

## 개방철심형 고온초전도한류기의 동작 특성

### Operational Characteristics of a Superconducting Fault Current Limiter with an Open Core

이찬주\*, 이승제\*, 강형구\*, 김태중\*\*, 현옥배\*\*\*, 고태국#

Chanjoo Lee\*, Seungje Lee\*, Hyoungku Kang\*, Taejung Kim\*\*, Ok-Bae Hyun\*\*\*, Tae Kuk Ko#

**Abstract** : Recently, the high- $t_c$  superconducting fault current limiters (SFCL) are studied worldwide to be classified as a resistive type or an inductive type such as a magnetic shielding type and a dc reactor type. The high- $t_c$  SFCL with an open core belongs to the magnetic shielding type SFCL. Unlike conventional magnetic shielding type SFCLs, it uses the open core to reduce the mechanical vibrations and installation space. The high- $t_c$  SFCL with an open core was designed and manufactured by stacking three BSCCO 2212 tubes. It was tested in the maximum source voltage of 400 Vrms. The results such as the reduction of fault current and impedance of the SFCL are described in this paper. The results show that the fault current in the source voltage of 400 Vrms was reduced to be about 123 Apeak, about 3.9 times greater than the normal state current. Also, the impedance of the high- $t_c$  SFCL was about  $9 \Omega$ , about 9 times greater than the normal state impedance. The impedance of the SFCL appears just after the fault, and its size is dependent on the source voltage. From the impedance, the inductance of the SFCL was calculated.

**Key Words** : high- $t_c$  superconducting fault current limiter(SFCL), reduction of fault current, impedance

## 1. 서 론

초전도 한류기(superconducting fault current limiter: SFCL)는 초전도 전력 기기 중 변압기, 케이블 등과 더불어 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나이다. 초전도 한류기는 계통의 용량 증가와 전력 기기 보호를 위한 필수적인 전력기기로 인식되어 여러 나라에서 연구 중에 있다. 고온초전도한류기는 크게

유도형과 저항형으로 나눌 수 있는데, 저항형 고온초전도한류기는 송전급 계통 적용시 대전류를 직접 고온초전도체가 감당해야 하며 사고 발생시 퀀치로 인한 열적 스트레스가 상당히 심하여 초전도체의 안정성에 문제가 있다. 1997년 스위스 ABB사에서 10.5 kV급 자기차폐형 고온초전도한류기를 개발하여 수력발전기와 연계하여 실증실험을 거쳤으며(1), 1998년 미국에서는 15 kV급 dc reactor형 고온초전도한류기를 개발하여 시험 선로에서 실증실험을 마쳤다(2). 개방철심형 고온초전도한류기는 자기차폐형 고온초전도한류기의 일종으로 페루프의 자속 경로를 갖는 기존의 자기차폐형과는 달리 개방형 철심을 사용하게 된다. 개방철심형 고온초전도한류기는 그 철심구조로 인해 일반적인 자기차폐형 고온초전도한류기보다 구조가 간단하고, 부피 및 무게가 적으며, 철심간의 연결부위가 없으므로 사고시 발생하는 기계적인 진동도 크게 줄일 수 있다. 본 논문에서는 400 Vrms급 개방철심형 고온초전도한류기를 제작하여 그 동작특성 실험을 수행하였다. 공급전원을 달리하여 사고전류 제한 효과를 실험하였으며, 그 결과를 이용하여 임피던스 및 인덕턴스 발생을 공급전원에 따라 비교하였다.

