

철심과 권선을 이용한 전류제한기에 적용시킨 안정화층이 다른 YBCO Coated Conductor의 전류제한 특성에 관한 연구

이동혁¹, 두호익^{2,a}, 김용진¹, 한병성¹, 임성우³, 한상철⁴, 이정필⁴

¹ 전북대학교 전기공학과

² 전북대학교 전자정보고급인력양성사업단

³ 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소

⁴ 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소

The Study on the Current Limiting Characteristics of YBCO Coated Conductor with Different kinds of Stabilization Layer Applied to SFCL Using Iron Core and Coil

Dong Heok Lee¹, Ho Ik Du^{2,a}, Yong Jin Kim¹, Byoung Sung Han¹, Seong Woo Yim³, Sang Chul Han⁴, and Jeong Phil Lee⁴

¹ Electrical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

² Advanced Graduate Education Center of Chonbuk for Electronics & Information Technology-BK21, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

³ Transmission and Distribution Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, 305-380, Korea

⁴ Green Growth Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, 305-380, Korea

(Received August 27, 2010; Revised September 15, 2010; Accepted September 20, 2010)

Abstract: The yttrium-barium-copper-oxide (YBCO) coated conductor, which supplement the fault of the existing superconducting current-limit materials YBCO thin film, bismuth-strontium-calcium-copper-oxide(BSCCO) wire and bulk, has been improved its mechanical weakness and has high index; hence, after quench YBCO coated conductor could limit the fault current effectively because of fast resistance occurrence speed. Furthermore, it has wide applicable area as an current limit material because it shows different resistance occurrence tendency by the thickness and kind of stabilization material sputtered on the superconducting layer. Therefore, many researchers are carrying out the study of application of YBCO coated conductor to superconducting fault current limiter (SFCL) for making high quality current limit element, based on resistance type. On the other hand, the study for other type except resistance type has been rarely conducted for the application of YBCO coated conductor to SFCL as an current limit element. Consequently, in this study, YBCO coated conductor with different stabilization layer Cu and Stainless steel, is applied to SFCL using iron core and coil, and examine the many index points as an current limit element, such as current limit characteristic, the tendency of resistance occurrence, response time, the temperature trend for stability.

Keywords: YBCO coated conductor, SFCL, Stabilizing materials

1. 서 론

초전도 전류 제한기 (superconducting fault current limiter, 이하 SFCL)의 개발은 우수한 특성을 갖는

a. Corresponding author: dudoc@chonbuk.ac.kr

전류제한 소자의 제작에서부터 시작한다고 말 할 수 있다. 기존의 초전도 전류제한 소자로 사용된 yttrium-barium-copper-oxide (YBCO) 박막, bismuth-strontium-calcium-copper-oxide (BSCCO) 선재 및 벌크는 동시 켄치 및 기계적 취약성 등의 문제점으

로 인한 설계용 적용을 위한 연구개발이 한계에 이른 상황이다. 반면 2세대 선재라 명명되어지는 YBCO coated conductor (이하 YBCO CC)는 금속 기판에 초전도층을 증착하는 방법으로 제조 되어 기계적 취약성을 보완함과 동시에 높은 인덱스 값을 갖고 있어 켄치 발생 후 선재에서 발생하는 저항의 발생 속도가 빨라서 효과적으로 사고전류를 제한할 수 있다. 또한, 초전도층 위에 증착되는 안정화 재료의 두께 및 종류에 따라 상이한 저항 발생 경향을 나타내어 전류 제한소자로서의 적용 범위가 다양하다는 장점을 갖고 있다 [1,2]. 따라서 우수한 특성을 갖는 전류제한 소자의 제작을 위한 YBCO CC의 SFCL적용에 대한 연구가 활발히 진행되었고 이는 저항형의 형태를 기본으로 하여 수행되어져 왔다[3,4]. 반면 SFCL의 구조적인 개발에 따른 저항형 이외의 타입의 전류제한기에 있어서 YBCO CC를 이용한 전류제한 소자의 적용에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이는 SFCL의 구조적인 동작 특성과 전류제한소자의 동작 특성이 개별적으로 분석되어지고 있음을 나타내며 SFCL의 우수한 특성을 위해서는 타입별 전류제한기에 전류 제한소자의 적용에 대한 동작 특성 분석의 필요성을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 철심과 권선을 이용한 SFCL에 각각 Cu와 stainless steel을 안정화층으로 갖는 YBCO CC (이하 각 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC)를 적용하여 전류 제한소자로서의 판단 지표가 되는 전류제한능력 및 저항 발생 경향, 응답시간, 안정성을 위한 온도 발생 경향에 대해 살펴보았다.

