

병렬우선 직렬연결된 YBCO박막형 초전도 한류기의 용량증대

박권배, 이방욱, 강종성, 오일성, \*현옥배  
 LG산전 전력연구소, 한전전력연구원\*

Enhancement of Power Rating for the Resistive Fault Current Limiter

K.B. Park, B.W. LEE, J.S. Kang, I.S. Oh, \*O.B. hyun  
 ELECTROTECHNOLOGY R&D CENTER, LG Industrial Systems, KEPRI\*

**Abstract** - The series and parallel connection is essential for increasing power ratings of resistive type for fault current limiters. To increase voltage class, components are connected in series and to increase current level to the nominal value, they are connected in parallel. There are two ways to connect components in series and parallel. First, connected in series and then the module connects to the parallel. Second, connected in parallel and the module connects to the series. We have studied for the two ways.

In this paper, we particularly investigated way to connect components in parallel first. This way has the advantage of inducing effective simultaneous quench without any other devices, for example, the thing which is inducing magnetic field to the limiting and shunt resistors. And also we studied for the endurance of component which is patterned to the bi-spiral for prospective fault current. It is very important to understand this, because SFCL will use as the only device to decrease burden of circuit breaker. As experimental results, limiting component patterned to bi-spiral endures fault current up to 30kA and it works well, in parallel to series connection,

1. 서 론

지속적인 계통사고 전류의 증가는 새로운 개념의 전류 제한 장치의 도입이 요구되고 있는 상태이다. 이와 같은 상황에서 초전도 한류기를 통한 사고전류 제한기술은 미래 전력계통에 필수적이라고 할 수가 있다. 현재까지, 초전도 한류기의 개발은 선진 전력기기 메이커를 주축으로 선행 연구되고 있으며, 이미 배전급인 3상 10kV급 한류기 개발에 성공하였다. 이에 발을 맞추어 국내에서도 한전전력연구원과 LG산전은 공동으로 2004년 4월에 3상 6.6kV/200A 초전도 저항형 한류기 개발에 성공하였으며, 대학으로는 연세대학교에서 정류형 초전도 한류기 개발에 성공한 상태이다.

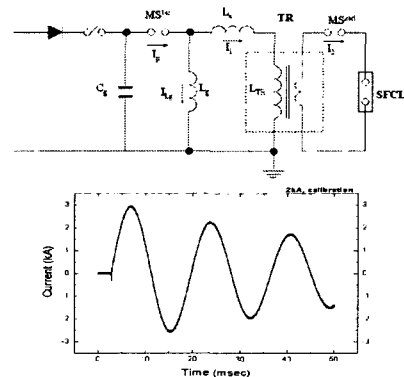
무엇보다도 초전도 한류기의 상업화에 필수적인 것은 고용량의 한류소자개발에 있다. 그로써, 한류소자의 개수를 최소화함으로써 소형 경량화 및 경제적인 한류기를 개발 할 수 있다. 현재 개발된 저항형 한류소자에는 대면적 YBCO thin film(이하, 박막), 대면적 YBCO thick film(이하, 후막) 및 Bi2212 벌크를 들 수가 있다. 이 중에서 한류소자의 용량증대를 위해서 직·병렬연결을 하며, 이와 동시에 한류소자간 불균일특성으로 인해서 동시켄치에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 본 연구에서는 YBCO 박막의 용량증대에 필요한 기술인 직병렬 연결 방식과 한류소자의 사고전류 내력특성을 조사하였

다.