## 2. 동작 원리 및 동작특성실험

### 2.1. 동작 원리

개방철심형 고온초전도한류기는 자기차폐형 고온초전도한류기와 동일한 동작 원리를 갖는다. 자기차폐형 고온초전도와 마찬가지로 개방철심형 고온초전도한류기의 등가회로는 그림 1에서 보이는 것과 같이 변압기의 전기 등가회로를 응용하여 사용된다. 변압기 회로에서의 2차측 권선이 초전도 튜브에 해당하므로 초전도 튜브의 저항  $R_s$ 와 초전도 튜브에서 발생하는 누설 인덕턴스를  $L_s$ 로 표현하여 등가회로를 구성한다.  $R_s$ 는 공급전원의 내부 저항과 선간 저항을 나타낸다. 정상상태에서는 초전도체의 저항  $R_s$ 가 0이므로 거의 모든 전류는  $R_s$ 로 흐르게 되고, a-b사이에서는 누설 인덕턴스에 의한 매우 작은 전압강하만 발생한다. 부하 저항과 병렬로 연결되어 있는 스위치를 내리면 부하 저항  $R_L$ 이 단락되어 사고 상태가 되고, 초전도 튜브가 퀀치되어 저항  $R_s$ 가 발생하며 거의 모든 공급전압이 a-b사이에 나타난다. 이 때, 사고 전류는 정상 상태에서는 거의 발생하지 않다가 초전도 튜브의 퀀치에 의해 나타나는 자속에 의해 1차 권선에서 나타나는 인덕턴스  $L$ 과 누설자속  $L_s$ , 초전도 튜브 저항  $R_s$ 에 의해 제한된다.

\* 학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과  
 \*\* 정 회 원 : 성남기능대학 전기공학과  
 \*\*\* 정 회 원 : 한국전력연구원 전력계통연구실  
 # 정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과  
 원고접수 : 2001년 05월 02일  
 심사완료 : 2001년 05월 22일

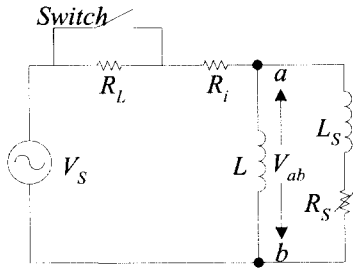


그림 1. 개방철심형 고온초전도한류기 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of an SFCL with an open core

2.2. 동작특성 실험

공급전원은 100 Vrms부터 400 Vrms까지 순차적으로 증가시키며, 부하저항은 공급전원에 상관없이 18 Ω로 설정하였다. 개방철심형 초전도한류기는 크게 초전도 튜브와 철심, 그리고 1차 권선으로 나뉜다. 철심이 중앙에 위치하며 철심을 감싸는 형태로 튜브 모양의 초전도체가 들어가게 된다. 그 밖으로 1차 구리 권선이 위치한다. 본 논문에서 사용된 각 요소들의 제원은 아래에 나타나있다.

2.2.1. 초전도 튜브

자기차폐형 고온초전도한류기에는 일반적으로 BSCCO 2212 튜브가 사용된다. 본 논문에서 사용된 BSCCO 2212 튜브는 Nexans 사에서 MCP (Melting Cast Process) 공법으로 만들어졌으며, 각 제원은 표 1과 같다. 400 Vrms의 공급전원과 18 Ω의 부하저항을 갖는 시스템의 정상 상태에서 흐르는 전류는 약 22 Arms이며, 1차측 권선을 280 turn으로 가정한다면 약 6,160 Arms의 전류가 초전도 튜브에 흐르게 된다. 따라서, 초전도 튜브의 교류(60Hz) 임계전류는 6,160 Arms 이상이 되어야 한다. 또한, 정상상태의 안정적인 동작을 위해서는 임계전류와 정상상태에 흐르는 전류 사이에 어느 정도 차이가 있어야 하는데, 이를 위해 임계전류가 약 2,400~2,500 Arms인 BSCCO 2212 튜브 3개를 stack하여 총 임계전류가 약 7,500 Arms가 되도록 하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용된 BSCCO 2212 초전도 튜브 하나의 사진이다.

