

2차회로의 직·병렬연결에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 특성

조용선, 박형민, 남궁현, 이나영, 한태희, 최효상  
조선대

Characteristics of a Hybrid-type SFCL with Serial and Parallel Connection of Secondary Circuit

Yong-Sun Cho, Hyoung-Min Park, Goung-Hyun Nam, Na-Young Lee, Tae-Hee Han, Choi-Sang Choi  
Chosun University

**Abstract** - We investigated the operational characteristics of the hybrid-type superconducting fault current limiter (SFCL) according to the serial and parallel connections of secondary circuits. The hybrid-type SFCL consists of a transformer, which has a primary winding and several secondary windings with  $YBa_2Cu_3O_7$  films connected in series and parallel. In order to increase the capacity of the SFCL, the serial connection between each current limiting unit is necessary. The hybrid-type SFCL with the serial connection in secondary circuits could show superior characteristics than those of the parallel connections in the current limiting and quench time. The resistances generated in the superconducting units were also lowered at the parallel connections. We confirmed that the parallel connection reduced the power burden of each superconducting unit under the same conditions because of the simultaneous quenching between superconducting units.

1. 서 론

현재 전력 수요의 증가로 인해 계통의 사고시 사고전류의 크기는 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이로 인해 전력계통의 보호기기들은 큰 차단내력을 필요로 하게 되었다. 이에 대한 여러 대응 방안들이 모색되고 있으나 경제성, 신뢰성 등의 문제들이 뒤따르고 있다. 이러한 상황에서 초전도 한류기의 등장은 현재 전력계통의 사고전류 문제점을 해결할 수 있는 가장 최선의 해결방안으로 급부상하게 되었다. 사고전류를 빠르게 제한하는 초전도 한류기의 개발은 차단기의 용량증대 효과, 보호 기기들의 차단내력 향상 등의 효과를 가져 올 수 있다[1]-[3].

초전도 한류기에는 저항형, 자속구속형, 하이브리드형, 차폐유도형 등 여러 종류가 있으며, 현재 여러 나라에서 활발히 연구 중에 있다. 초전도 소자의 영저항 특성을 이용하는 저항형 한류기는 매우 간단한 구조를 가지고 있다. 그러나 초전도 소자의 동시퀀치 문제와 용량 증대 문제를 가지고 있다. 동시퀀치 문제는 초전도 소자의 미소한 임계전류밀도의 차이로 인해 발생한다. 이러한 차이는 초전도 소자의 제조 공정상 불가피한 문제이다. 용량 증대 문제는 이러한 초전도 소자의 직·병렬연결로 인한 동시퀀치 문제로 인해 발생한다[4]-[9].

본 논문에서 제시한 하이브리드형 SFCL은 1차권선과 초전도 소자를 갖는 2차권선으로 구성된 변압기를 이용하였다. 하이브리드형 SFCL은 사고시에 1·2차 권선의 인덕턴스 비로 인해 유도된 2차 전류에 의해 초전도 소자가 퀀치되어 사고 전류를 제한하게 된다.

본 논문에서는 하이브리드형 사고전류제한기의 2차권선을 직·병렬로 연결하고 초전도 소자 또한 병렬로 구성하여 사고 전류의 제한 등급과 초전도 소자의 전력 부

담에 대해 비교하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 하이브리드형 초전도 한류기의 원리

하이브리드형 SFCL은 1차권선과 초전도 소자가 직렬 또는 병렬로 연결된 2차 권선으로 이루어진 변압기의 형태이다. 사고전에는 2차측에 연결된 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에 선로 전류( $I_p$ )는  $I^2R$ 의 손실 없이 흘릴 수 있다. 사고후에는 2차권선의 인덕턴스 비에 의해 유도된 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ )로 인해 초전도 소자가 퀀치되어 사고전류를 제한하게 된다.

그림 1은 2개의 2차회로가 병렬로 연결된 하이브리드형 사고전류제한기의 등가회로도다 나타낸 것이다.

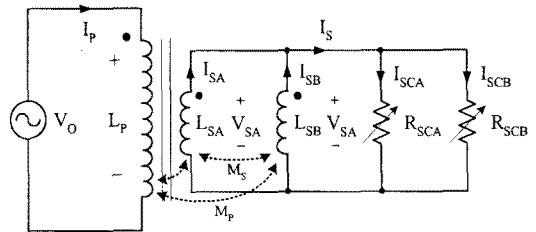


그림 1. 2개의 2차회로가 병렬로 연결된 하이브리드형 초전도 한류기의 등가회로도

$L_p$ 는 변압기 1차측 인덕턴스를 나타내며,  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ 는 2차측 회로의 인덕턴스를 각각 나타낸다.  $R_{SCA}$ ,  $R_{SCB}$ 는 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타내며,  $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ 는 2차측 회로의 인덕턴스에 흐르는 전류를 각각 나타낸다.  $I_{SCA}$ ,  $I_{SCB}$ 는 병렬로 연결된 초전도 소자에 흐르는 전류이고,  $I_s$ 는 2차측 회로에 흐르는 전류를 나타낸다.  $M_p$ 는 1차권선과 2차권선 사이의 상호 인덕턴스를 나타내며,  $M_s$ 는 2차권선간의 상호 인덕턴스를 각각 나타낸다.