2. 실험 방법

표 1에 본 실험에서 사용된 두 종류의 YBCO CC의 제원을 나타내었다. 공통적으로 금속기판위에 YBCO초전도체가 증착되었으며 통전 시 안정성 향상을 위해 은이 초전도 층 위에 피복된 형태로 제작 되었다. 각 선재는 20 μm 두께의 Cu와 stainless steel를 안정화 층이 증착되었으며 각각 85 A 및 1.5-2 V/cm, 70 A 및 0.6 V/cm의 임계전류 및 전압등급을 갖는다. 두 선재의 임계전류 및 전압 등급은 상이하지만, 임계온도는 모두 90 K으로 동일 조건을 갖는다.

그림 1은 두 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 나타낸 그래프이다. YBCO@Cu CC와

Table 1. Property of the YBCO@Cu CC and YBCO@Sus CC.

YBCO@Cu coated conductor	
Producer	Superpower
Stabilizer	Cu surround 20 μm
Overlayer	Ag 2 μm
Substrate	Hastelloy 50 μm
I _c &T _c	85 A(1 μN/cm,@77 K), 90 K
Rate voltage	1.5-2 V/cm(at 300 K)
Resistance	0.9323 mΩ/cm (at 300 K)
YBCO@Sus coated conductor	
Producer	AMSC
Stabilizer	Stainless steel surround 20 μm
Overlayer	Ag 2 μm
Substrate	Hastelloy 50 μm
I _c &T _c	70 A(1 μN/cm,@77 K), 90 K
Rate voltage	0.6 V/cm(at 300 K)
Resistance	3.7 mΩ/cm (at 300 K)

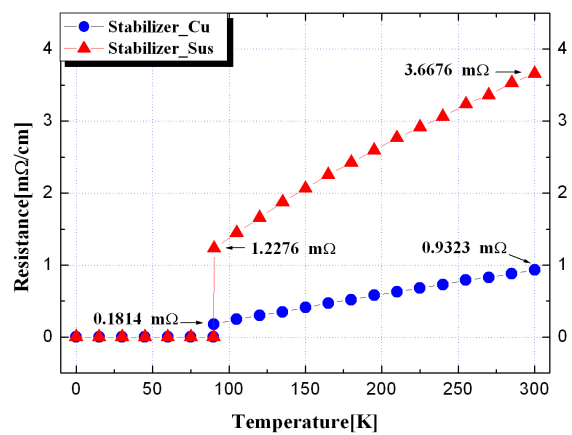


Fig. 1. Resistance characteristic curve by temperature of the YBCO@Cu CC and YBCO@Sus CC.

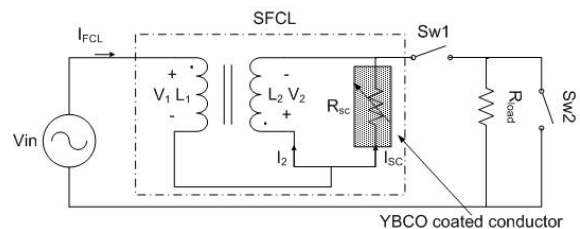


Fig. 2. Schematic of the experimental circuit.