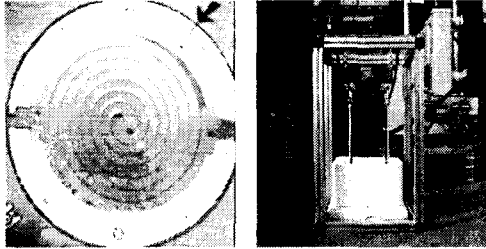
2. 샘플 및 실험 방법

2.1 단위 한류소자의 내력시험

단위소자의 한류소자의 사고전류에 대한 최대 내력특성을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 시험장치 및 샘플을 이용하였다. Fig. 1(a)는 시험회로로 콘데서의 총·방전 특성을 이용한 단락설비로써 400V, 30kA까지의 사고전류를 실험적으로 모의 할 수 있었다. Fig. 1(a)의 교정파형에서 알 수 있듯이 본 설비의 특징은 선로저항에 의해서 전류가 점차로 감쇄하는 특징을 갖으며, 한류소자가 투입된 경우에는 보다 큰 저항발생 때문에 본 시험에서는 첫 번째 주기에서 한류소자의 사고전류에 대한 내력특성 파악을 하는데 의미를 두었다. 또한, Fig. 1(b)는 시험시료 및 실험을 위해 한류소자가 장착된 사진이다. Fig. 1(b)의 그림에서 알 수 있듯이 4인치 YBCO박막에 bi-spiral pattern의 한류소자를 사용하였으며, 이는 6.6kV/200A 3상 한류기 제작에 사용되었다. 특히, Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 한류소자의 켄치이후 메카니즘을 조사하기 위해 고속카메라를 이용하여 한류소자에서 발생된 열에 의해서 발생하는 버블의 성장과정을 관찰하였다. 여기서, bi-spiral pattern의 특징은 한류소자 전체 선폭 내에서 비교적 균일한 전류밀도가 형성되며, pattern의 안쪽 곡면에 전류밀도가 비교적 높기 때문에 가장 먼저 켄치가 됨을 알 수 있었다. 그러나, 일반적으로 가장 많이 사용되는 meander pattern에 비해서 한류 소자의 특정부위 소손으로부터 보다 자유로울 수 있다. 또한 bi-spiral pattern은 무유도 방식이기에 자기자기 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다.



a) the test circuit and the waveform of calibration



b) bubble inspection of test component and installation

Fig. 1. The test component and test circuit.

## 2.2 한류소자의 병렬 및 직·병렬연결 시험

초전도 한류기의 전류용량 증대를 위한 방법은 병렬연결 방법을 사용한다. 이것은 단위 한류소자의 통전전류인  $I_c \times 0.7$ 이 낮은 경우에 전류용량을 증대시킬 필요가 있기 때문이다. 병렬연결시 가장 중요한 것 중에 하나는 균일한 전류분배에 있다. 그러므로 전극에서 접촉저항을 균일하게 만드는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 분류된 전류를 측정하기 위하여 분기회로로 자체 제작된 로고스키코일을 삽입하였다.

Fig. 2. a)는 한류소자의 병렬연결 특성을 조사하기 위한 배열을 나타내었으며, Fig. 2. (b)는 사고전류가 통전된 후에 버블 촬영한 결과를 나타내었다. 본 시험에 사용된 한류소자는 2인치 meander pattern의 한류소자를 이용하였다.

Fig. 3은 병렬우선 직렬결선의 개념을 나타낸 그림이다. 이것은 병렬연결을 먼저 결선하여 하나의 모듈로 만들고 그 모듈을 다시 직렬 연결하는 방식이다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 단위 한류소자의 내력시험

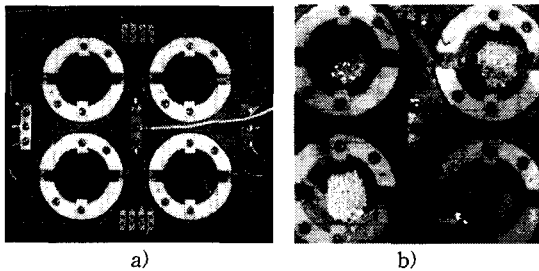


Fig. 2. The module connected in parallel of 4 components and bubble inspection.

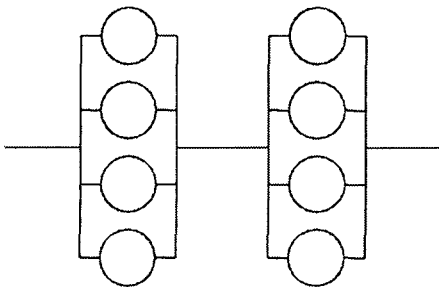


Fig. 3. A concept of connection in the parallel first.

초전도 저항형 한류기를 설계하기 위해서 단위 한류소자의 사고전류 내력특성을 조사하는 것은 무엇보다도 중요하다. 원칙적으로 초전도한류기는 차단기의 정격과 달리 kA개념을 도입하지 않는다. 그러나, 한류소자는 예상 사고 전류가 커짐에 따라서 초기에 보다 큰 power를 경험하기 때문에 소손의 우려가 있다는 것이다.

