

30 kVA급 유도형 고온초전도 한류기의 특성 연구

Study on the Characteristics of 30 kVA Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limier

이찬주*, 이승제*, 강형구*, 배덕권*, 안민철*, 현옥배**, 고태국***

Chanjoo Lee*, Seungje Lee*, Hyoungku Kang*, Duck Kweon Bae*, Min Cheol Ahn*,
Ok-Bae Hyun**, Tae Kuk Ko***

Abstract: The high-tc superconducting fault current limiters (SFCL) are studied worldwide to be classified as resistive type or inductive type such as magnetic shielding type and dc reactor type. This paper deals with an open core type SFCL, a kind of magnetic shielding type SFCL. We manufactured a 30 kVA open core type SFCL. It was modified from the old one with a rated power of 8 kVA. We stacked four superconducting tubes as magnetic shielding material and used the same primary winding as the old one. The experiments were performed with a maximum source voltage of 1 kV. The results show that the fault current in the source voltage of 1 kVrms was reduced to be about 105 Apeak, which was calculated to be about 22 % of the fault current in the system without an SFCL.

Key Words: high-tc superconducting fault current limiter(SFCL), superconducting tubes

1. 서 론

개방철심형 고온초전도한류기는 2001년 연세대학교에서 8 kVA급으로 제작하여 단락 특성 실험을 한 결과, 사고전류 제한 효과가 다른 형태의 한류기들과 마찬가지로 우수한 것으로 밝혀졌다[1]. 이에 따라 본격적인 전력 계통 적용에 앞서 30 kVA급의 고온초전도한류기를 제작하게 되었다. 30 kVA급 한류기의 용량을 전압/정상전류/제한전류의 형태로 표현한다면 1 kVrms/30 Arms/165 Apeak가 된다. 30 kVA급 고온초전도한류기는 기존의 8 kVA급 한류기를 보완하여 제작하였는데, 이는 30 kVA급의 사고시 인덕턴스가 8kVA급의 약 30 mH정도만으로도 충분한 사고 전류 감소 효과를 얻을 수 있다는 계산을 통하여 결정하게 되었다. 따라서, 철심과 1차 권선 등은 8 kVA급 한류기의 것을 그대로 이용하였으며, 보빈과 초전도체 부분만이 수정되었다. 본 논문에서는 최대 공급전원은 1 kV, 부하저항은 약 101 Ω로 설정하여 단락 테스트를 실시하였으며, 실험 결과를 이용하여 정상 상태에서부터 사고가 발생하여 최대 5 주기 후까지의 임피던스 변화

를 계산하여 살펴보았다.

2. 동작 특성 실험

2.1. 고온초전도한류기 요소

한류기의 구조는 그림 1(a)와 같이 철심이 중앙에 있으며, 초전도 튜브가 그 철심을 감싸는 형태로 보빈 내부에 장착되고, 제일 바깥쪽으로 1차 권선이 위치한다. 각각의 요소에 대한 설명은 아래와 같다.

2.1.1 고온초전도 튜브

본 실험에서는 자기차폐재로써 BSCCO 2212 튜브를 사용하였다. Nexans에서 MCP공법으로 만들어진 튜브로 높이 5 mm, 외경 114 mm, 두께 5 mm의 재원을 가지고 있고, 임계전류는 약 2,500 A이다. 30 kVA급 고온초전도한류기에 사용되는 초전도 튜브는 총 4개로 전체 임계전류는 약 10,000 A가 된다. 1차 권선수는 280이므로, 시스템에 흐르는 전류가 30 A라면, 약 8,400 A가 초전도체에 유기된다. 이는 초전도체 전체 임계전류의 약 84 %에 해당한다. 자기차폐형 고온초전도한류기 중 가장 큰 규모는 스위스 ABB사에서 만든 1.2 MVA급 한류기인데, 이 한류기의 경우, 초전도 튜브에 정상 상태에서 흐르는 전류를 임계전류의 약 87 %로 설정하였다. 이는 BSCCO 2212 튜브의 경우 YBCO 등에 비해 열적으로 안정되어 있기 때문이고, 임계전류 밀도의 불균일함을 고려하여 결정한 것이다[2].

2.1.2 철심

고온초전도한류기의 내부에는 사고발생시 나타나는 임피던스를 크게 하기위해 철심을 사용한다. 본 실험에서 사용된 철심은 8 kVA급 한류기에 사용된 것과 같은 철심을 사용하였다. 두께가 0.5 mm인 규소 강판을 적층시키고, 에폭시로 함침하였으며, 임피던스 발생을 극대화하기위해 단면이 사각형이 아닌 좀더 원형에 가깝도록 제작되었다[1].