변압기의 1차측과 2차측이 서로 자기누설자속이 없고 상호자속만 존재하며, 결합계수(k)가 1이고 2차측 회로의 인덕턴스( $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ )와 초전도 소자의 저항( $R_{SCA}$ ,  $R_{SCB}$ )이 각각  $L_S$ 와  $R_{SC}$ 로 동일하다고 가정하였을 때, 다음 식 (1), (2)와 같이 병렬로 연결된 2차측 회로에 의해 제한되는 사고전류의 크기( $I_s$ )와 초기에 제한되는 전체 임피던스( $Z_{lim}$ )를 나타낼 수 있다.

$$I_s = I_{SA} + I_{SB} = I_{SCA} + I_{SCB} = \frac{-2M_p}{L_S + M_S + Z_{SC}} \cdot I_p \quad (1)$$

$$Z_{lim} = \frac{j\omega L_P L_S + M_S + Z_{SC} - 2j\omega M_P^2}{L_S + M_S + Z_{SC}} \quad (2)$$

$$I_{mi} = \frac{L_S + M_S}{-M_P} \cdot I_C \quad (3)$$

여기서, 2차측 회로의 임피던스 합( $Z_{SC}$ )은  $(L_S \cdot R_{SC}) / (R_{SC} + 2j\omega L_S)$ 이다. 직렬연결 회로에서 2차측 회로의 임피던스가  $R_{SC}$ 인 것과 비교하면 훨씬 작은 값이라는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌 [11]의 초전도 소자 2개의 직렬연결을 통한 회로와 비교하면 병렬연결 회로에서 2차측 회로에 흐르는 전류( $I_{SCA}$ ,  $I_{SCB}$ )들의 합이 직렬연결 회로의 2차측에 흐르는 전류와 비교하여 거의 2배 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 초기에 제한되는 전체 임피던스( $Z_{lim}$ ) 또한 직렬연결 회로와 비교하여 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 병렬연결 회로의 전체 임피던스가 사고 발생시 직렬연결의 경우보다 더 작기 때문에 사고전류의 제한 효과는 더 작다는 것을 예상할 수 있다.

2차 권선의 증가에 따른 하이브리드형 SFCL에서 사고 발생 후 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ )가 임계전류( $I_c$ )에 도달하였을 때의 초기 제한전류를  $I_{mi}$ 라고 정의하였을 때, 식 (1)에  $R_{sc}=0$ ,  $I_s/2=I_c$ ,  $I_p=I_{mi}$ 를 대입하면 다음 식 (3)과 같이 유도할 수 있다. 이 식을 통해서 2차권선의 인덕턴스( $L_s$ )와 2차측 권선들 간의 상호 쇄교자속의 크기( $M_p$ )에 따라 초기 제한되는 사고전류의 크기를 조절할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

## 2.2 실험 방법

그림 2는 2차측 회로의 증가에 따른 실험회로도들 나 타낸 것이다.

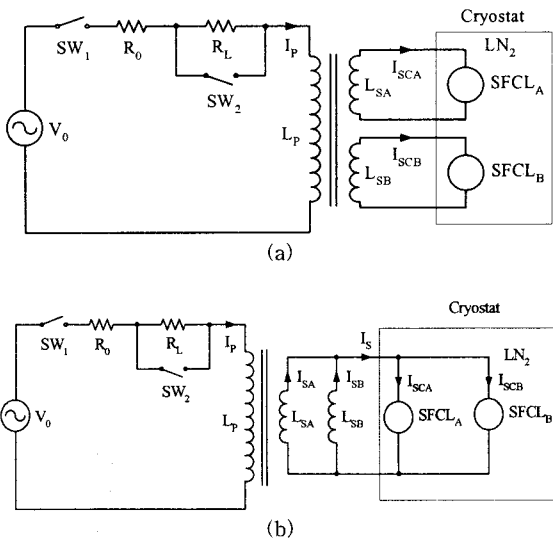


그림 2. 하이브리드형 초전도 한류기의 실험 회로도  
(a) 직렬연결회로 (b) 병렬연결회로

여기서 인가전압  $V_0$ 는  $200/\sqrt{3}V_{rms}$ 로 고정시켰으며,  $I_p$ ,  $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ 는 1차권선과 초전도 소자를 갖는 2차 권선에 흐르는 전류이다.  $SW_1$ 을 통해 선로에 전압을 인가하고  $SW_2$ 로 5주기 동안 0도 사고를 모의하였다.  $R_0$ 와  $R_L$ 는 각각 선로전류를 측정하기 위한 1 $\Omega$ 저항과 부저항 50 $\Omega$ 을 나타낸다. 1·2차측 회로의 인덕턴스( $L_P$ ,  $L_S$ )는 각각 23.6, 3.5mH이다. 실험에 사용한 초전도 소자는 직경 2inch의 YBCO박막을 사용하였으며 상세한 제원은 참고

