

## 사고전류 제한형 고온 초전도케이블의 한류부 특성평가

김태민<sup>1</sup>, 홍공현<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>, 두호익<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 전북대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 전북대학교 HOPE IT 인력양성사업단

### Evaluation on the Properties of the Current Limiting Part for Fault-Current-Limiting Type HTS Cables

Tae-min Kim<sup>1</sup>, Gong-hyun Hong<sup>1</sup>, Byung-sung Han<sup>1</sup>, and Ho-ik Du<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electricity Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756 Korea

<sup>2</sup> Hope IT Human Resource Development Center, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756 Korea

(Received January 12, 2015; Revised January 28, 2015; Accepted February 13, 2015)

**Abstract:** Inside the existing superconducting cables, the superconducting wire carries a loss-free current, and the cable former (the stranded copper wire) bypasses the fault current to prevent damage and loss of the superconducting cable when the fault current is applied. The fault-current-limiting-type superconducting cable proposed in this paper usually carries a steady current; but in a fault state, the cable generates self-resistance that makes the fault current lower than a certain width. That is, the superconducting cable that transmitted only a low voltage and a large capacity power repetitively limits the fault current, as does a superconducting current limiter. To complete this structure, it is essential to investigate the mutual resistance relationship between the superconducting wires after applying a fault current. Therefore, in this paper, one kinds of superconducting wires (a wire without a stabilization layer) were connected parallel 4 tapes, respectively; and after applying a fault current, the current, voltage, resistance and thermal stability of the HTS thin-film wires were examined.

**Keywords:** REBCO coated conductor, Fault-current limiting HTS cable, Current limit, Limiting part

### 1. 서 론

고온 초전도 케이블은 저전압·대용량으로 운전하는 친환경 전력기기로 전력전송 면에서 이상적인 기기이다. 만약 이 고온 초전도 케이블이 사고전류를 제한하는 한류능력을 보유한다면 전력선로에서 필연적으로 생기는 사고전류 문제도 해결가능하다[1].

a. Corresponding author; dudoc@jbnu.ac.kr

기존의 고온 초전도 케이블은 사고전류 발생시 구리도체로 이루어진 부분에 사고전류를 바이패스함으로써 초전도체를 보호해 왔다. 그러나 본 논문에서 제안하는 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블은 기존 고온 초전도 케이블에 초전도 전류제한기의 기능을 추가한 신개념 전력기기로 자체적으로 초전도체를 보호한다. 이 사고전류 제한형 초전도 케이블의 구조는 통전부와 한류부로 구성된다. 자세히 설명하면 통전 파트의 초전도 선재와 한류 파트의 초전도선재의 안정화층을 다르게 구성하였다. 기본적으로 초전도 전력기기는 초전도체의 고유 성질인, 일정온도(임계온도  $T_c$ ) 및 전류(임계전류  $I_c$ ) 이하에서 저항 제로 특성을 사용한다. 특정한 상황

에서 통전 전류가 임계전류를 초과하면 초전도성을 잃고 저항체로 변한다. 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블은 통전 파트와 한류파트의 비저항 차이를 이용하여 서로 상호작용하는 저항체로 동작하게 함으로써 사고전류를 제한하는 특성을 가지게 한다.

동작원리는 비저항이 다른 초전도 선재를 병렬로 연결했을 때 비저항이 큰 선재에서 대부분의 사고전류를 제한하는 메커니즘이다. 정상상태 시에는 통전부와 한류부 모두 무손실로 전류를 통전하고, 사고 시에는 초전도 선재의 퀀치 특성을 이용하여 한류부에서 대부분의 사고전류를 제한한다.

사고전류 제한형 초전도 케이블에서 한류부의 특성은 다음과 같다. 첫 번째는 사고가 발생했을 때, 한류부는 사고전류를 제한한다. 통상적으로 초전도 한류기에서 요구하는 기준인 첫 주기 사고전류 20%, 5주기 40% 이상의 사고전류를 제한해야한다. 두 번째는 이러한 사고전류 제한 작용 시에도, 한류부가 열적으로 안정해야한다. 이를 위해 한류 특성이 뛰어난 안정화층이 없는 2세대 초전도 선재인 REBCO coated conductor를 이용하여 한류부 실험용 샘플을 제작하였다 [2]. 제작된 샘플을 바탕으로 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블의 한류부 특성평가를 진행하였다. 특성평가 항목은 사고전류 제한능력과 저항대비 열적 안정도 두 부분으로 나누어 진행하였다.

