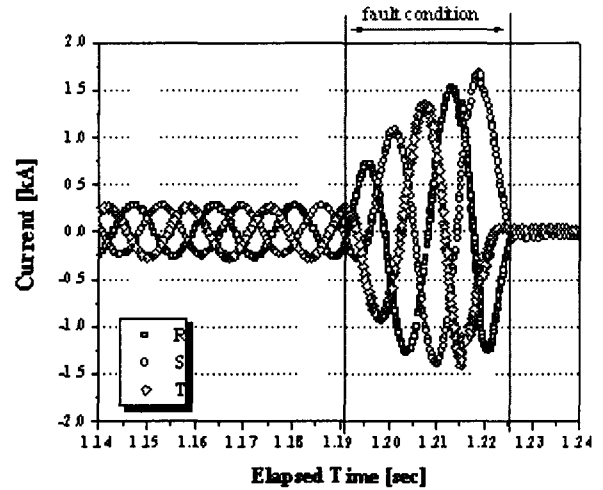


Fig. 6. Experimental Result of the Short-circuit Test

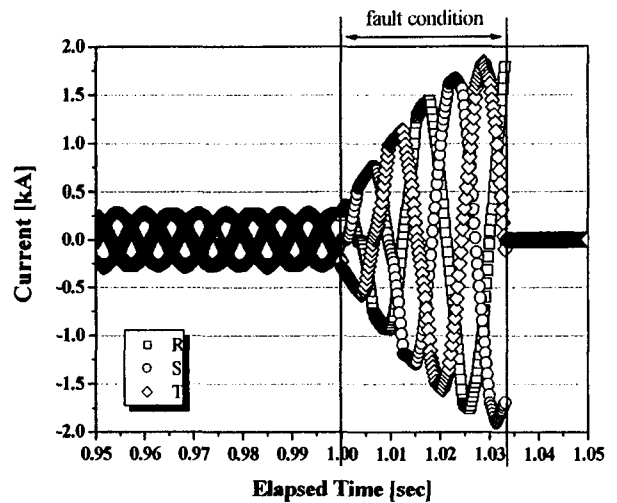


Fig. 7. Simulation Result of the Short-circuit Test

4. 결 론

본 논문에서는 6.6kV_{rms}/200A_{rms}급 DC 리액터형 한류기의 제작과 단시간 운전 및 단락사고 시험 결과를 기술하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 6.6kV/200A급 초전도한류기의 핵심부품인 DC 리액터용 고온초전도 코일, 3상 AC/DC 전력변환기, 자기철심리액터 등의 제작이 성공적으로 이루어졌다.

(2) 1초간 정상운전 시 정격 전압, 전류 용량에서 한류기 전 시스템은 안정적으로 동작하였고, 이후 3상단락 시험을 수행하여 사고전류를 효과적으로 제한하였으며, 2주기까지의 사고제한율은 30%이다.

(3) 단락시험 결과는 회로 시뮬레이션 결과와 거의 동일하게 일치하였다.

(4) 동일 용량의 장시간 운전용 모델 및 22.9kV급 이상의 대용량 DC 리액터형 초전도한류기의 개발에 필요한 파라미터 들을 도출해 내었다.

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

[참 고 문 헌]

[1] Min Cheol Ahn, Seungje Lee, Min Chul Kim, Duck Kweon Bae, Chanjoo Lee, Minseok Joo and Tae Kuk Ko, "Characteristics of critical current of superconducting solenoid wound with the stacked tape", Cryogenics, Volume 43, Issues 10-11, pp. 555-560, 2003

[2] 전우용, 이승재, 안민철, 이안수, 윤용수, 윤경용, 고태국, "DC 리액터형 고온초전도한류기를 위한 전력변환기의 dual-mode 운전특성", KIASC conference 2003 학술대회 논문집, pp. 43-46, 2003