YBCO@Sus CC는 각각 90 K에서 0.1814 mΩ/cm와 1.2276 mΩ/cm, 상온인 300 K에서는 0.9323 mΩ/cm와 3.6676 mΩ/cm가 측정되었다. 아울러, 두 선재의 퀀치 후 저항 발생 경향이 YBCO@Sus CC가 YBCO@Sus CC에 비해 가파르게 상승함을 알 수 있고 발생 저항 역시 크다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 실험장치 구성도를 나타낸다. SFCL은 철심에 1차 권선과 2차 권선이 직렬연결 되어있으며 2차 권선과 초전도소자가 병렬로 연결된 구조를 갖는다. SFCL의 가극 결선 시 1차 권선 및 2차 권선의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{FCL}(I_1) &= I_2 + I_{SC} \\ V_1 &= j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad (M = k\sqrt{L_1 L_2}, k=1) \\ V_2 &= j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 = I_{SC} R_{SC} \end{aligned} \quad (1)$$

L_1 , L_2 는 1차 권선, 2차 권선의 자기 인덕턴스이며, M 은 상호인덕턴스를 나타낸다. 이 식들로부터 SFCL의 등가 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_T = \frac{j\omega R_{SC} L^2}{R_{SC} + j\omega L_2} \quad (L = \sqrt{L_1} - \sqrt{L_2}) \quad (2)$$

SFCL의 권선비는 전류 제한율이 우수하다고 판단되어지는 가극 3:1로 결선하였으며 사고를 모의하기 위해 Sw1과 Sw2를 순차적으로 동작시켰다. 아울러, 사고 주기는 5.5 주기로 설정하였으며 V_{in} 을 15 V_{rms}에서 45 V_{rms}까지 10 V_{rms} 단위로 증가시키며 인가하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 YBCO@Cu CC의 인가전압에 따른 저항 발생을 나타내었다. 15 V_{rms}에서 35 V_{rms}인가 시 선재의 저항 발생 경향은 완만하며 발생 저항은 18.14 mΩ/m이하로서 그림 1을 바탕으로 선재의 온도는 90 K에 도달하기 전임을 예상할 수 있다. 한편, 45 V_{rms}인가 시 저항 발생은 가파르게 상승하며 발생저항은 41 mΩ/m으로서 선재의 온도는 150 K으로 예상할 수 있다. 이는 YBCO@Cu CC의 발생 저항이 작아 2차 권선과의 전류분배에 있어서 지속적으로 과전류가 흐르게 되고 이에 따른 저항 증가가 발생하며 선재에

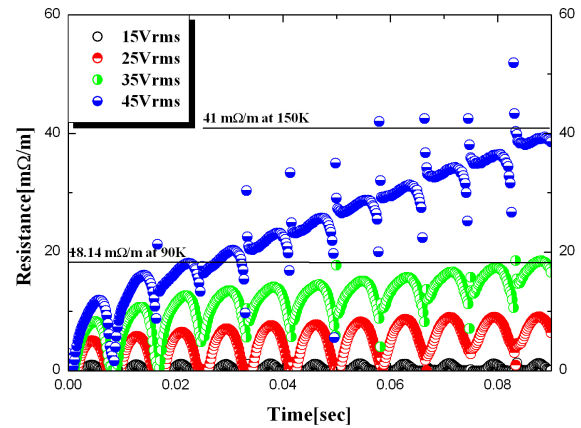


Fig. 3. Resistance characteristics of the YBCO@Cu CC according to applied voltage variation.

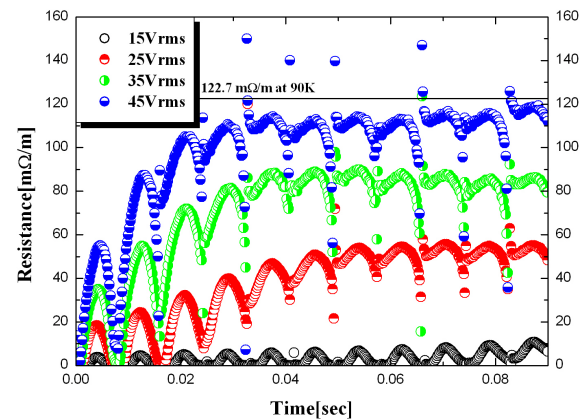


Fig. 4. Resistance characteristics of the YBCO@Sus CC according to applied voltage variation.

