

## 사고전류 제한형 고온 초전도케이블의 통전부 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 Transporting 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 September 18, 2014; Accepted September 24, 2014)

**Abstract:** When an abnormal condition occurs due to a fault current at a consumer location where electricity is supplied through high- $T_c$  superconducting(HTS) cable, the HTS cable would be damaged if there is no appropriate method to protect it. The fault-current-limiting type HTS cable that is suggested in this study has a structure of transport part and limit part. It conduct a zero impedance transport current at ordinary operations and carry out a fault current limiting at extraordinary operations. To make a perfect this structure, it is essential to investigate electrical properties of transport part that comprise the fault-current-limiting type HTS cable. In this paper, transport part that comprise HTS wire with copper stabilization layer is examined the current transport properties and the stability evaluation.

**Keywords:** REBCO coated conductor, Fault-current limiting HTS cable, Thermal stability

#### 1. 서론

신재생에너지 기술의 개발 및 보급에 따라 분산전원 (distributed generation, DG)은 전력계통에서 사용빈도가 급격히 증가하고 있다 [1]. 이에 따라 국내 전력계통 운영정책은 전력기기의 소형화에 중점을 두고 있다. 이러한 요구에 부합하는 고온 초전도 케이블은 저전압·대용량으로 운전하는 친환경 전력기기이다. 만약 이 고온 초전도 케이블이 사고전류를 제한하는

기능을 보유한다면 운영정책에 부합하면서 필연적으로 생길 수 있는 사고전류 문제까지도 해결이 가능할 수 있다 [2,3].

기존의 고온 초전도 케이블은 사고전류 발생 시 구리 도체로 이루어진 부분에 사고전류를 바이패스함으로써 초전도체를 보호해 왔다. 그러나 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블은 기존 고온 초전도 케이블에 초전도 전류제한기의 기능을 추가한 신개념 전력기기이다. 본 논문에서 제안하는 사고전류 제한형 초전도 케이블의 구조는 통전부와 한류부로 구성된다. 자세히 설명하면 통전 파트의 초전도선재와 한류 파트의 초전도선재의 안정화층을 다르게 하고, 이에 따른 각 파트의 비저항 차이를 이용하여 상호 보완하도록 구성하였다.

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

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

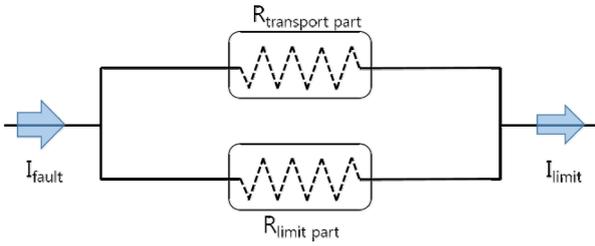


Fig. 1. FCL HTS cable mechanism of fault current.

동작원리는 그림 1과 같이, 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 켄치 특성을 이용하여 한류부에서 대부분의 사고전류를 제한한다.

위의 메커니즘에 따라 사고전류 제한형 초전도 케이블에서 통전부의 특성은 다음과 같다. 첫 번째는 사고가 발생했을 때, 통전부는 사고전류를 정상 통전한다. 두 번째는 이러한 과전류 통전 시에도, 통전부가 열적으로 안정해야한다. 이를 위해 통전 특성이 뛰어난 구리를 안정화층으로 갖는 2세대 초전도 선재인 REBCO coated conductor를 이용하여 통전부 실험용 샘플을 제작하였다 [4]. 제작된 샘플을 바탕으로 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블의 통전부 특성평가를 진행하였다. 특성평가 항목은 사고 시 전류통전 능력과 저항대비 열적 안정도 두 부분으로 나누어 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 샘플 구성

Table 1. Properties of REBCO coated conductor SCS2050.

Type	REBCO coated conductor SCS2050 (2 mm in width)
Stabilization layer	Copper
Length of Sample	100 cm
Rated voltage	1.2 V <sub>rms</sub> /cm(@300 K)
Resistance (Ω)	1.86 mΩ/cm(@300 K)
Critical current	49 A <sub>rms</sub> (1 μV/cm, @77 K)
Critical temperature	90 K

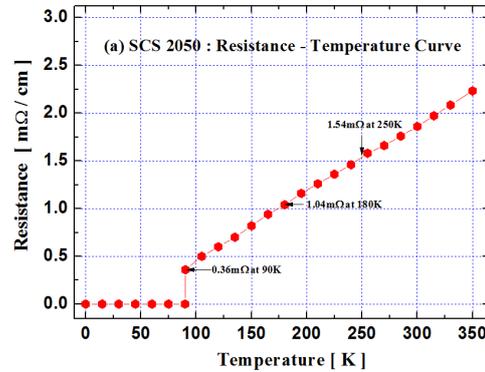


Fig. 2. Resistance characteristic curve by temperature of REBCO@Cu CC(SCS 2050).

