

사고전류 인가 시 초전도선재의 상전도-초전도 접합부가 통전전류와 퀘치저항에 미치는 영향

홍공현¹, 두호익^{2,a}, 한병성²

¹ 전북대학교 전기공학과

² 전북대학교 초전도 전력기기 국제 표준화·인증 및 인력양성센터

Effect on the Transport Current and Quench Resistance of the HTS Wire
 with Normal-Superconducting Junction During the Fault Current Applying

Gong-Hyun Hong¹, Ho-Ik Du^{2,a}, and Byoung-Sung Han²

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

² International Standardization & Certification for Superconducting Power Apparatus and Human Resource Development Center, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Received August 29, 2015; Accepted September 21, 2015)

Abstract: The second-generation HTS wire its YBCO coated conductor is widely used in the superconducting power apparatus. The YBCO coated conductor uses the normal-superconducting junction to increase the transport capacity of superconducting power apparatus when it is applied. The normal-superconducting junction can be a cause of reducing the stability of the superconducting power apparatus when a fault current is applied. Thus, in this study we have conducted the effect analysing normal-superconducting junction for the fault current using transport current and quench resistance. From the experimental results when a fault current is applied, the effect on the normal-superconducting junction is reduced the larger the amplitude of the fault current and is helpful to maintain the thermal stability of the HTS wire.

Keywords: YBCO coated conductor, Quench resistance, Transport current, Normal-superconducting junction

1. 서론

우리나라 초전도 전력기술 개발은 2001년부터 2011년까지 진행된 DAPAS (development of advance power system by applied superconductivity technologies program) 프로젝트로부터 본격적으로

시작되었다. DAPAS 프로젝트의 주요 목표는 고온 초전도 선재를 이용한 초전도 전력기기 개발이었다. 이때 초전도 전력기기 내에서 초전도선재의 구성기술은 주요한 요소기술이다 [1].

한편, 근래 초전도 전력기기에는 2세대 초전도선재인 YBCO coated conductor(이하 YBCO CC)가 주로 사용되고 있다. YBCO CC는 전류밀도가 높고, 기계적 변형에 따른 임계 특성 저하가 거의 없다 [2]. 또한 초전도 선재간의 연결은 상전도 접합부를 통해 가능하다. 이와 같은 특성들로 인하여 초전도 전력기기의 용량증대에 적합하다는 평가를 받고 있다. 한편, 초전도선재

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

의 상전도 접합부가 과전류 통전 시 초전도 전력기기의 안정성을 저해시키는 요소로 작용할 가능성에 대한 우려가 있다 [3,4].

이에 본 연구에서는 과전류 통전 시 접합부가 초전도 선재에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 이를 위해 2종의 시험용 샘플을 제작하고, 사고전류를 임계전류의 18배까지 통전시켜 그 결과를 비교 분석하였다. 시험에 사용된 초전도 선재는 구리를 안정화 층으로 갖는 YBCO coated conductor가 사용되었다.

2. 실험 방법

2.1 실험 샘플

Table 1. Properties of YBCO coated conductors.

Model name	SCS2050
Stabilizer	Copper
Length of sample	100 cm
Rated voltage	1.2 V _{rms} /cm(@300 K)
Resistance	1.86 mΩ/cm(@300 K)
Critical current	49 A _{rms} (1 μV/CM,@77 k)

본 실험에서 사용된 초전도 선재는 미국 Super Power사에서 제작한 SCS2050 모델로 표 1과 같다.

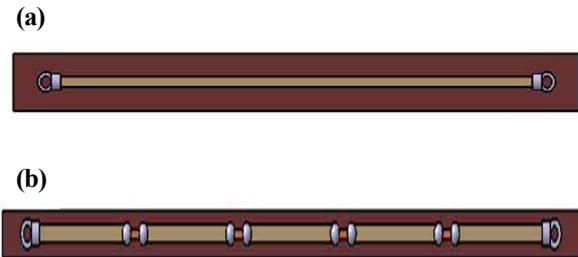


Fig. 1. Schematic diagram of the sample at (a) YBCO@100 and (b) YBCO@200.

그림 1(a)는 길이 100 cm 초전도 선재를 이용한 시험용 샘플(이하 YBCO@100)의 개념도이다. 접합부가

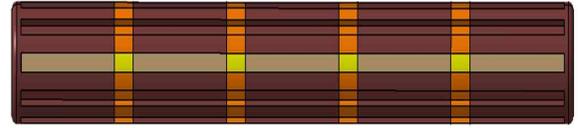


Fig. 2. Schematic diagram of zig.