Fig. 4는 사고전류의 크기를 2kA에서부터 30kA까지 증가시키면서 한류소자에 흐르는 전류를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 사고전류가 증가하면서 전류상승 속도가 크게 증가하면서 한류시점도 92 $\mu$ sec에서 6 $\mu$ sec로 15배 정도 증가됨을 알 수 있었다. 또한 한류시점 최대 전류 값의 크기도 증가하였다. 이것은 한류소자의 저항 상승 속도가 전류상승 속도를 따라가지 못한 결과이다. 그럼으로, 예상 사고전류가 클수록 한류소자는 초기한류시점에서 보다 큰 power값을 갖게 된다.

Fig. 5는 사고전류가 투입된 이후에 한류소자의 저항 성장을 나타낸 결과이다. 결과에서 알 수 듯이 초기한류시점에서 매우 큰 저항이 발생된다. 이것은 한류소자가 초기 한류시점에서 한류소자에 가장 큰 부담을 주게 되며, 그 이후에는 점차적인 소자의 온도상승으로 이어진다. 한류소자가 켜진 후 사고 지속시간 10msec 이후에 최대 온도 상승은 160K이하이다.

Fig. 4 및 Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이 YBCO 박막을 이용한 한류소자에 투입된 사고전류가 30kA에서 까지도 소손 없이 잘 견디는 것으로 보아 초전도 한류기의 한류소자로 사용되는데 매우 적합함을 알 수가 있었다.

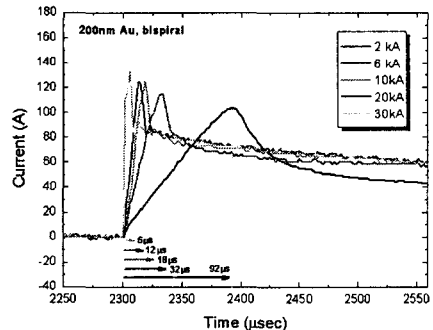


Fig. 4. Current limiting characteristic according to prospective fault current.

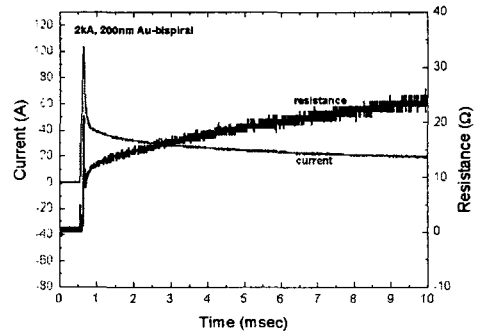


Fig. 5. Resistance rise of component and limiting current.

### 3.2 한류소자의 병렬 및 직·병렬연결 시험

본 연구에서는 초전도 한류기의 용량 증대를 위한 방안으로 사용되는 한류소자의 직·병렬연결 특성을 조사하기 위한 것이다. 직·병렬연결 방식에는 직렬 우선 병렬 연결 방법이 있으며, 병렬 우선 직렬연결 하는 방법이

있다. 여기서는 후자인 병렬 우선 방식을 채택하였다. 병렬우선 직렬 연결하는 방식의 장점은 직렬연결간 동시퀀치 문제가 없다는 장점이 있으며, 특히 병렬소자가 많을 수록 동시퀀치 문제에서 자유로운 반면에 한 개의 한류소자에 문제가 발생하게 되면 직렬 연결된 소자간 불균형이 보다 쉽게 깨어진다. 그러나, 병렬연결 소자간 상호 보완기능이 뛰어나므로 실제로 큰 문제는 아니다.

Fig. 6는 병렬연결에 사용된 4개의 한류소자의 임계전류특성을 조사한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 한류소자 1, 2, 3은 비교적 임계전류가 비슷하나, 한류소자 4는 14%정도 낮은 임계전류를 가지고 있다. 이와 같이 초전도소자의 불균일함은 가장 일반적인 것이다.

