사고전류 제한형 초전도케이블 제작을 위한 초전도 선재 선정에 관한 연구

허성욱¹, 김태민¹, 한병성¹, 두호익^{2,a}

¹ 전북대학교 전기공학과

² 전북대학교 HOPE IT 인력양성사업단

Study on Selection of HTS Wire for Fabrication of Fault Current-limiting Type HTS Cables

Soung-Ouk Heo¹, Tae-Min Kim¹, Byung-Sung Han¹, and Ho-Ik Du^{2,a}

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

² HOPE IT Human Resource Development Center, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Received November 12, 2013; Revised November 21, 2013; Accepted November 24, 2013)

Abstract: When an abnormal condition occurs due to a fault current at a consumer location where electricity is supplied through a high-capacity and high- T_c superconducting(HTS) cable, the HTS cable would be damaged if there is no appropriate measure to protect it. Therefore, appropriate measures are needed to protect HTS cables. The fault-current-limiting HTS cable that was suggested in this study performs an ideal transport current function in normal operations and plays a role in limiting a fault current in abnormal operation (i.e., when a fault current is applied). It has a structure that facilitated its self-current-limiting ability through device change and reconfiguration in the existing HTS cable without extra switching equipment. To complete this structure, it is essential to investigate about the selection of the superconducting wire. Therefore, in this paper, HTS wire using two types of different stabilization layer is compared and examined the stability and current limiting properties under the existence of a fault current.

Keywords: Fault current, HTS wire, Stabilization layer, Current limiting properties, Stability, fault-current-limiting HTS cable

1. 서 론

국내 전력계통의 운영 정책은 최근 들어 분산화 및

컴팩트화를 지향하고 있다. 이러한 상황 하에 초전도 전력기기의 연구개발 방향 역시 정책에 부합하도록 진행되어야 한다. 분산화 및 컴팩트 화가 주요 이슈가 되면서, 저전압·대용량으로 운전하는 초전도 케이블이 사고전류를 제한할 수 있는 기능을 보유한다면 운영 정책에 부합할 수 있을 것으로 사료된다 [1,2].

사고전류 제한형 초전도케이블은 초전도케이블과 초전도 전류제한기의 기능을 동시에 가지며, 그 구조는 케이블 형태이다. 사고전류 제한형 초전도케이블

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

Copyright ©2013 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.

은 기존 초전도케이블 중심에 삽입된 구리도체의 구조 변경만으로 사고전류를 제한한다. 동작 원리는 다음과 같다. 중심에 삽입된 구리도체의 직경을 줄임으로써 초전도선재로의 사고전류 통전량을 증가시킨다. 증가된 전류에 의해 초전도체의 켄치 저항이 크게 발생되고 이때 발생한 저항에 의해 사고전류를 제한하는 메커니즘이다. 다시 말해, 임계전류 이상의 사고전류 통전 시 초전도 선재에서 발생하는 켄치 저항을 이용하여 사고전류를 제한하게 된다. 따라서 정상 운전 시 무손실 통전을 담당하고, 사고 발생 시 사고전류를 제한하는 초전도 선재의 선정은 매우 중요한 사항이다.

이에 본 논문에서는 비저항이 다른 2종의 YBCO Coated Conductor를 이용하여, 실험용 샘플을 제작하고 전류제한 능력과 안정성을 상호 비교·분석함으로써 사고전류 제한형 초전도케이블에 적합한 초전도 선재 선정하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 구성 및 실험 방법

Table 1. Properties of YBCO coated conductors.

Type	YBCO Coated Conductor {AMSC}
Stabilizer	Sus (Stainless steel)
Length of Sample	50 cm
Ic & Tc	80 A_{rms} (1 $\mu V/cm$, @77 K), 90 K
Rated voltage	0.6 V_{rms}/cm (@300 K)
Resistance	3.7 $m\Omega/cm$ (@300 K)
Type	YBCO Coated Conductor {Superpower}
Stabilizer	Cu (Copper)
Length of Sample	50 cm
Ic & Tc	93 A_{rms} (1 $\mu V/cm$, @77 K), 90 K
Rated voltage	1.2 V_{rms}/cm (@300 K)
Resistance	0.198 $m\Omega/cm$ (@300 K)

표 1은 본 실험에서 사용된 초전도 선재의 재원이다. 각각 구리와 스테인레스를 안정화층으로 갖는 초전도 선재 (이하 각각 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC)를 병렬 연결하여 사용하였다. 두 YBCO@CC의 임계온도는 90 K로 동일하며, 각각 80 A_{rms} , 93

Fig. 1. Resistance characteristic curve by temperature of YBCO@ CC.

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental circuit.

A_{rms} 의 임계전류를 갖는다. 실험에 사용된 두 선재를 비교했을 때 YBCO@Sus CC가 YBCO@Cu CC보다 높은 비저항 특성을 갖는다. 두 선재의 임계전류는 다르지만 사고전류 인가 시 발생 저항을 온도에 따라 검출하기 위하여 동일한 임계 온도를 갖는 선재를 선정하였다.