2.2.2. 철심

고온초전도한류기의 가장 큰 특징은 사고 발생시 임피던스를 급격히 증가시킨다는 것이다. 임피던스의 증가에 따라 사고전류가 제한되는 속도가 결정되므로 큰 임피던스는 한류기의 가장 중요한 요인이 된다. 따라서, 이번 한류기 실험에서는 철심을 그림 3와 같이 단면을 최대한 원에 가깝게 제작하여 임피던스를 향상

표 1. 초전도 튜브의 제원

Table 1. Specifications of a superconductor

parameter	value
height	150 mm
outer diameter	114 mm
thickness	5 mm
critical current	7,500 Arms at 77K and 0 T



그림 2. MCP 공법으로 제작된 BSCCO 2212 튜브  
Fig. 2. BSCCO 2212 tube by MCP process

시키도록 하였다. 기존에 사용했던 철심은 단면적이 정사각형 형태로 가로와 세로가 각각 65 mm로 4,225 mm<sup>2</sup>의 면적을 가졌으며, 개조된 철심은 6,200 mm<sup>2</sup>의 단면적을 갖는다. 개조된 철심의 단면적은 기존의 철심에 비해 약 1.5배가 증가하였고, 이로 인해 사고 발생 시 나타나는 1차 권선의 인덕턴스는 기존 철심을 사용한 경우보다 더 커지게 된다. 그 이유는 철심의 단면적이 증가하면 1차 권선 내에 쇄교되는 총 자속량도 증가하는데, 인덕턴스는 총 자속량에 비례하기 때문이다.

2.2.3. 기타

1차 권선은 구리선을 사용하였으며, 구리선의 직경은 2 mm이며, 권선의 총 턴수는 280으로 4층으로 감겨있다. 권선과 초전도 튜브와의 거리는 약 7 mm이며, 초전도 튜브와 철심과의 최소거리는 2 mm, 보빈의 재질은 포베이크라이트를 이용하였다. 초전도체를 냉각하기 위한 냉각기는 따로 설치되지 않고 전체 한류기 시스템이 냉각되게 된다. 그림 4은 철심과 초전도 튜브, 그리고 1차 구리 권선이 서로 결합된 고온초전도한류기의 개략도를 나타낸다. 그림 5는 고온초전

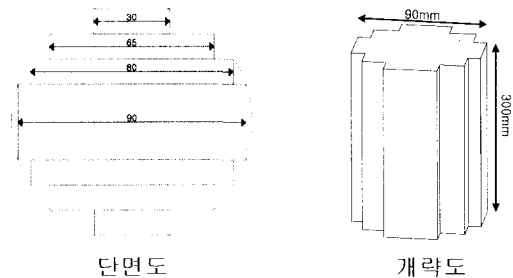


그림 3. 고온초전도한류기용으로 개선된 철심  
Fig. 3. Improved iron core for high-Tc SFCL

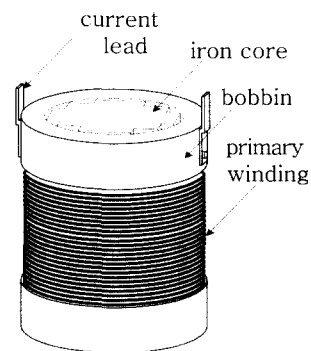
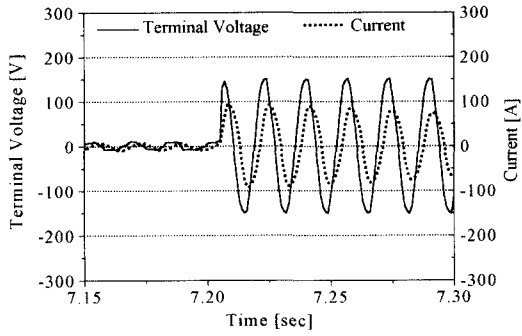
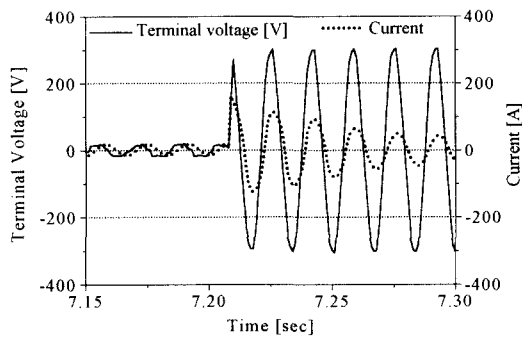


그림 4. 개방철심형 한류기의 개략도  
Fig. 4. Schematic view of the SFCL with an open core.