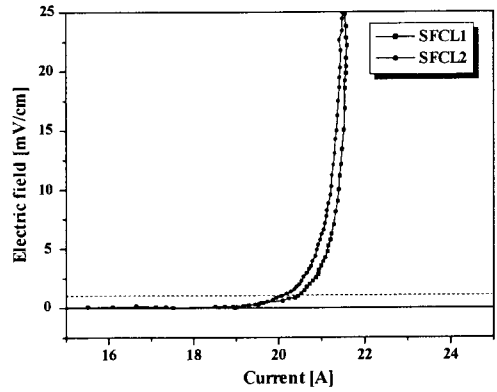


그림 3. 초전도 소자의 임계전류밀도

문헌 [10]에 나타내었으며, 이들의 임계전류 값은 다음 그림 3과 같다.

## 2.3 실험 결과 및 고찰

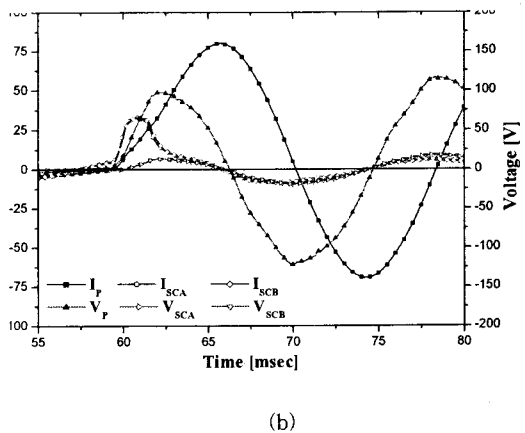
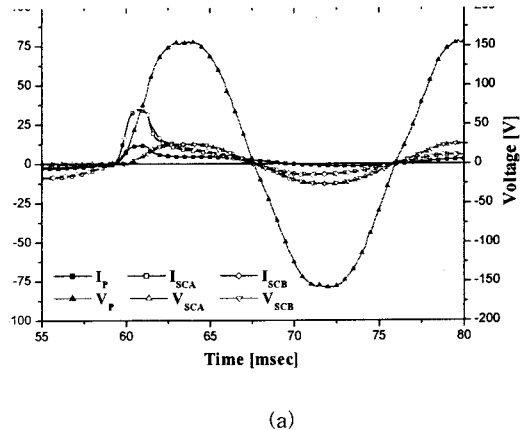


그림 4. 직·병렬 연결된 하이브리드형 SFCL의 전압·전류 파형

(a) 직렬연결의 경우 (b) 병렬연결의 경우

그림 4는 2개의 초전도 소자를 직·병렬 연결하였을 시 하이브리드형 SFCL의 전압·전류 파형을 나타낸 것이다. 병렬연결시 제한되는 사고전류( $I_p$ )의 피크값은

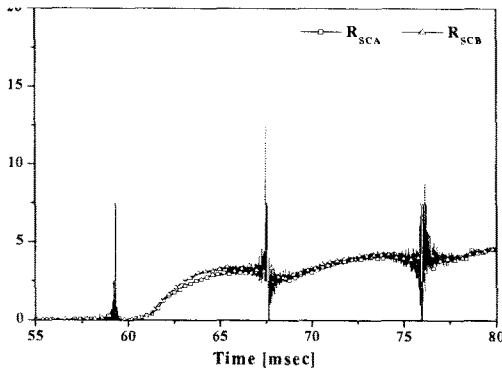
160A로서 직렬연결시 제한되는 11.6A보다 제한율이 떨어진다. 이것을 확인할 수 있다. 이것은 2차측에서 발생하는 전체 임피던스가 직렬연결 회로에서 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있다.

초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SCA}$ ,  $I_{SCB}$ )는 직렬연결의 경우 34.8A이고, 병렬연결의 경우 32.8A이었다. 병렬연결의 경우 2차측 리액터와 초전도 소자가 서로 병렬연결되어 있기 때문에 특성상 초전도 소자에 흐르는 전류는 리액터와 초전도 소자가 직렬연결되어 있는 것보다 더 작게 흐르게 된다.