2.1.3 기타

1차 권선은 사고 발생시 약 10 Ω의 임피던스를 발생시키기위해 FEM을 통하여 해석한 결과 높이는 150 mm, 권선층수는 4 층으로 하는 것으로 나타났다. 이에 따라 2 mm 두께의 구리 권선을 이용하여 권선한 결과 권선수가 280이 되었다. 8 kVA급 한류기의 보빈과는 달리 30 kVA급 한류기의 보빈 내부는 나선형 홈을 도입하여 액체 질소의 자유로운 흐름을 돕도록 하였다. 보빈 안쪽과 초전도체 사이에는 거의 공간이 없으므로, 사고가 발생하여 초전도체가 켈치되면 발생하는 많은 열로 인해 문제가 생길 가능성이 있어 그림 1(b)와 같

* 학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과

** 정 회 원 : 한국전력연구원 전력계통연구실

*** 정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과

원고접수 : 2002년 04월 08일

심사완료 : 2002년 05월 16일

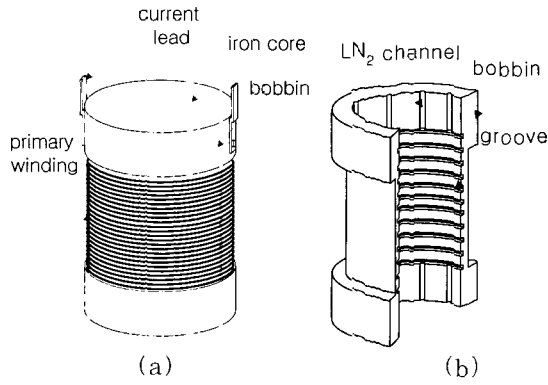


그림 1. 고온초전도한류기 구조
 (a) 한류기 개략도 (b) 한류기 보빈의 내부
 Fig. 1. Structure of SFCL
 (a) schematic view (b) inside view of SFCL

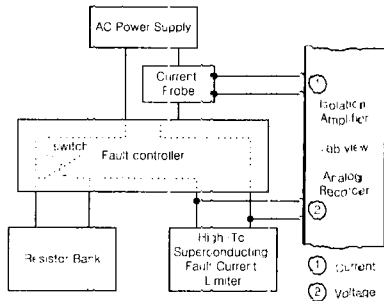


그림 2. 고온초전도한류기 실험도
 Fig. 2. Diagram of the experiment of SFCL

이 나선형의 홈을 제작하였다. 그 홈을 통해 액체 질소가 자유롭게 지나다닐 수 있으며, 웬치가 발생하였을 경우에도 액체 질소와 충분히 접촉하고 있으므로, 회복 속도가 빨라질 것으로 생각된다.

2.1.4 30 kVA급 고온초전도한류기 실험 방법

한류기의 실험은 공급전원이 600 V에서부터 최대 1 kV까지 진행되었으며 차단기가 대부분 3~5 주기이므로 사고 발생 시간도 3 또는 5 주기로 하여 실험하였다. 그 외의 요소값은 항상 동일하게 주었으며, 각 공급전원에 따라 전류의 위상각이 0도와 90도일 경우에 사고를 발생시켜 두개씩의 실험 결과를 얻었다. 그림 2와 같은 실험 setup을 통해 한류기의 양단전압과 전류를 측정하였다. 모든 경우의 부하저항은 101Ω로 하였다. 사고 발생시 부하저항은 순간 0이 되어 한류기가 동작하기 전까지는 선간서항과 공급전원장치의 내부 임피던스를 합하여 약 1.8Ω 정도가 존재하게 된다.

2.2. 30 kVA급 고온초전도한류기 실험 결과

본 논문에서는 공급전원이 800 V인 경우와 1 kV인 경우의 결과를 살펴보았다.

2.2.1 공급전원이 800 V일 경우

공급전원이 800 V인 경우의 결과는 그림 3과 그림 4에 나타나있다. 그림 3은 사고 위상각이 0도인 경우이며, 그림 4는 사고 위상각이 90도인 경우이다.