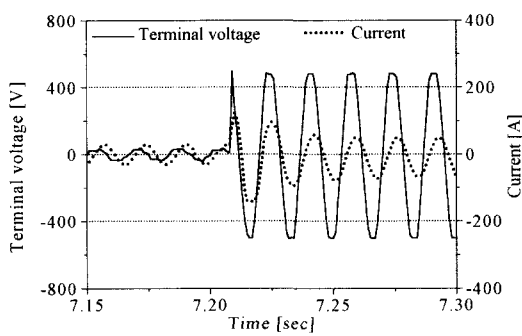




(a)



(b)



(c)

그림 8. 공급전원에 따른 전류와 양단전압 파형 (a) 100 Vrms, (b) 200 Vrms, (c) 400 Vrms  
Fig. 8. Currents and terminal voltages according to the source voltage (a) 100 Vrms, (b) 200 Vrms, (c) 400 Vrms

기가 없는 경우에는 약 1 Ω의 교류 전원장치의 내부 임피던스, 약 0.8 Ω의 선간 저항 등을 고려하여 계산하면 사고전류는 310Apeak가 발생하게 되는데, 한류기로 인해 40% 정도가 감소된 것이다. 또한, 400 Vrms에서의 최대 사고전류가 200 Vrms에서의 그것에 비해 감소된 것은 그림 7의 임피던스 발생 곡선에서 보이는 것처럼 400 Vrms에서의 임피던스가 200 Vrms에서보다 훨씬 빠르게 증가하기 때문이다.

### 3.3 임피던스 및 인덕턴스 변화

임피던스를 구하기 위해 한류기의 양단전압과 전류의 RMS값을 아래의 식을 이용하여 계산하였으며, 그 값을 이용하여 임피던스를 계산하였다. 사고 발생 후 한류기의 양단전압과 사고전류의 위상차, 사고전류의 지속적인 감소 등의 이유로 RMS값을 이용하여 계산하였다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t_1}^{t_2} v_t^2}, \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t_1}^{t_2} i_t^2}$$