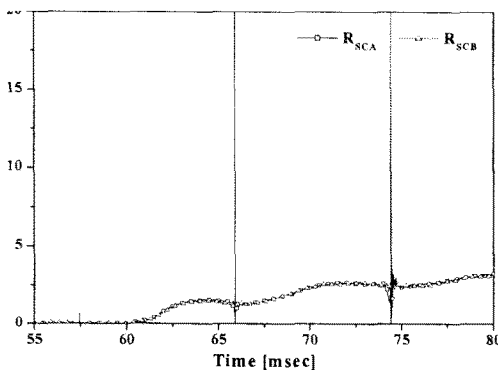
계통에 사고가 발생하여 초전도 소자에서 전압이 발생하는 시간인 켄치시간은 직렬연결 회로의 경우 0.73msec, 병렬연결 회로의 경우 0.75msec로 거의 동일한 특성을 보였다. 이것은 초전도 한류기가 사고이후 반주기 이내에 동작하여 사고전류를 제한하는 특성으로 짧은 시간에 제한한다는 것을 보여준다.

직·병렬로 연결된 회로의 초전도 소자에 흐르는 전압을 비교해 보면 직렬연결 회로에서는 6.8V, 병렬연결 회로에서는 12.5V이었다. 직렬연결의 경우 초전도 소자에서 발생하는 전압이 더 크기 때문에 발생하는 저항 또한 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 직·병렬로 연결된 초전도 소자에서 발생하는 저항의 파형을 나타낸 것이다.



(a)



(b)

그림 5. 직·병렬로 연결된 초전도 소자의 저항파형

그림 5에서 알 수 있는 것과 같이 직·병렬로 연결된 초전도 소자가 동시에 켄치가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 직렬연결의 경우 약간의 켄치 불균일이 발생하는데, 이것은 1·2차측 쇄교자속을 완전히 같게 하기가 힘들기 때문이다. 그러나 병렬연결의 경우 그림 3과

같이 초전도 소자의 임계전류밀도에 차이가 있음에도 불구하고 회로적인 특성으로 완벽한 동시켄치가 구현된다는 것을 확인할 수가 있다.

### 3. 결 론

본 연구를 통해서 초전도 소자의 직·병렬연결을 통한 하이브리드형 SFCL의 동작특성을 비교·분석하였다. 초전도 소자의 직·병렬연결시 발생하는 불규칙 켄치가 하이브리드형 SFCL의 경우 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 병렬연결의 경우 초전도 소자에서 발생하는 전압 및 전류, 저항이 작아 소자의 부담이 감소한다는 것을 확인하였다. 그러나 사고시 2차측 회로에서 발생하는 전체 임피던스가 직렬연결의 경우보다 더 작아 사고전류의 제한효과가 크게 떨어진다는 것을 확인하였다. 이것으로 병렬연결을 통해서 초전도 소자의 부담이 감소로 하고, 직렬연결을 함으로서 사고전류의 제한효과가 증대된다는 것을 확인할 수 있었다. 하이브리드형 SFCL 용량증대를 위한 초전도 소자의 직·병렬연결 설계시 이점을 고려하여 설계를 해야 할 것이다.

### [참고 문헌]

- [1] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, applications", *Physica C*, Vol. 354, p. 27-33, 2001
- [2] V. Meerovich, V. Sokolovsky, J. Bock, S. Gauss, S. Goren and G. Jung, "Performance of an inductive fault current limiter employing BSCCO superconducting cylinders," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 9, p. 4666-4676, 1999
- [3] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, and S.-J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after over powering quenches," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 2418-2421, 2001
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Krämer, P. Kummeth, H. W. Neu müller and S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 7, pp. 828-831, 1997
- [5] H.-S. Choi, O.-B. Hyun, H.-R. Kim, and K.-B. Park, "Switching properties of hybrid type superconducting fault current limiter using YBCO stripes," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 12, p. 1833-1838, 2002
- [6] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL," *Physica C*, Vol. 416, p. 34-42, 2004
- [7] 최효상, 현옥배, 김해림, 황시돌, "15kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성," *전기전자재료학회 논문지*, 13권, 12호, p. 1058, 2000
- [8] 김해림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 전류제한기 한류특성," *전기전자재료학회 논문지*, 13권, 4호, p. 1058-1062, 2000
- [9] 김태중, 강형구, 고태국, "유도형 고온초전도 한류기 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작," *전기전자재료학회 논문지*, 16권, 12호, p. 1292, 2003
- [10] 조용선, 최효상, 박형민, "2차회로의 수에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 동작 특성," *대한전기학회 논문지*, Vol. 55A, No. 2, p. 62, 2005
- [11] 최효상, 조용선, "YBa2Cu3O7 박막을 이용한 하이브리드형 초전도 사고전류제한기의 특성," *전기전자재료학회 논문지*, 19권, 4호, p. 391, 2006