정상상태에서 시스템에 흐르는 전류는 약 10 Apeak이다. 사고의 위상각이 90도일 경우 최대 98 Apeak의 사고 전류가 발생한다. 그리고 곧 88 Apeak 정도의 전

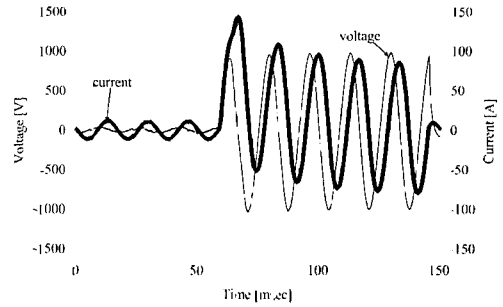


그림 3. 한류기의 양단전압과 시스템에 흐르는 전류 (공급전원 800 V, 사고각 0도)
 Fig. 3. Terminal voltage of SFCL and system current(source voltage 800 V, fault angle 0 degree)

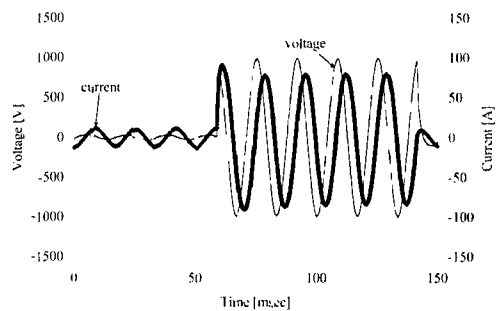


그림 4. 한류기의 양단전압과 시스템에 흐르는 전류 (공급전원 800 V, 사고각 90도)
 Fig. 4. Terminal voltage of SFCL and system current(source voltage 800 V, fault angle 90 degree)

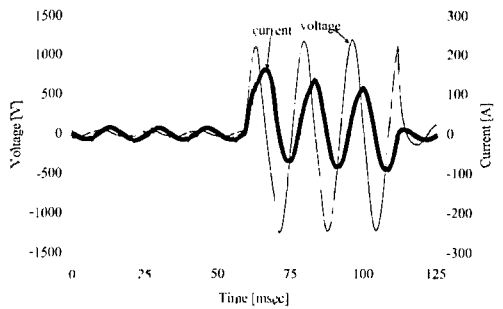


그림 5. 한류기의 양단전압과 시스템에 흐르는 전류 (공급전원 1 kV, 사고각 0도)
 Fig. 5. Terminal voltage of SFCL and system current(source voltage 1 kV, fault angle 0 degree)

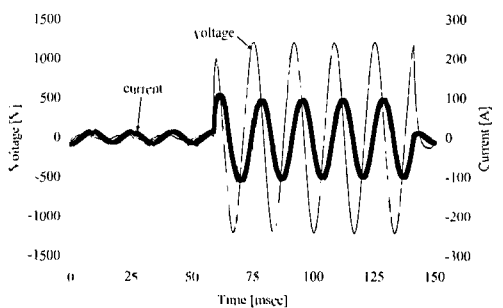


그림 6. 한류기의 양단전압과 시스템에 흐르는 전류 (공급전원 1 kV, 사고각 90도)
 Fig. 6. Terminal voltage of SFCL and system current(source voltage 1 kV, fault angle 90 degree)

류로 안정화되는 것을 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 3의 결과를 살펴보면, 정상상태에서 흐르는 전류는 그림 4와 동일하고, 사고가 발생했을 경우 약 150 Apeak의 전류가 순간적으로 흐르고 인덕턴스의 영향으로 전류는 서서히 줄어드는 모습을 보인다. 약 5 주기 후에 80 Apeak의 전류가 흐르게 된다.

2.2.2 공급전원이 1 kV일 경우

공급전원이 1 kV인 경우의 결과는 그림 5와 그림 6에 나타나있다. 그림 5는 사고 위상각이 0도인 경우이며, 그림 6은 사고 위상각이 90도인 경우이다.

공급전원이 1 kV일 경우 정상상태에 흐르는 전류는 약 13.5 Apeak가 흐르게 된다. 그림 6과 같이 사고의 위상각이 90도 일 경우 사고 발생 순간 약 105 Apeak의 최대 사고전류가 흐르게 되고 곧 98 Apeak의 전류로 안정화된다. 그림 5와 같이 사고의 위상각이 0도 일 경우 사고 순간의 사고전류는 약 165 Apeak가 흐르게 되며, 이 전류가 과도 상태를 거쳐 3주기에서 5주기 후에는 약 100 Apeak의 전류로 안정화됨을 예측할 수 있다.