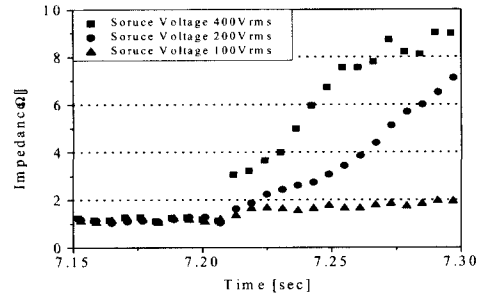


그림 9. 시간에 따른 임피던스

Fig. 9. Impedance as time elapses

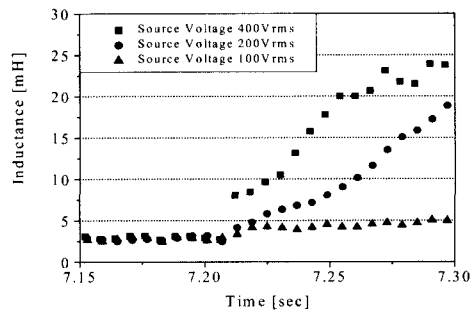


그림 10. 시간에 따른 인덕턴스

Fig. 10. Inductance as time elapses

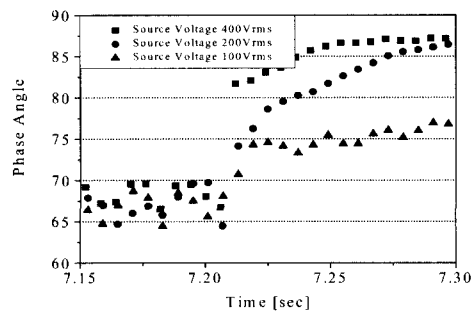


그림 11. 시간에 따른 위상각

Fig. 11. Phase angle as time elapses

여기서,  $t_2 - t_1 = T$ ,  $T$ 는 60 Hz 정현파의 한 주기이다. 계산 결과, 그림 9에서 보이는 것과 같이 개방철심형 고온초전도한류기는 공급전원에 상관없이 정상 상태에서는 약 1 Ω의 임피던스를 갖지만, 사고가 발생하면 공급전원에 따라 다른 임피던스가 발생된다. 사고 발생 후 약 5주기 후에 공급전원이 100 Vrms인 경우 약 2 Ω의 임피던스를, 공급전원이 200 Vrms인 경우 약 7 Ω이 발생하였으며, 공급전원이 400 Vrms인 경우에는 약 9 Ω가 발생한다. 또한, 임피던스 발생의 속도에서도 차이가 나타나는데, 공급전원이 커질수록 임피던스 발생의 속도는 빠른 것을 알 수 있다.

임피던스 계산결과를 이용하여 대략적인 인덕턴스를 유추하기 위해 저항 성분은 정상 상태와 사고 상태에서 일정하다고 가정하였다. 그 이유는 사고가 발생하면 주로 인덕턴스 성분에 의해 사고전류의 제한이 이루어지기 때문이다. 지속적인 연구를 통해 저항 성분의 변화를 관찰하여 더 정확한 인덕턴스를 계산할 예정이다.

$Z^2 = R^2 + (\omega L)^2$ 에서  $L = \frac{1}{\omega} \sqrt{(Z^2 - R^2)}$ 를 이용하여 계산한 결과 그림 10과 같이 나타났다. 예상대로, 인덕턴스 역시 공급전원에 의존성을 갖게 되는데, 공급전원이 크면 발생하는 인덕턴스도 커지게 된다. 인덕턴스가 변하는 이유는 초전도체가 초전도 상태에서 정상 상태로 전이하면서 초전도체의 차폐특성이 변하기 때문이다.

그림 11은 한류기 양단에서 측정된 전압강하와 시스템의 전류 사이의 위상각을 나타내는 그림이다. 공급전원이 400Vrms인 경우에는 사고 발생 순간 급격히 증가해 약 5주기 후에 거의 90°에 접근하지만, 200Vrms의 경우에는 400Vrms와 비교하면 사고 순간에는 상대적으로 작은 위상각을 가지게 된다. 그리고, 100Vrms인 경우 5주기 후에도 약 77°의 위상각을 가지게 된다. 이는 초전도 튜브의 켈치가 완전히 이루어지지 않아 저항 성분에 비해 충분한 인덕턴스를 발생시키지 못하기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 400 Vrms급 개방철심형 고온초전도한류기를 설계 및 제작하였다. 그 결과, 공급전원이 400 Vrms인 경우 사고가 발생하였을 때 예상되는 사고전류의 40 % 가량인 123 Apeak의 사고전류가 발생하였다. 또한, 임피던스와 인덕턴스의 발생은 공급전원에 따라 차이가 남을 알 수 있었다. 그 이유는 전류의 크기에 따라 초전도체가 켈치되는 속도가 차이나며, 켈치에 따른 열전파의 속도가 다르기 때문으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 과제는 과학기술부와 한국전력연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, P. Unternahrer, Th. Baumann, M. Chen, L. Windenhorn, and A. Guerig, "Test of a 1.2 MVA high-superconducting fault current limiter", in Inst. Phys. Conf. Ser., vol. 158, pp.1173~1178, 1997.

[2] 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



**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



**김태중(金泰重)**

1987년 홍익대학교 전기공학과 졸업, 1991년 연세대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정, 현재 성남기능대학 전기공학과 부교수



**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 한국초전도저온공학회 총무이사



**현옥배(玄鉦培)**

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(일본) Fellow, 현재 전력연구원 책임연구원