줄열이 축적되기 때문이라고 판단된다.

그림 4는 YBCO@Sus CC의 인가전압에 따른 저항 발생을 나타내었다. 그림 3의 YBCO@Cu CC에 비해 저항 증가 경향이 가파르게 상승하며 높은 저항 값이 발생함을 알 수 있다. 이는 YBCO CC의 저항형 적용 시와 같은 경향을 보이는 것으로서 전류 제한 소자로서 우수한 특성을 보일 것을 시사한다. 또한 인가 전압 45 V_{rms}까지의 발생저항은 122.7 mΩ/m이하로서 그림 1을 바탕으로 선재의 온도는 90 K 이하로 유지됨을 예상할 수 있다. 따라서 저항의 발생에 따른 선재에 축적되는 줄열이 액체질소에 의해 냉각되어 주기가 증가함에 따른 저항 증가가 이루어지지 않고 포화되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 선재의 YBCO@Sus CC

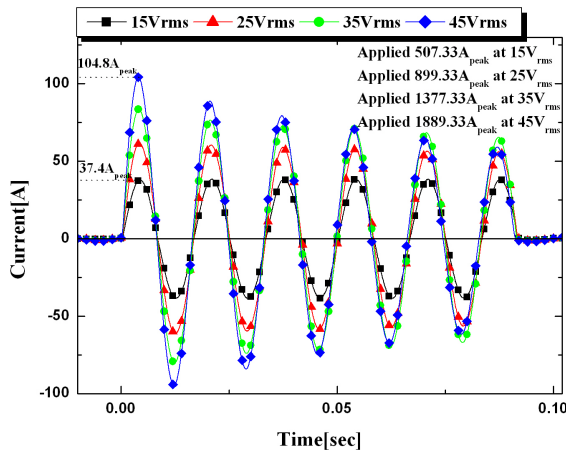


Fig. 5. Current limiting characteristics of the YBCO@Cu CC according to applied voltage variation.

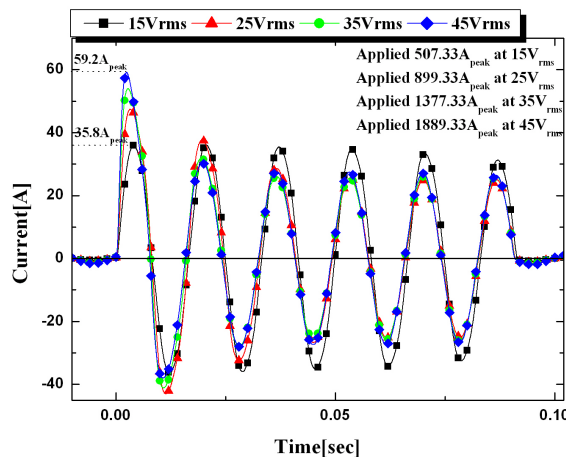


Fig. 6. Current limiting characteristics of the YBCO@Sus CC according to applied voltage variation.

첫주기 발생 저항이 크므로 2차 권선과의 전류 분배에 있어서 YBCO@Cu CC경우에 비해 상대적으로 초전도소자에 작은 전류가 흐르기 때문이라고 판단된다. 따라서 동일한 사고전류 발생 시 선재의 저항 발생 경향을 바탕으로 YBCO@Sus CC가 YBCO@Cu CC보다 선재의 온도가 낮게 유지되어 보다 안정적 동작을 할 수 있다고 사료된다.