2.3. 임피던스 발생 해석

사고가 났을 경우 개방철심형 고온초전도한류기가 발생시키는 임피던스는 대부분 유도 성분이다. 이는 그림 7~8에서 확인할 수 있는데, 정상상태에서는 전압축에 비해 전류축이 상당히 긴 타원으로 나타나는데, 이는 저항성분은 거의 없고, 약간의 유도 성분으로 대부분 구성되어 있다는 것이다. 저항 성분은 모두 구리 권선의 저항으로 볼 수 있으며, 유도 성분은 차폐되지 않고 누설되어 나온 자속들에 의해 발생하는 성분으로 볼 수 있다. 그림 7은 공급전원은 1 kV, 사고 발생각이 90도인 경우의 전류 대 양단전압 곡선이며, 그림 8은 공급전원 1 kV, 사고 발생각이 0도인 경우의 전류 대 양단 전압 곡선이다.

그림 7에서 보면 사고 발생 후 한류기에 발생하는 전압이 급격하게 증가하여 a 부분에서 기울기가 급격하게 증가하며, 그 후 타원 형태의 곡선이 그려지는데, 이는 인덕턴스에 의한 임피던스가 대부분이라는 것을 보여주는 것이다. 그림 7과 그림 8의 차이점은 그림 8의 곡선 중 오른쪽 부분이 그림 7에 비해 튀어나와 상대적으로 비대칭인 타원을 그린다는 점인데, 이는 0도 사고에 따른 인덕턴스의 영향에 의한 과도적 현상이다.

사고가 발생했을 경우 과도해석을 수행하여야 하는데, 과도해석에서의 강제응답(forced response)은 정현파이며, 자연응답(natural response)은 사고발생각에 의존하는 초기값을 갖고 시간에 따라 지수함수적으로 감소하는 파형을 나타낸다. 이 때, 공급전원의 0도에서 사고가 발생하면 자연응답의 초기값이 0이 아닌 값을 갖고 시간에 따라 감소하는 모양을 나타낸다. 또한, 사고각이 공급전원의 90도에 해당한다면 자연응답의 초기값이 0이 되므로, 자연응답은 나타나지 않는다. 따라서, 사고각이 0도인 경우에서 최대 사고전류가 발생하고, 90도인 경우에는 최소의 사고전류를 갖게 된다. 본 논문에서는 사고가 발생하기 전에는 부하의 대부분이 저항성분이므로 공급전원의 파형과 시스템에 흐르는 전류의 파형간의 위상차는 거의 없으므로, 공급전원에서 본 사고각도와 전류로 본 사고각도의 차이가 거의 없다.

그림 9는 공급전원 1 kV, 사고 발생각 90도인 경우 정상 상태와 사고 상태에서의 임피던스 변화를 시간에 따라 보여주는 그림이다. 정상 상태에서는 약 2.8~2.9 Ω의 임피던스가 나타나는데 이는 구리 권선의 저항과 누설 자속에 의한 유도 성분으로 판단된다. 정상 상태

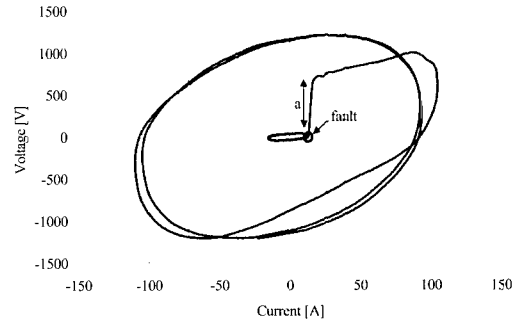


그림 7. 전류 대 한류기의 양단전압 곡선 (공급전원 1 kV, 사고각 90도)

Fig. 7. curve of current vs terminal voltage of SFCL (source voltage 1 kV, fault angle 90 degree)

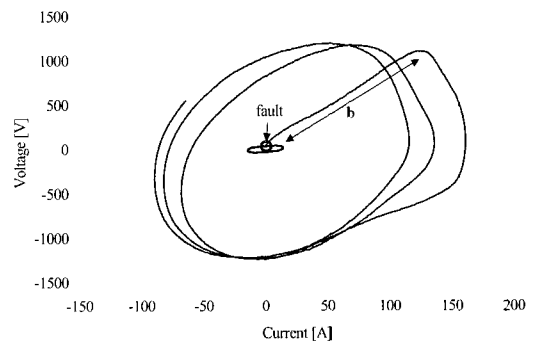


그림 8. 전류 대 한류기의 양단전압 곡선 (공급전원 1 kV, 사고각 0도)

Fig. 8. curve of current vs terminal voltage of SFCL (source voltage 1 kV, fault angle 0 degree)