없는 이상적인 상태를 모의한 대조군이다. 실험군은 5개의 초전도 선재를 4개의 접합부로 연결한 샘플(이하 YBCO@20)이다. 그림 1(b)는 YBCO@20의 개념도이며, 접합부 간 초전도 선재 하나의 길이는 20 cm이다. YBCO@20과 YBCO@100에 사용된 초전도 선재의 길이는 100 cm로 동일하다. 또한, 과전류 통전 시 초전도 선재에 접합부가 미치는 영향을 극대화하기 위해 초전도 선재의 최소전압 등급을 고려하여 접합부의 개수를 설정하였다.

그림 2는 초전도 선재, 접합부, 권선용 포머를 표현한 도면이다. 여러 샘플을 동시에 실험할 수 있도록 원형모양의 지그에 각 샘플이 삽입될 수 있는 홈을 새겨 넣었다.

2.2 실험장치 구성

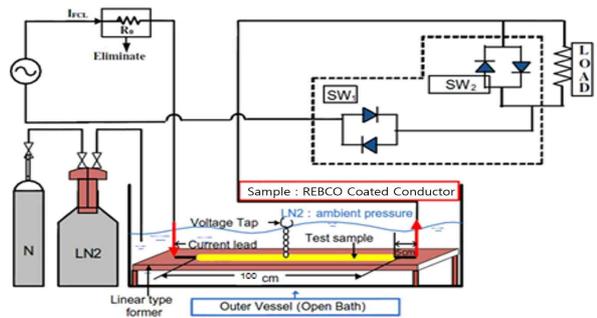


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental circuit.

그림 3은 시험 장치 구성도이다. 샘플 냉각은 개방된 저온용기 내에 액체질소를 채운 후, 함침하여 냉각하였다. 과전류 통전은 선로 상에 기준 저항을 제거하고, 전원전압의 %임피던스만 고려된 과전류를 인가전압에 맞게 생성한 후 시험용 샘플에 통전하였다. 과전류 통전주기는 차단기 동작 시점인 5.5주기를 고려하여 인가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 통전전류

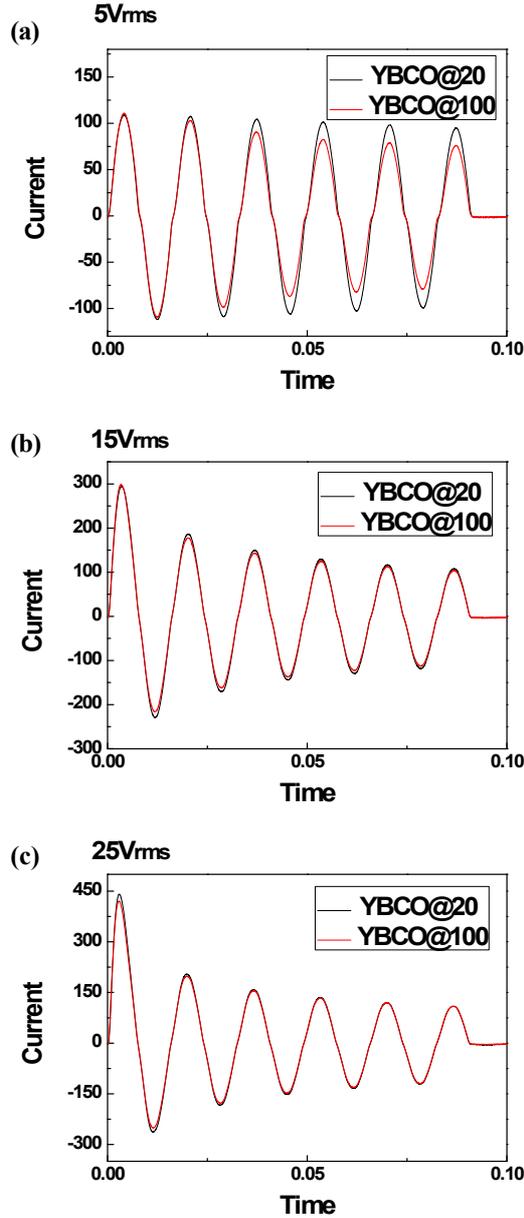


Fig. 4. Current curves of YBCO at (a) 5 V_{rms}, (b) 15 V_{rms}, and (c) 25 V_{rms}.