## 2. 실험 방법

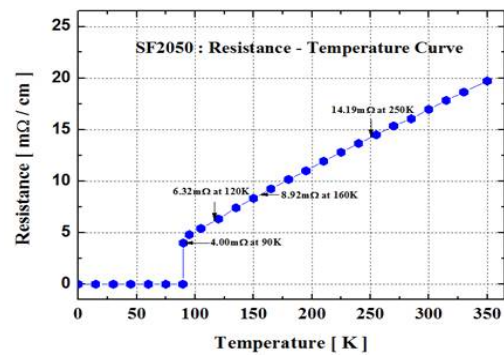
### 2.1 실험 샘플 구성

표 1은 실험에서 사용된 초전도 선재의 재원이다. 사고전류 제한형 고온 초전도체의 한류부를 구성하기 위해 안정화층이 없는 초전도 선재 (이하 REBCO@Free CC)를 4가닥 병렬연결하였다. REBCO@Free CC의 임계온도는 90 K로 52 A<sub>rms</sub>의 임계전류를 갖는다. 따라서 통전부의 정격전류는 임계온도 90 K에서 208 A<sub>rms</sub>이다.

그림 1은 초전도 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 나타낸 그래프이다. REBCO@Free CC의 임계온도 90 K에서의 저항은 4.00 mΩ/cm으로 상승한다. 그 이유는 초전도 선재가 일정 온도(이하 임계온도) 이상이 되면 초전도성을 잃고 부도체의 성질을 갖게 되어 저항이 발생하기 때문이다[3]. 이에 따라 180 K에서의 저항은 10.04 mΩ/cm, 250 K에서의 저항은 14.19 mΩ/cm이다. 이들 자료를 기초로 해서 사고 시

**Table 1.** Properties of REBCO coated conductor SF2050.

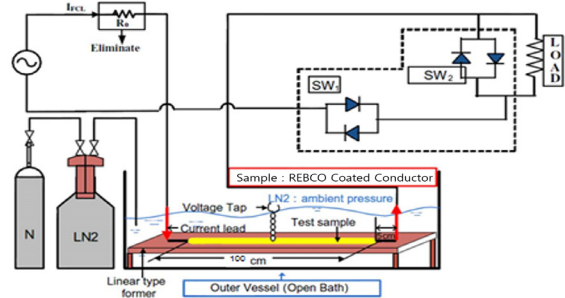
Type	REBCO coated conductor SF2050 (2 mm in width)
Stabilization layer	Free
Length of Sample	100 cm
Rated voltage	0.6 V <sub>rms</sub> /cm(@300 K)
Resistance (Ω)	20 mΩ/cm(@300 K)
Critical current	52 A <sub>rms</sub> (1 μV/cm, @77 K)
Critical temperature	90 K



**Fig. 1.** Resistance characteristic curve by temperature of REBCO@Free CC(SF 2050).

발생 저항을 산출하여 초전도 선재의 온도 변화를 추정함으로써 안정성을 판단하였다.

### 2.2 실험 장치 구성



**Fig. 2.** Schematic diagram of the experimental circuit.

그림 2는 실험장치의 구성도이다. 사고 상황을 발생시키기 위해 SW<sub>1</sub>과 SW<sub>2</sub>를 순차적으로 동작시켰으며,

기준 저항( $R_0$ )을 제거한 상태에서 사고 상황을 발생시켰다. 30 V<sub>rms</sub>의 전압을 인가하여 1120.54 A<sub>peak</sub>의 사고전류를 통전시켰다. 전압·전류의 측정은 4단자법을 이용하였다. 측정된 전압·전류를 바탕으로 산출된 저항값은 안정성 평가를 위해 사용되었다. 사고주기는 차단기 동작시점을 고려하여 5.5주기까지 인가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 사고전류 제한능력

일반적으로 초전도한류기의 전류제한 동작은 첫 주기에서부터 사고전류의 크기를 1/3 이내로 축소하는 것이다. 이것은 초전도체의 물리적 특성을 이용하여 나타나는 결과이므로 구리 포머와 조합된 기존 고온 초전도케이블 구조에서는 이와 같은 전류제한 성능이 발현되기 어려운 상황이다. 따라서 본 논문에서 제안된 사고전류 제한형 고온 초전도케이블의 전류제한은 실제계에 적용 시 차단기와 연계 및 고장전류유형 파악 등을 고려하면 사고전류 인입시점에서부터 5주기 동안 사고전류의 크기를 40% 이내로 축소시키는 것이 주목적이다.