표 1은 실험에서 사용된 초전도 선재의 재원이다. 사고전류 제한형 고온 초전도체의 통전부를 구성하기 위해 구리를 안정화층으로 갖는 초전도 선재 (이하 REBCO@Cu CC)를 4가닥 병렬 연결하였다. REBCO@Cu CC의 임계온도는 90 K로 49 A<sub>rms</sub>의 임계전류를 갖는다. 따라서 통전부의 정격전류는 임계온도 90 K에서 196 A<sub>rms</sub>이다.

그림 2는 초전도 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 나타낸 그래프이다. REBCO@Cu CC의 임계온도 90 K에서의 저항은 0.36 mΩ/cm, 180 K에서의 저항은 1.04 mΩ/cm, 250 K에서의 저항은 1.54 mΩ/cm이다. 이들 자료를 기초로 해서 사고 시 발생 저항을 산출하여 초전도 선재의 온도 변화를 추정함으로써 안정성을 판단하였다.

2.2 실험 장치 구성

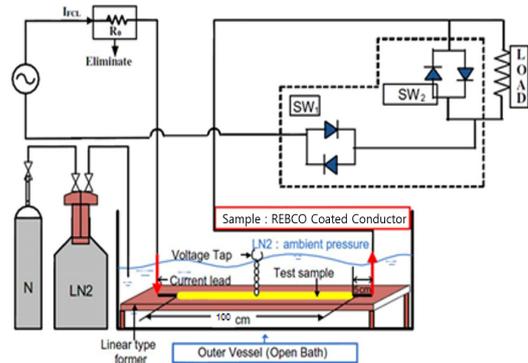


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental circuit.

그림 3은 실험장치의 구성도이다. 사고 상황을 모의하기 위해 SW<sub>1</sub>과 SW<sub>2</sub>를 순차적으로 동작시켰으며, 기준 저항 (R<sub>0</sub>)을 제거한 상태에서 사고 상황을 모의하였다. 20 V<sub>rms</sub>, 25 V<sub>rms</sub>, 30 V<sub>rms</sub>의 전압을 인가하여 각각 578.84 A<sub>peak</sub>, 740.93 A<sub>peak</sub>, 924.59 A<sub>peak</sub>의 사고전류를 통전시켰다. 전압·전류의 측정은 4단자법을 이용하였다. 측정된 전압·전류를 바탕으로 산출된 저항값은 안정성 평가를 위해 사용되었다. 사고 주기는 차단기 동작시점을 고려하여 5.5주기까지 인가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 사고 시 통전능력

사고 시 통전능력은 통전부에 사고전류 인가 후 각 선재에 전류분배가 균일하게 이뤄졌는지 여부를 기준으로 평가하였다. 또한, 차단기 동작시점 이내인 5.5주기 내에 정격전류인 196 A<sub>peak</sub>의 약 3배, 4배, 5배에 근사하는 사고전류를 인가하여 통전능력을 분석하였다.

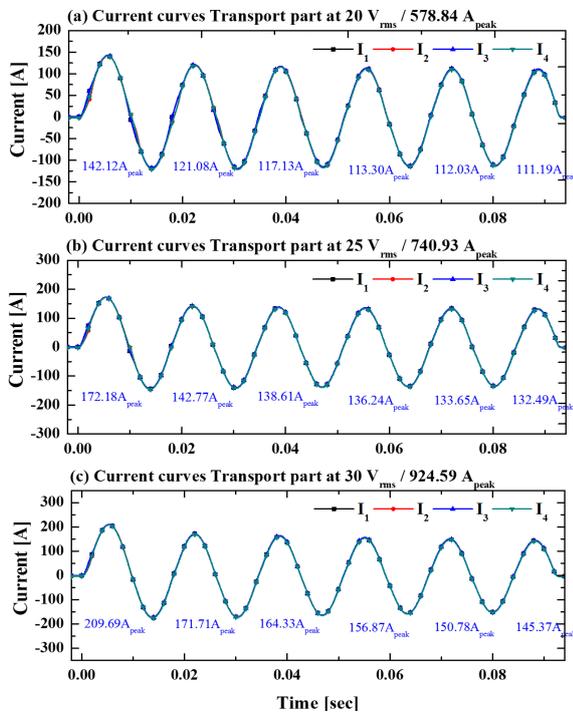


Fig. 4. Current transport property curves of transport part (a) 20 V<sub>rms</sub>/578.84 A<sub>peak</sub>, (b) 25 V<sub>rms</sub>/740.93 A<sub>peak</sub>, and (c) 30 V<sub>rms</sub>/924.59 A<sub>peak</sub>.