그림 4는 YBCO@20과 YBCO@100에 과전류를 인가한 후 통전전류를 측정된 그래프이다. 시험용 샘플에 인가한 과전류는 각각 5 V_{rms}에서 185 A_{peak}, 15 V_{rms}

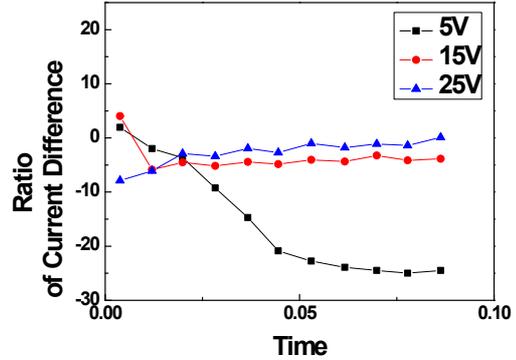


Fig. 5. Ratio of current difference.

에서 685 A_{peak}, 25 V_{rms}에서 1,253 A_{peak}이다. 시험용 샘플의 임계전류가 약 69 A_{peak}임을 감안하면, 임계전류의 2.5배, 10배, 18배의 전류를 인가한 것과 같다.

이때 YBCO@20의 통전전류는 각각 109.333 A_{peak}, 299 A_{peak}, 441.933 A_{peak}이며, YBCO@100에서는 각각 110.933 A_{peak}, 295 A_{peak}, 421 A_{peak}이다. 결과로부터 과전류 인가 시 상전도 접합부가 통전전류를 증가시키는 경향을 보인다. 이는 과전류가 인가 시 시간에 따라 증가하는 초전도선재의 저항증가를 추가된 상전도 접합부가 완화시켜 주기 때문이다. 단 예외적으로, 5 V_{rms}를 인가한 첫 주기의 경우에는 상전도 접합부가 통전전류를 더욱 작게 했다. 이는 비교적 적은 과전류가 인가되었기 때문에 발생한 초기퀵치저항이 상전도 접합부의 저항보다 작아 일어난 현상으로 사료된다. 따라서 전류제한 역시 상전도 접합부에 의한 전류제한이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 초전도선재의 접합부가 통전전류에 미치는 영향을 백분율로 표현한 것이다. 식 (1)을 이용해 접합부가 없는 대조군인 YBCO@100의 각 주기의 최대전류 ($I_{100 Peak}$)를 기준으로 실험군인 YBCO@20의 각 주기의 최대전류($I_{100 Peak}$)와의 차이를 비율(I_r)로 표현하였다.

$$I_r = (I_{100 Peak} - I_{20 Peak}) / I_{100 Peak} \times 100 \quad (1)$$

인가한 과전류의 크기가 크고, 인가 주기가 길어질수록 두 샘플간의 전류차이 비율(I_r)은 0%에 가까워진다. 따라서 접합부가 통전전류에 미치는 영향은 작아진다고 판단할 수 있다.

