Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 22, No. 10, p. 854, October 2009.

논 문 22-10-10

YBCO Coated Conductor를 이용한 저항형 전류제한기의 인가전압 증가에 따른 전류제한 특성

Current Limiting Characteristics according to Applied Voltage Increase of Resistive-type SFCL using YBCO Coated Conductor

두호익[1,a], 김민주[1], 두승규[1], 김용진[1], 이동혁[1], 한병성[1]
(Ho-ik Du[1,a], Min-Ju Kim[1], Seung-Gyu Doo[1], Yong-Jin Kim[1], Dong-Hyeok Lee[1], and Byoung-Sung Han[1])

Abstract

The YBCO coated conductor is an important element that forms the superconducting power equipment. The first advantage of applying YBCO coated conductor to superconducting power equipment is that it can effectively addresses the normal and fault currents using less quantity of wire than when using Bi tape due to its high critical current density. Second, it can limit the fault current fast because its index value is high. so that the resistance can be produced fast when it is applied to the superconducting current limiting element. Third, the type of stabilization layer that surrounds the YBCO superconductor is selectable and the magnitude of the resistance that is produced from quenching can be adjusted. This study researched into the manufacture of current-limiting element of using YBCO coated conductor, into the characteristics of current limiter that considered by combining the manufactured element with the resistive-type superconducting fault current limiter.

Key Words : YBCO coated conductor, Resistive-type SFCL, Current limiting

1. 서 론

초전도 전류제한기의 개발은 우수한 특성을 갖는 전류제한 소자의 제작에서부터 시작한다고 말할 수 있다. 그간 초전도 전류제한 소자로 사용되어 온 BSCCO 선재 및 벌크, YBCO 박막은 각각의 소자가 갖는 문제점으로 인해 실계통 적용을 위한 연구 개발이 한계에 이른 상황이다. 반면 2세대 선재로 명명되어지는 YBCO coated conductor는 높은 인덱스 값을 가지고 있어 사고전류 통전 시 소자에서 발생하는 저항의 발생 속도가 빠르기 때문에 사고 전류를 효과적으로 제한할 수 있다[1,2]. 또한, 전류제한소자 제작에 필수적인 기계적 변형에 따른 임계특성 저하가 작고, 임계전류 밀도 면에서도 우수한 특성을 확보하고 있다. 특히, YBCO 초전도체를 둘러싸고 있는 안정화 층의 종류를 선택할 수 있기 때문에 비저항성이 큰 소재를 사용할 경우 사고전류 통전 시 발생 저항을 크게 할 수 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 비저항 값이 큰 stainless steel을 안정화 층으로 갖는 YBCO coated conductor를 이용하여 전류제한 소자를 제작하였다. 제작된 전류 제한소자를 3상 저항형 전류제한기로 적용하여 인가전압 증가에 따른 전류제한 특성을 고찰하였다. 시험에 인가된 전원 전압은 200 V_{rms}에서 360 V_{rms}까지 40 V_{rms} 간격으로 변화하여 인가하였고, R상 기준 0°, 45°, 90°에서 사고를 모의하였으며, R상 1선 지락사고 시 전류제한 특성을 살펴보았다. 이를 바탕으로 YBCO coated conductor를 이용한 전류제한소자의 전류제한 적용 성능을 고찰하고자 한다.

1. 전북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기공학전공
(전주시 덕진구 덕진동 664-14)
a. Corresponding Author : dudoc@chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2009. 7. 16
1차 심사 : 2009. 8. 12
심사완료 : 2009. 9. 9

표 1. YBCO coated conductor 사양.
Table 1. YBCO coated conductor property.

YBCO coated conductor(Producer : AMSC)	
Stabilizer	Stainless steel
Length of pattern pattern/width/thickness	400 ㎝/4.4 ㎜/0.2 ㎜
Stabilizer layer/Over layer/Substrate layer	20 ㎛/Ag 2 ㎛/Nickel 50 ㎛
I_C & T_C	70 A(1 ㎶/cm, @77K) 90 K
Rated Voltage	0.6 V/㎝ (@300 K)
Resistance	3.7 mΩ/㎝ (@300 K)

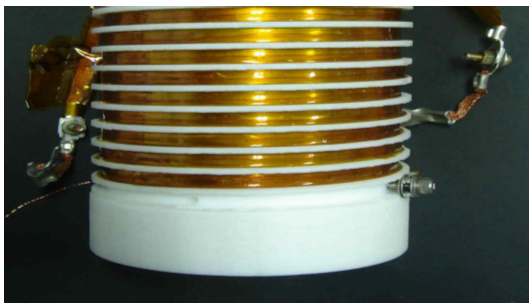

그림 1. 선재 결선도.
Fig. 1. Schematic diagram of the YBCO coated conductor.