그림 4는 인가전압에 따라 발생된 사고전류 인가 시 전류분배를 측정된 순시전류 그래프이다. (a), (b), (c)에서 각 초전도선재에 분배된 전류가 모두 일치하기 때문에 정상적으로 전류가 통전되는 것을 확인할 수 있다. (a)에서 사고전류 578.84 A<sub>peak</sub>인가 시 전류 경향을 살펴보면 첫 주기 142.12 A<sub>peak</sub>에서 5주기 111.19 A<sub>peak</sub>로 전류가 30.93 A<sub>peak</sub>만큼 감소했다. 이와 유사하게 (b)에서도 사고전류 740.93 A<sub>peak</sub>인가 시에는 첫 주기 172.18 A<sub>peak</sub>에서 5주기 132.49 A<sub>peak</sub>로 전류가 39.69 A<sub>peak</sub>만큼 감소했다. 한편 (c)에서는 사고전류 924.59 A<sub>peak</sub>인가 시 첫 주기 209.69 A<sub>peak</sub>에서 5주기 145.37 A<sub>peak</sub>로 전류가 64.32 A<sub>peak</sub>만큼 감소했다. 전류 제한율을 분석하기 위해 5.5주기에서 통류부의 전체전류를 산출하면 각각 444.76 A<sub>peak</sub>, 529.96 A<sub>peak</sub>, 581.48 A<sub>peak</sub>이다. 이를 전류 제한율로 계산하면 각각 23%, 28%, 37%이다. 이 결과로부터 전체 전류분류가 정확히 일치하고 있기 때문에 과전류 통전 시에도 통전부가 무리 없이 동작하고 있음을 확인하였다. 또한 사고전류가 증가함에 따라 통전부 내에서도 전류를 제한하는 양이 점차적으로 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 사고전류 제한형 초전도 케이블의 통전부에 사고 시 통전능력이 정상적으로 이루어졌고, 사고전류를 제한하는 것도 확인하였다.

#### 3.2 안정성

기존의 고온 초전도 케이블은 무손실 전력전송이 주 목적이며, 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 통전되도록 해야 한다. 따라서 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블이 안정적으로 동작하기 위한 초전도 선재의 열적 안정도를 고려해야 한다.

본 논문에서 사용한 박막형 초전도 선재의 경우 250 K 이상의 온도에서 초전도 선재의 소손이 시작된다 [5,6]. 이를 고려하면 각 초전도 선재는 250 K 이하에서 동작해야 한다. 그러나 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블의 통전부는 사고 시 한류부에서 바이패스되는 과전류를 통전해야 한다. 그렇기 때문에 고온 초전도 케이블의 사고전류 제한 능력을 이끌어내는 동시에 열적 안정성을 확보하기 위해서 초전도 선재는 초전도성을 잃지 않는 범위 내에서 동작해야 한다.

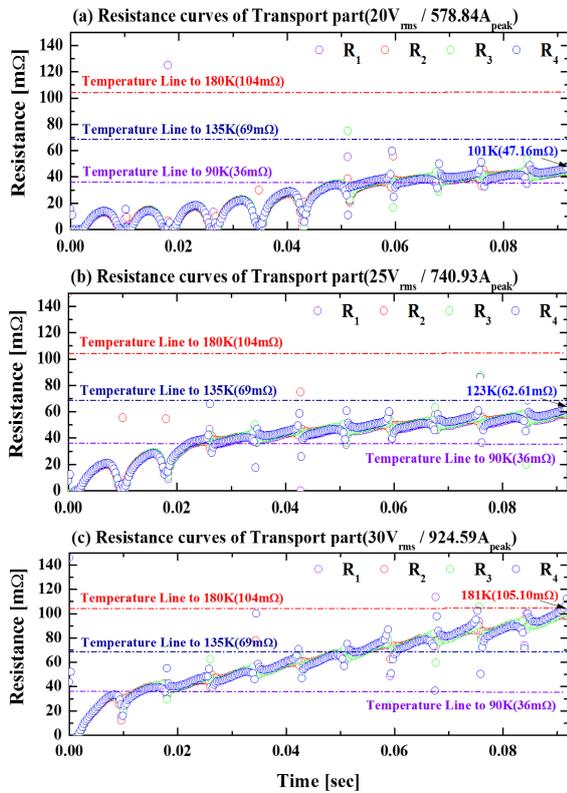


Fig. 5. Resistance property curves of transport part according to the applied fault current (a) 20 V<sub>rms</sub>/578 A<sub>peak</sub>, (b) 25 V<sub>rms</sub>/740 A<sub>peak</sub>, and (c) 30 V<sub>rms</sub>/924 A<sub>peak</sub>.