사고전류를 제한하는 특성은 사고전류 제한형 고온 초전도케이블의 핵심적인 요소이다. 이를 평가하기 위해서는 다음을 고려해야한다. 첫 번째로 첫 1/2주기는 가장 큰 크기의 사고전류가 유입되는 시점이므로 제한된 사고전류의 크기를 분석하는 것이 매우 중요하다. 두 번째로 3주기는 사고전류의 유형 파악 및 차단기 동작 직전 제한 값으로써, 계통 연계 시 중요한 시점이다. 끝으로 5주기는 제한된 사고전류가 차단기로 인입되는 시점으로써 최종적으로 제한된 사고전류의 크기를 가늠할 수 있는 부분이다. 따라서 본 논문의 사고전류 제한능력 검증은 1/2주기, 3주기, 5주기에서 진행하였다. 사고전류 제한형 고온 초전도케이블에서 한류부는 사고 시에도 대부분의 사고전류를 제한하는 역할을 하게 된다. 그림 3(a)는 안정화 층이 없는 초전도 선재로 이루어진 한류부 전압-전류의 변화를 나타낸 그래프이다. 전류 분포는 각각 403.05 A<sub>peak</sub>, 98.91 A<sub>peak</sub>, 81.01 A<sub>peak</sub>로 첫 주기에서 64.03%의 전류제한율을 보인다. 3주기에서 91.17%의 전류제한율을 가지고, 5주기까지의 총 한류부의 전류제한율은 92.77%로 매우 우수한 전류 제한율을 보인다. 전압의 경우 49.04 V<sub>peak</sub>, 33.27 V<sub>peak</sub>, 35.22 V<sub>peak</sub>으로 첫 주기에서

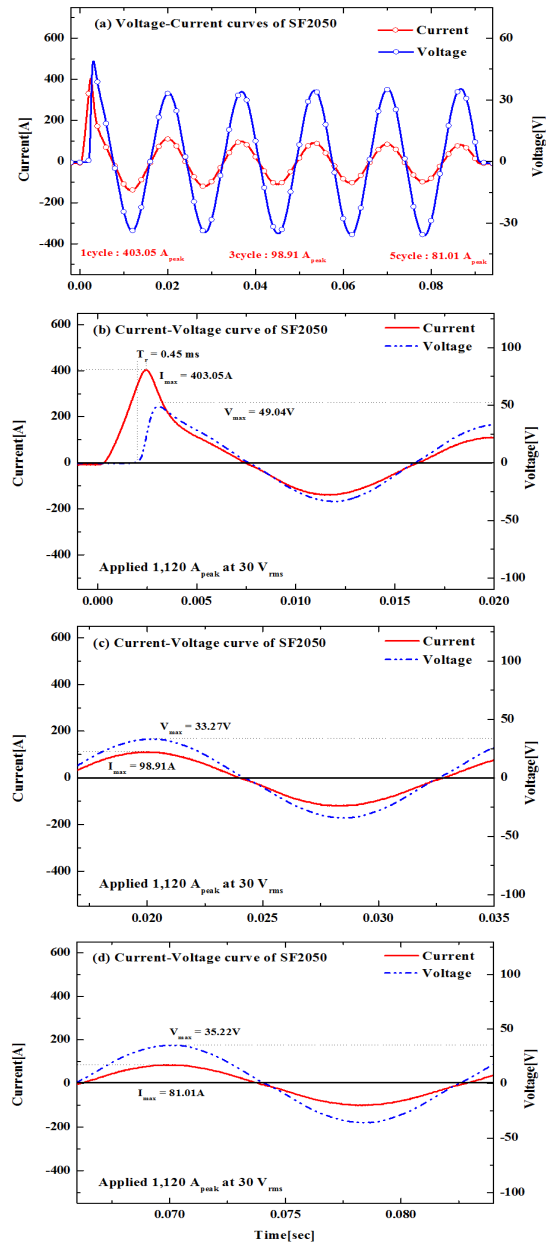


Fig. 3. Voltage-current characteristics of limiting part when 1,120 A<sub>peak</sub> was applied (a) total current, (b) 1/2 cycle, (c) 3 cycle, and (d) 5 cycle.

전류제한을 한 후 급격히 감소했다가 지속적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

이는 비저항이 높은 초전도 선재의 경우 줄열의 축적이 커지게 되어 선재 저항이 급격히 증가함을 의미한다. 따라서 안정화층이 없는 REBCO 박막형 선재의

경우 비저항이 높기 때문에 전류제한용으로 적합하며 상전이 속도가 매우 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이를 고려하여 사고전류 초기에 높은 비저항을 이용하여 사고전류를 제한하는데 적합할 것으로 사료된다. 빠른 시간에 사고전류를 제한하고 있기 때문에 첫 주기 사고전류 제한경향을 살펴보면 초전도 한류기와 유사한 경향을 확인할 수 있었다 [4].