2. 실 험

표 1은 stainless steel을 안정화 층으로 갖는 YBCO coated conductor는 미국 AMSC 사에서 제작한 coated conductor로서 70 A의 임계전류, 90 K의 임계온도와 0.6 V/cm의 전압 등급을 갖는다. 구리를 안정화 층으로 사용한 선재와 마찬가지로 금속 기판 위에 YBCO 초전도체가 증착되었으며, 통전 시 안정성 향상을 위해 은이 초전도 층 위에 피복되어진 형태이다. 또한 안정화재로서 20 ㎛의 stainless가 도금되어 선재의 표면은 완전한 은색을 띄는 형태이다.

스테인레스 스틸 안정화 층을 갖는 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 stainless steel을 안정화 층으로 갖는 박막형 선재는 90 K의 임계온도에서 1.2276 mΩ/㎝가 측정되었으며 상온인 300 K에서의 선재 저항은 3.6676 mΩ/㎝로 증가된 값이 측정 되었다. 아울러, 임계온도를 초과한 초전도체의 저항이 금속 안정화재의 저항보다 훨씬 크다는

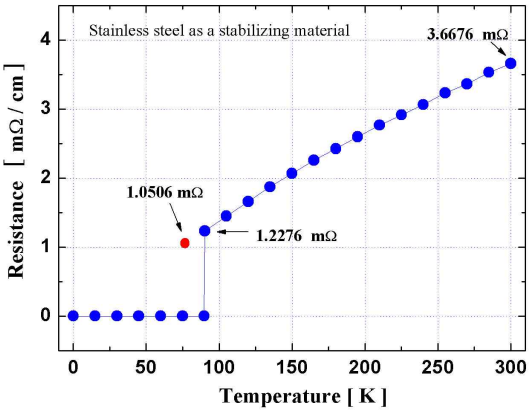

그림 2. YBCO coated conductor의 임계온도에 따른 저항 특성 곡선.
Fig. 2. Resistance characteristic curve by temperature YBCO coated conductor.

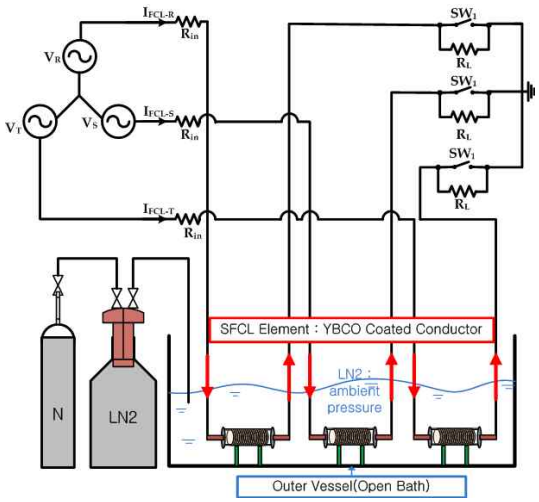

그림 3. 시험 장치 구성도.
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental circuit.

것을 고려하면 그림 2로부터 금속 피복재의 저항 변화를 구할 수 있다. 그림에 제시된 바와 같이 피복재 저항이 온도에 따라 선형적으로 감소한다고 가정하였을 때, 77 K에서의 피복재 저항은 1.0506 mΩ/㎝가 될 것으로 계산되었다.

그림 3은 시험 장치 구성도이다. 사고 전류에 대한 소자의 보호와 더불어 통전 전류를 조절하기 위해 0.5 Ω의 기준저항(R_0)을 사용하였다. 아울러

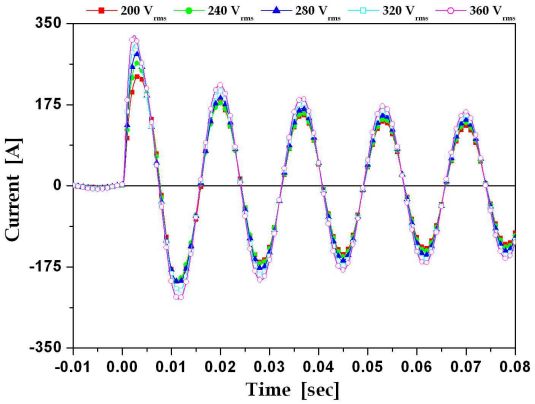

그림 4. 인가전압 변화에 따른 전류 특성 (R상 기준, 사고 각 0°, 1선 지락사고)

Fig. 4. Current characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 0°, single line-to-ground fault).