그림 1은 초전도 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 나타낸 그래프이다. YBCO@Sus CC선재의 저항은 90 K에서 1.2276 $m\Omega/cm$, 180 K에서 2.4333 $m\Omega/cm$ 이며, 상온인 300 K에서 3.6333 $m\Omega/cm$ 이며, YBCO@Cu CC선재의 저항은 90 K에서 0.1814 $m\Omega/cm$, 180 K에서 0.52 $m\Omega/cm$ 이며, 상온인 300 K에서 0.9323 $m\Omega/cm$ 가 측정되었다. 이를 바탕으로 사고 발생 시 저항 발생을 측정하여 초전도 선재의 온도를 유추할 수 있으며, 이는 안정성을 판단하는 지표로 활용될 것이다.

그림 2와 3은 시험 장치 구성도와 사진이다. 사고를 모의하기 위하여 SW_1 과 SW_2 를 순차적으로 동작

Fig. 3. Experimental photograph.

시켰으며, 기준 저항 (R_0)을 제거하여 사고전류를 인가하였다. 각각 $15 V_{rms}$, $25 V_{rms}$, $35 V_{rms}$ 의 전압을 인가하여 $428 A_{peak}$, $742 A_{peak}$, $1,136 A_{peak}$ 의 사고전류를 모의하고 시험 선로 상에 통전시켰다. 저항 값을 검출하기 위한 전압·전류 측정은 4 단자법을 이용하였으며, 사고 주기는 5.5 주기이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사고전류 제한 능력

전류제한능력 분석은 사고 전류를 인가 후 YBCO@CC에서 측정된 한류 전류를 각각 1주기 (사고 발생 후 첫 피크 전류 제한), 3주기 (차단기 동작 이전의 전류제한), 5주기 (차단기 동작 시점의 전류제한)에서 비교 고찰하였다.

그림 4의 (a)와 (b)는 인가전압에 따른 발생한 사고전류 인가 시 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC에서 측정된 순시전류 그래프이다. 이 그래프에서 1/2주기, 3주기, 5주기 시점의 peak값을 측정하였다. 이 값을 그림 5의 (a)와 (b)에 인가전압에 따라 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC에서 측정된 피크전류를 나타내었다. 각각의 측정된 피크전류값은 계산을 통하여 전류제한율로 나타내었다. 전류제한율은 인가 사고전류에서 피크 전류값을 뺀 후, 인가사고전류로 나눈 후 백분율로 나타낸 값이다.

그림 5를 살펴보면 1주기 시 YBCO@Cu CC에서 측정된 한류전류는 각각 378.71 , 617.74 , $846.67 A_{peak}$ 이며, 이때 전류제한율은 11.51 , 16.75 , 25.46% 이다.

Fig. 4. Current curve of YBCO CC with the different stabilization layer (a) YBCO@Cu CC, (b) YBCO@Sus CC.

YBCO@Sus CC에서 측정된 한류전류는 1주기에서 각각 318.00 , 416.68 , $506.74 A_{peak}$ 이고, 이때 전류제한율은 각각 25.70 , 43.84 , 그리고 55.39% 이다. 3주기 시 YBCO@Cu CC에서 측정된 한류전류는 각각 288.01 , 354.65 , $352.03 A_{peak}$ 이고, 이때 전류제한율은 각각 32.70 , 52.20 , 69.01% 이다. YBCO@Sus CC에서 측정된 한류전류는 181.31 , 256.02 , $315.31 A_{peak}$ 이고, 이때 전류제한율은 각각 57.63 , 65.49 , 72.24% 이다. 마지막으로 5주기의 경우 YBCO@Cu CC에서 측정된 한류전류는 각각 246.72 , 267.40 , $257.29 A_{peak}$ 이고, 이때 전류제한율은 각각 42.35 , 63.69 , 77.35% 이다. YBCO@Sus CC에서 측정된 한류전류는 166.65 , 226.58 , $269.38 A_{peak}$ 이고, 이때 전류제한율은 각각 61.06 , 69.46 , 그리고 76.28% 이다.

결과로부터 사고전류의 크기가 증가할수록 피크점에 도달하는 시간이 빨라지고 있으며, 이는 전류제한이 빠르고 크게 이루어짐을 의미한다. 또한 초전도

Fig. 5. Current-limiting properties curve of YBCO CC with the different stabilization layer (a) YBCO@Cu CC, (b) YBCO@Sus CC.

선재 측면에서 보면 비저항 클수록 전류제한 특성이 우수해진다. 따라서 본 연구에서 사용된 초전도 선재를 비교해 보면, 스테인레스를 안정화 층으로 사용한 선재가 전류제한 성능에서 우수한 특성을 보이고 있다.