다. 초전도체를 이용한 전류제한 소자의 성능평가 시 사용된 지표 중 온도 부분은 90 K 이하에서 안정영역, 90 K에서 180 K를 준안정영역, 180 K에서 250 K를 위험영역으로 나눈다 [7].

그림 5는 인가전압의 크기에 따라 측정된 저항 그래프이다. 그림 2에 따라 환산된 측정값에 의해 각 온도별 저항은 90 K에서 36 mΩ, 145 K에서 69 mΩ/cm, 160 K에서 104 mΩ, 250 K에서 154 mΩ이다. 실험에서 측정된 저항은 4단자법을 이용하여 측정된 전압·전류로부터 산출하였다.

사고전류를 20 V<sub>rms</sub> / 578.84 A<sub>peak</sub> 인가 시 3주기까지는 임계온도인 90 K 미만으로 매우 안정하고, 초전도성을 완전히 회복하는 경향을 보인다. 또한, 5.5주기에서 최종 저항은 47.16 mΩ으로 모든 구간에서 101 K 미만의 온도에서 동작하기에 열적으로 매우 안정한 상태이다. 사고전류를 25 V<sub>rms</sub> / 740.93 A<sub>peak</sub> 인가 시 첫 주기에서는 90 K 이내로 매우 안정적으로

동작한다. 2주기부터 지속적으로 열이 상승하여 임계 온도 지점은 벗어나지만 사고구간 전체 주기를 놓고 보았을 때, 123 K 이내로 열적으로 안정한 상태다. 앞선 두 사고에서는 준안정영역의 중간 지점인 135 K를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면에 사고전류 30 V<sub>rms</sub> / 924.59 A<sub>peak</sub>에서는 1/2주기는 안정영역에 존재하나, 지속적으로 온도가 상승하여 5주기까지 준안정영역인 180 K로 안정한 상태이나, 5.5주기에서 열적 안정상태를 1 K 정도 초과함을 확인하였다. 하지만 초전도 선재들이 위험영역인 250 K 이내에서 동작하기 때문에, 사고전류 제한형 고온 초전도 케이블의 통전부는 열적으로 안정한 상태이다. 이 결과를 바탕으로 유추해볼 때, 고온 초전도 케이블에 사고전류가 발생해도 통전부는 열적으로 안정할 것으로 사료된다.

#### 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 핵심 요소인 통전부를 제작하여 전류통전 능력과 저항대비 열적 안정성을 비교 고찰하였다.

통전부는 사고 시 각 초전도 선재에 전류분배가 정확히 일치하였기 때문에 전류통전 능력을 확인할 수 있었다. 또한, 예상한 바와 같이 사고전류를 5.5주기까지 약 30% 제한하는 현상도 확인하였다. 마찬가지로 역시 통전부가 계통 내 차단기 동작시점까지 180 K이하의 온도로 준안정영역에서 열적으로 매우 안정하게 동작됨을 확인하였다.

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

#### 감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2013년 선정 기초 연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임 [과제번호 : R13XA03].

## REFERENCES

- [1] S. H. Lee and J. U. Park, *World of Electricity Journal*, **63**, 28 (2014).
- [2] J. H. Kim and K. W. Lee, *Electrical Journal*, **257**, 19 (1998).
- [3] O. B. Hyun, *The proceedings of KIEE, SFCL Development and Application*, **59**, 26 (2010).
- [4] D. Hazelton, Y. Xie, V. Selvamanickam, R. Anthony, J. C. Llambes, and T. Lehner, *IEEE Citres*, **10**, 42 (2010).
- [5] M. J. Kim, H. I. Du, S. G. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, and B. S. Han, *J. KIEEME*, **22**, 1067 (2009).
- [6] A. Ishiyama, H. Ueda, T. Ando, H. Naka, S. Bamba, and Y. Shiohara, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 2430 (2007).
- [7] S. O. Heo, T. M. Kim, B. S. Han, and H. I. Du, *J. KIEEME*, **26**, 904 (2013).