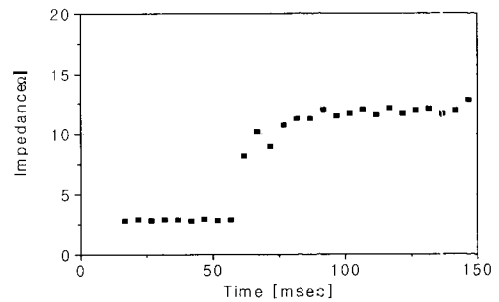


그림 9. 임피던스 발생 그래프

Fig. 9. Graph of impedance generation

의 양단전압과 전류를 이용하여 phasor로 좀더 자세히 계산해보면[1], 저항성분은 0.93 Ω 유도성분은 2.85 Ω로 나타나고, 유도성분을 인덕턴스로 환산하면 약 7.5 mH가 된다. 공급전압이 커지면서 보다 큰 인덕턴스가 정상상태에 발생한 것을 볼 수 있다. 이를 줄이기 위해서는 누설 자속을 최소화하여야 하는데, 이는 현재 수행하고 있는 전자장 해석을 이용한 최적의 1차 권선과 초전도 튜브의 구조를 결정하는 연구를 통해 이루어져야 할 것이다.

그림 9에서 보듯이 사고가 발생하면 임피던스는 급격히 증가하게 된다. 사고는 약 58 msec에서 발생하는데, 약 1 주기가 지나면 11.5 Ω의 임피던스가 발생하게 되어 계속 지속된다. 그리고 61.8 msec인 지점 즉, 사고 후 약 1/4 주기가 지난 시점에서 발생한 임

피턴스가 약 8.0로 최대 임피턴스의 약 70 %가 된다. 이는 지난 8 kVA급 고온초전도한류기의 실험에서 보여준 임피턴스 발생 속도보다 훨씬 빠르게 임피턴스가 발생하였다는 것을 보여준다[1]. 8 kVA급 한류기의 경우 사고 발생 후 1/2 주기만에 최대 임피턴스의 약 30 % 정도만이 발생한 것을 알 수 있다. 공급되는 전력이 클수록 켜치되는 속도가 빠르기 때문에 임피턴스 발생 속도 또한 빠르다고 생각된다.

3. 결 론

본 논문에서는 30 kVA급 유도형 고온초전도기를 개발하여 단락 특성 실험을 수행하였다. 그 결과 공급전원 1 kV, 사고 발생각 90 도의 경우, 사고 발생시 한류기가 없는 경우의 사고전류의 약 22 % 수준으로 사고전류를 제한하는 것을 알 수 있었다. 또한, 사고 발생후 최대 임피턴스의 약 70 %가 발생하는 시점이 1/4 주기 정도가 되어 빠른 사고전류 제한을 가능하게 한다는 것을 알 수 있었다. 사고 발생각이 90 도인 경우와 0 도인 경우, 두 가지로 나누어 실험한 결과, 최악의 상황은 0 도에서 발생한다는 것을 알아냈으며, 따라서, 0 도 사고의 경우를 한류기 설계 등의 기준으로 삼아야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 이찬주, 이승제, 강형구, 김태중, 현옥배, 고태국, " 개방철심형 고온초전도한류기의 동작 특성", 한국초전도 저온공학회논문지, 3권, 1호, pp. 40~44, 2001.5
- [2] W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, P. Unternahrer, Th. Baumann, M. Chen, L. Widenhorn, and A. Guerig, "Test of a 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter", in Inst. Phys. Conf. Ser., vol. 158, pp.1173~1178, 1997
- [3] E. Leung, and B. Burley, "Design & Development of a 15kV, 20kA HTS Fault Current Limiter", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 10, No. 1, pp.832-835, March, 1999
- [4] W. Paul, Th. Baumann, and J. Phyner, "Tests of 100 kW high-Tc superconducting fault current limiter", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 5, No. 2, pp.1059-1062, June, 1995

저 자 소 개



이찬주(李燦周)

1972년 2월 20일생, 1995년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



이승제(李丞濟)

1974년 5월 30일생, 1997년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



강형구(姜亨求)

1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



배덕권(裵德權)

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 광운대학교 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 2월 연세대학교 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 공학사, 1983년 Case Western Reserve University 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 총무이사



현옥배(玄鉞培)

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대학교 물리학과 졸업(학사), 1987년 Iowa State Univ. Ph.D (고체물리학), 1987년~1991년 Ames Lab. postdoctoral fellow, 1991년~1992년 NIST 연구원, 1992년~1995년 ISTE(C(일본) Fellow, 현재 전력 연구원 책임연구원