3.2 안정성

사고전류 제한형 초전도케이블의 안정적 동작을 위한 온도 영역 구분은 그림 6과 같이 소손가능 영역과 준안정 영역으로 나뉜다. 기존 초전도케이블은 무손실 전력전송이 주목적이며, 사고전류 제한 기능은 포함되어 있지 않다. 본 논문에서는 제안하는 사고전류 제한형 초전도케이블은 별도의 추가 장치 없이 병렬로 연결된 구리 포머와 초전도 선재간의 저항 관계를 이용하여 초전도 선재의 전류제한 능력을 안정 범위 내에서 최대로 끌어 올리는 것이다. 따라서 그림 6에서

Fig. 6. Schematic of stability.

Fig. 7. Voltage curve of YBCO CC with the different stabilization layer (a) YBCO@Cu CC, (b) YBCO@Sus CC.

보듯 초전도 선재는 사고전류 통전 주기 동안 180 K 이하인 준안정 영역에서 동작해야 한다. 초전도체를 이용한 전류제한소자의 성능평가 시 사용된 지표 중 온도 부분은 안정 영역, 준안정 영역과 열폭주 상태에 도달한 위험 영역으로 나뉜다. 사고전류 제한형 초전도 케이블은 초전도체의 퀠치 저항을 증가시켜 사고전류를 제한함과 동시에 안정적으로 동작해야 한다.

Fig. 8. Resistance properties curve of YBCO CC according to the applied fault current ($15 V_{rms}/428 A_{peak}$, $25 V_{rms}/742 A_{peak}$, $35 V_{rms}/1,136 A_{peak}$) (a) YBCO@Cu CC, (b) YBCO@Sus CC.

이에 초전도 전류제한 소자의 온도 지표 중 안정 부분과 준안정 부분을 동작 범위로 설정하였다 [7].

그림 7의 (a)와 (b)는 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC에서 인가전압에 따른 사고전류를 인가 시 측정된 전압 그래프이다. 실험에서 4단자법을 통해 측정된 그림 4의 전류와 그림 7의 전압을 이용하여 저항을 산출하였다. 그림 8의 (a)와 (b)는 YBCO@Cu CC와 YBCO@Sus CC에서 인가전압의 크기에 따라 측정된 저항 그래프이다. YBCO@Cu CC의 경우 그림 1에 따라 환산된 180 K시 저항은 26 mΩ이다. 35 $V_{rms}/1,136 A_{peak}$ 를 인가한 경우 반주기가 되기 전에 180 K를 넘어 열폭주 상태에 진입한 것으로 고찰되었다. 가장 작은 사고전류인 15 $V_{rms}/428 A_{peak}$ 를 인가한 경우도 3주기가 넘어서면서 180 K에 도달하였고, 5주기 시 225 K까지 상승하였다. 반면 YBCO@Sus CC는 15 $V_{rms}/428 A_{peak}$, 25 $V_{rms}/742 A_{peak}$, 35 $V_{rms}/1,136 A_{peak}$ 의 사고전류를 인가한 경우 발생저항에 의한 5주기 시 온도

분포는 각각 99 K, 150 K, 195 K이다. 35 $V_{rms}/1,136 A_{peak}$ 의 사고전류를 인가한 경우를 제외한 나머지 경우에는 사고주기 동안 준안정 영역 내에서 사고전류를 한류하며 동작하고 있는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 전류제한 능력을 갖는 초전도 케이블에 적합한 초전도 선재 선정을 위해 초전도 선재의 전류제한 능력과 안정성을 비교 고찰하였다. 평가 항목인 전류제한능력과 안정성에서 비저항이 큰 선재에서 우수한 특성을 보였다. 이는 통전능력과 전류제한 능력에서 비저항이 큰 초전도 선재가 사고전류 통전 시 보다 나은 특성을 보이고 있음을 의미한다.

본 논문의 결과는 사고전류 제한형 초전도케이블 설계 시 초전도 선재와 구리 포머 간의 저항 관계를 설정하는 중요 자료로 활용되어질 것이다.

감사의 글

“이 논문은 2013년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2013R1A1A2006825).”

REFERENCES

- [1] J. H. Kim, and K. W. Lee, *Electrical Journal*, **257**, 19 (1998).
- [2] O. B. Hyun, 2012 Green Technology Forum, *SFCL Development and Application*.
- [3] J. Maguire, D. Folts, J. Yuan, D. Lindsay, D. Knoll, S. Bratt, Z. Wolff, and S. Kurtz, *IEEE Tran. Appl. Supercond.*, **19**, 1740 (2009).
- [4] H. I. Du, M. J. Kim, S. G. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, and B. S. Han, *J. KIEEME*, **22**, 854 (2009).
- [5] H. I. Du, M. J. Kim, C. R. Park, S. G. Du, Y. J. Kim, and B. S. Han, *J. KIEEME*, **21**, 950 (2008).
- [6] S. W. Yim, H. I. Du, H. R. Kim, O. B. Hyun, S. H. Sohn, J. H. Lim, S. D. Hwang, S. Y. Oh, and B. S. Han, *Superconductivity and Cryogenics*, **10**, 10 (2008).
- [7] H. I. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, B. S. Han, S. S. Song, M. J. Kim, and S. C. Han, *IEEE Tran. Appl. Supercond.*, **20**, 1238 (2010).