3.2 켄치저항

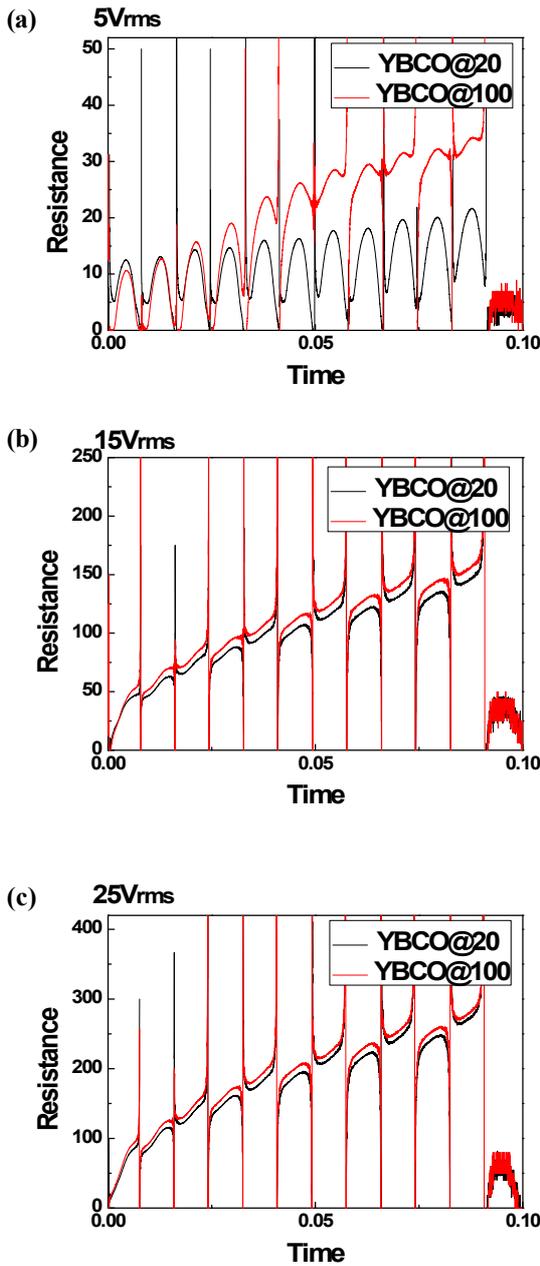


Fig. 6. Quench resistance curve of YBCO at. (a) 5 V_{rms} , (b) 15 V_{rms} , and (c) 25 V_{rms} .

그림 6은 측정된 전압(V)과 전류(I) 이용하여 켄치저항(R)을 표현한 그래프이다. 이를 식 (2)에 나타내었다.

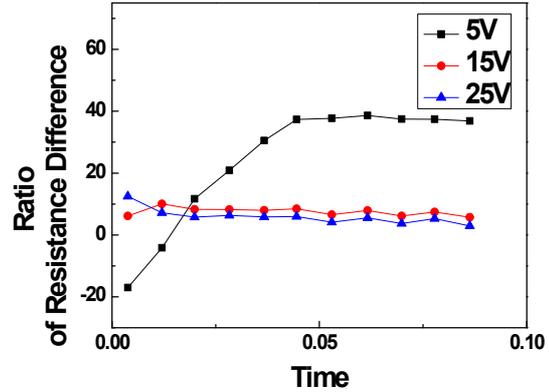


Fig. 7. Ratio of resistance difference.

$$R = V/I \quad (2)$$

발생한 켄치저항은 5 V_{rms} 첫 주기에만 YBCO@20의 경우가 더 크며, 2주기부터는 YBCO@100이 더 크다. 또한 15 V_{rms} , 25 V_{rms} 에서는 YBCO@100의 켄치저항이 더 크다. 이를 통해 상전도 접합부에 의한 저항보다 초전도선재의 켄치저항이 더 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 또한 상전도 접합부가 초전도선재의 열적 안정성을 증가시킴을 알 수 있다.

단, 5 V_{rms} 의 경우 인가된 과전류가 비교적 작은 편이기 때문에 첫 주기에서 발생한 켄치저항이 접합부로 사용한 무산소동의 저항보다 더 작은 것으로 판단된다. 전체적으로 인가한 과전류의 크기가 클수록 YBCO@100과 YBCO@20의 켄치저항 그래프는 동일한 경향을 보인다.

그림 7은 식 (3)을 사용하여 초전도선재의 접합부가 켄치저항에 미치는 영향을 백분율로 표현한 것이다. YBCO@100의 각 주기의 최대저항($R_{100Peak}$)을 기준으로 YBCO@20 각 주기의 최대저항(R_{20Peak})의 차이를 비율로(R_r)로 나타내었다.

$$R_r = (R_{100Peak} - R_{20Peak})/R_{100Peak} \times 100 \quad (3)$$

통전전류 특성 분석과 마찬가지로 인가한 과전류의 크기가 크고, 인가 주기가 길어질수록 저항 차이의 비가 0%에 가까워짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

YBCO coated conductor는 초전도 전력기기의 용량증대를 위해 기기 내에서 상전도체와의 접합이 필요하다. 이러한 상전도 접합부는 과전류 통전 시 초전도 선재와 달리 상이한 저항증가 현상이 나타날 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 과전류 인가 시 상전도 접합부가 통전전류 특성 및 퀘치저항에 미치는 영향을 시험용 샘플을 통해 비교 고찰하였다. 분석된 결과에서 인가한 과전류의 크기가 크고, 인가 주기가 길어질수록 통전전류 및 퀘치저항에 대한 상전도 접합부의 영향은 최소화 되는 경향을 알 수 있었다. 또한 상전도 접합부가 초전도선재의 통전전류 및 퀘치저항에 미치는 영향이 최소화되는 조건 하에서 초전도 전력기기의 열적 안정성을 증대시키는 요소로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

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] H. I. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, and B. S. Han, *IEEE Transactions on*, **20**, 3 (2010).
- [3] S. O. Heo, T. M. Kim, B. S. Han, and H. I. Du, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 904 (2013).
- [4] T. M. Kim, G. H. Hong, B. S. Han, and H. I. Du, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 10 (2014).