### 3.2 안정성

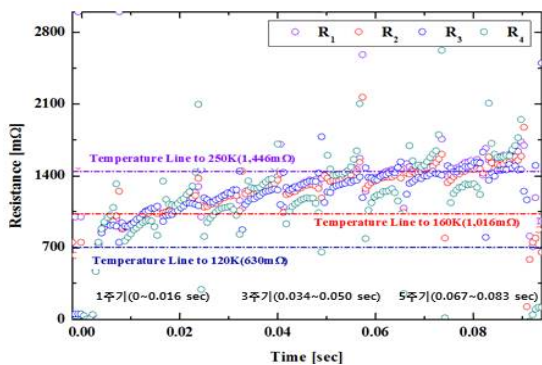


Fig. 4. Resistance curve of experimental sample limit part.

기존의 고온 초전도 케이블은 무손실 전력전송이 주목적이며, 사고전류를 제한하는 기능이 없다. 하지만 본 논문에서 제안하는 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블은 자체적으로 사고전류를 제한하는 특성을 갖추고자 한다. 이를 위해서는 전체 고온 초전도 케이블에 일정량의 사고전류가 통전될 때 안정적으로 운전을 해야 한다. 따라서 사고전류 제한형 고온 초전도케이블은 사고전류를 제한하는 기능을 가지면서도 열적으로 안정한 온도에서 동작해야한다. 초전도 전력기기는 초전도 선재의 각 저항 상승에 따라 안전영역(90 K), 준안정영역(180 K), 위험영역(250 K)으로 온도영역을 구분하여 평가하기 때문에 같은 기준으로 통전부의 안정성을 평가하였다 [5].

그림 4는 사고전류 인가 시 사고전류 제한형 고온 초전도케이블 한류부에 사용된 선재의 시간에 따른 저항 발생 그래프이다. 사고전류를 제한함에 따라 1주기에서 1,048.50 mΩ, 3주기에서 1,343.95 mΩ, 5주기에서는 1,471.94 mΩ 으로 저항이 증가한다. 지속적으로 저항이 증가하고 있는 경향을 확인할 수 있다. 더불어 저항 증가 경향이 전체적으로 일치하지 않고 불안정한

모습을 확인 가능하다. 한류부의 초전도 선재 저항이 급격하게 증가하여 열적 안정도가 위험영역에 도달하는 경향을 보인다. 첫 주기에서는 대부분의 사고전류를 제한하며, 이때 저항이 준안정영역인 180 K로 도달하는 경향을 확인하였다. 4주기 이후에는 250 K로 위험영역에 도달한다. 5.5주기까지 한류부는 270 K까지 온도가 상승하였다. 이는 열적으로 매우 불안정한 상태로 초전도선재를 보호하기 위한 대책마련이 필요하다.

결론적으로 한류부만 가지고는 사고전류 제한형 고온 초전도케이블이 구성되기 어렵다. 때문에 한류부를 열적 안정하게 하기 위해서는 바이패스 역할을 하는 통전부가 필요하다 [6].

### 4. 결론

기존 고온 초전도 케이블의 경우 구리 도체를 사용해 사고전류를 바이패스하여 고온 초전도 케이블을 보호하였으나, 본 논문에서는 자체적으로 사고전류를 제한할 수 있는 능력을 갖는 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블을 제안하였다. 그리고 이 고온 초전도 케이블의 핵심요소인 한류부를 제작하여 사고전류 제한능력 및 저항대비 열적 안정성을 비교 고찰하였다. 한류부는 사고 시 각 초전도 선재에 첫 주기 64%, 5주기 92%의 사고전류를 제한하는 능력을 확인하였다. 또한 예상한 바와 같이 사고전류를 제한하는 경향이 초전도 한류기와 유사했다. 하지만 열적 안정도 측면에서는 270 K까지 온도가 상승하기 때문에 이에 대한 보완이 필요하다.

본 논문의 결과는 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블의 특성평가 항목을 설정하는 중요 자료로 활용될 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2006825).

### REFERENCES

- [1] O. B. Hyun, *World of Electricity Journal*, **59**, 10 (2010).

- [2] D. Hazelton, Y. Xie, V. Selvamanickam, R. Anthony, J. C. Llambes, and T. Lehner, *IEEE CITRES*, **10**, 42 (2010).
- [3] H. S. Sin, *Chemical Industry and Technology*, **10**, 3 (1992).
- [4] H. I. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, and B. S. Han, *IEEE Transactions on*, **20**, 3 (2010).
- [5] S. O. Heo, T. M. Kim, B. S. Han, and H. I. Du, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 904 (2013).
- [6] T. M. Kim, G. H. Hong, B. S. Han, and H. I. Du *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 10 (2014).