Fig. 7은 4개의 한류소자를 병렬 연결하여 사고전류를 실험적으로 모의한 결과이다. 본 실험에서 분류전류의 측정은 로고스키코일의 출력을 다시 수치적으로 적분한 결과로써 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 정상상태에서 균일한 전류분배가 이뤄짐을 잘 알 수가 있다. 또한 사고시점에서 전류는 반드시 재분배되는 특성이 있어 상호 보완하는 특성을 가진다. 이것은 Fig. 2b)의 결과에서도 잘 알 수가 있었다.

Fig. 8은 Fig. 3에서 나타낸 개념으로 4개 병렬 연결된 모듈에 또 다른 4병렬 모듈을 직렬 연결하여 퀀치특성을 조사한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 직렬 연결된 모듈간 동시퀀치가 잘 되는 것을 알 수가 있다.

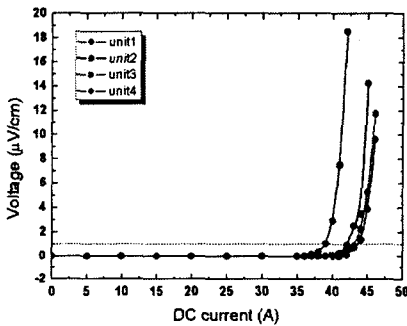


Fig. 6. Measurement of critical current of 4 component for parallel connection.

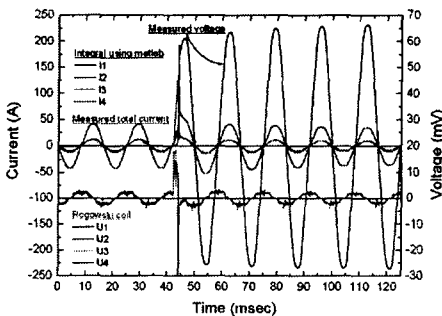


Fig. 7. Current distribution of 4 component connected in parallel.

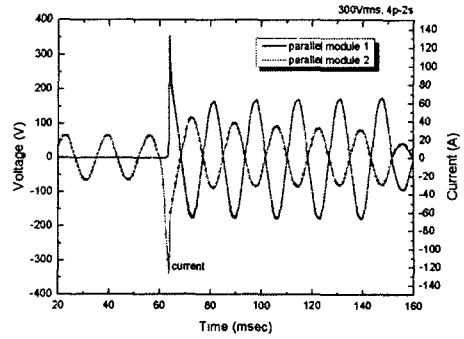


Fig. 8. Quench behaviors of 4 component connected in parallel and 2 parallel module connected in series.

#### 4. 결 론

본 연구는 초전도 저항형 한류소자의 기본 특성 중에 하나인 사고전류에 대한 내력에 대하여 조사하였으며, 한류기의 용량증대를 위한 방식중에서 병렬우선 직렬연결에 대한 연구를 하였다. 본 연구에 대한 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. Bi-spiral pattern된 4인치 YBCO 박막은 30kA까지의 사고전류에도 뛰어난 한류능력을 가지고 있음을 알 수 있었다. 이는 초전도 한류기로서 어떤 사고전류라도 제한할 수 있는 기기로서 차단기의 부담을 줄이는데 매우 효과적인 것으로 사료된다.
2. 병렬우선 직렬연결된 초전도 한류모듈은 자기장 발생장치나, 선트저항의 도움 없이도 동시퀀치 됨을 알 수가 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용 용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

[1] Mathias Noe, Klaus-Peter Juengst, Frank Wefel, Lisa Co wey, Andre Wolf and Steffen Elschner "Investigation of high-Tc bulk material for its use in resistive superconducting fault current limiters," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no. 1, March 2001.

[2] J.H. Kubota, Y. K. Arai, M. Yamazaki, and H. Yoshino, "A New Model of Fault Current Limiter using YBCO thin Film," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp.1365-1368, June 1999.

[3] J.S Kang et al, "Quench propagation characteristics in YBCO films for resistive superconducting fault current limiters", ISH2003 conference, August 2003.

[4] B.W. Lee et al., "Analytical and Experimental Investigations on the Current Paths on the YBCO Thin Film for Resistive Fault Current Limiters," ICEE 2002 conference, vol. 7, no. 2, pp.828-831, June 1997.

[5] B. Gromoll et al., "Resistive Current Limiters with YBCO films," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp.828-831, June 1997