그림 5, 6은 각각 인가전압에 따른 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC의 사고전류 파형을 나타낸다. YBCO@Cu CC의 경우 15 V_{rms} 와 45 V_{rms}인가 시 첫 주기 피크는 각각 37.4 A_{peak}와 104.8 A_{peak} 이고,

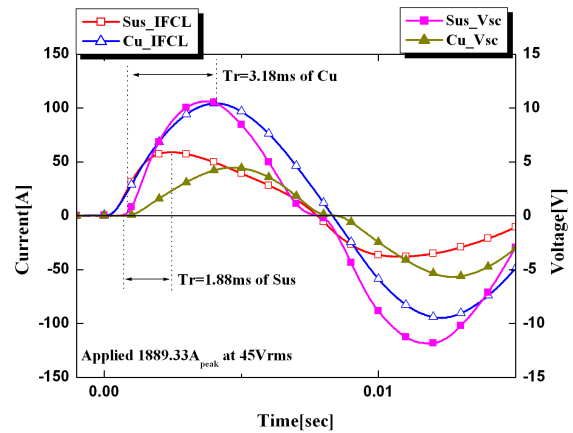


Fig. 7. Response time characteristics of the YBCO@Cu CC and YBCO@Sus CC when 45 V_{rms} was applied.

YBCO@Sus CC의 경우 15 V_{rms} 와 45 V_{rms}인가 시 첫 주기 피크는 각각 35.8 A_{peak}, 59.2 A_{peak}이었다. 15 V_{rms}를 인가한 경우에는 두 선재 모두 발생 저항이 매우 작아 전류제한이 SFCL의 초전도소자 저항을 제외한 철심과 권선에 의해 발생하는 등가 임피던스에 의해서 일어나며 비슷한 크기의 전류제한을 보인다. 반면에 45 V_{rms}를 인가한 경우에는 두 선재의 발생 저항의 크기에 차이가 발생하게 된다. 즉, 인가 전압이 증가함에 따라 YBCO@Sus CC의 저항이 크게 발생하여 제한되는 전류의 크기 역시 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 45 V_{rms} 인가 시 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC의 응답시간을 나타낸 그래프로써 두 선재의 응답시간은 각각 3.18 ms와 1.88 ms로 측정되었다. 응답시간이란 전류가 최대 제한전류 값에 도달하는 시점과 퀀치 발생 시점간의 시간간격을 나타내는 것으로서 SFCL이 사고 발생 후 얼마만큼의 시간 안에 동작하여 전류를 제한할 수 있는지를 나타내는 지표가 된다. 두 선재의 응답시간의 차이는 YBCO@Cu CC에 비해 YBCO@Sus CC의 빠른 상전이 속도에 기인한 것으로 판단되며, 따라서 YBCO@Sus CC를 초전도 전류 제한 소자로 사용했을 시 YBCO@Cu CC보다 빠르게 사고전류를 제한할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 철심과 권선을 이용한 SFCL에 각각 Cu와 stainless steel을 안정화층으로 갖는 YBCO CC를 적용하여 전류제한소자로서의 동작 특성을 비교 분석하였다. 결과로부터 YBCO@Sus CC가

YBCO@Cu CC보다 발생 저항이 가파르게 증가하며 저항 값 또한 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 바탕으로 하여 전류 제한 특성이 YBCO@Sus CC가 우수하였으며, 빠른 상전이 속도에 기인한 짧은 응답시간 특성으로 인해 YBCO@Cu CC보다 빠르게 사고전류를 제한한다는 것을 알 수 있었다. 또한 선재의 온도 발생을 분석한 결과 상대적으로 낮은 온도가 발생하는 YBCO@Sus CC가 YBCO@Cu CC에 비해 보다 나은 안정성을 유지하며 전류 제한 소자로서 동작할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 재원으로

한국학술진흥재단 (KRF-2007-521-D00177)의 지원 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] N. Amemiya, S. Murasawa, N. Banno, and K. Miyamoto, *Physica C* **310**, 16 (1998).
- [2] T. Watanabe, Y. Shiohara, and T. Izumi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**, 2445-5-2451 (2003).
- [3] S. W. Yim, H. I. Du, H. R. Kim, O. B. Hyun, S. H. Sohn, J. H. Lim, S. D. Hwang, S. Y. Oh, B. S. Han, *Supercond. Cryogenics* **10**, 10 (2008).
- [4] H. I. Du, M. J. Kim, S. G. Doo, Y. J. Kim, D. H. Lee, B. S. Han, *J. KIEEME* **22**, 854 (2009).