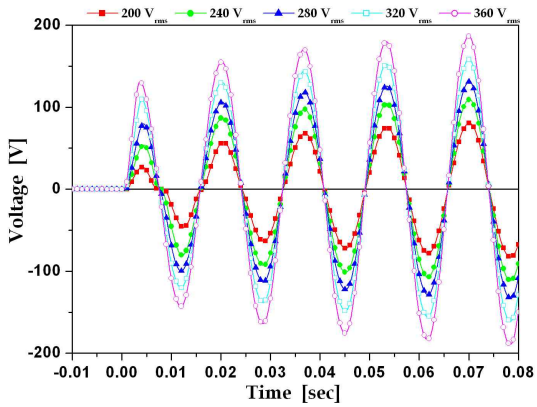

그림 5. 인가전압 변화에 따른 전압 특성 (R상 기준, 사고 각 0°, 1선 지락사고).

Fig. 5. Voltage characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 0°, single line-to-ground fault).

1선 지락사고는 그림 3의 R상 SW_1을 사고 발생 시 폐로하여 모의하였다. 사고 모의 주기는 5.5 주기로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 R상 1선 지락 사고 시 인가전압에 따른 사고전류 파형을 나타낸다. 그림에서 각 인가전압에 따른 사고전류 첫 주기 피크는 각각 236.65, 265.10, 284.36, 305.09 그리고 324.34 A_{peak}이고, 전류제한율은 각각 27.54, 32.38, 37.81, 41.62 그리고 44.83%이다. 따라서 인가전압이 증가할수록 전류제한 특성이 우수해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 인가전압이 증가할수록 피크점에 도달하는 시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 인가전압에 증가에 함에 따라 전류제한이 빠르게 이루어짐을 의미한다. 그림 5는 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸 그림이다. 결과에서 인가전압의 크기가 작을 경우에는 초전도 소자 발생 전압의 첫 주기에서 전압이 0으로 지속적으로 나타나는 구간이 있는데, 이는 초전도 소자의 부분 퀜치에 의한 것으로 판단된다. 즉, 낮은 전압에서는 초전도 소자의 임계전류 값에 도달하지 못하기 때문에 초전도 상태와 상전도 상태가 공존하는 것으로 판단된다. 따라서 전류제한소자 제작 시 이러한 경향을 고려하여 전압 등급에 따른 적절한 소요 길이를 산정할 필요가 있다.

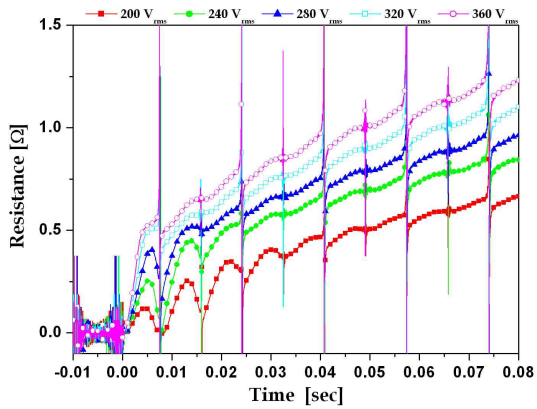

그림 6. 인가전압 변화에 따른 저항 특성 (R상 기준, 사고 각 0°, 1선 지락사고)

Fig. 6. Resistance characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 0°, single line-to-ground fault).

그림 6은 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타낸 그림이다. 그림에서 초전도 소자의 저항은 인가전압이 증가함에 따라 저항의 발생 속도가 빠르고 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 R상 기준 사고 각 45°일 때, 1선 지락사고 시 인가전압에 따른 사고 전류 파형을 나타낸다. 그림에서 각 인가전압에 따른 사고전류 첫

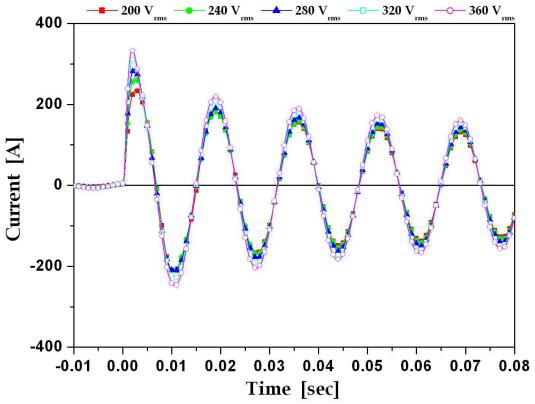

그림 7. 인가전압 변화에 따른 전류 특성 (R상 기준, 사고 각 45°, 1선 지락사고)

Fig. 7. Current characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 45°, single line-to-ground fault).

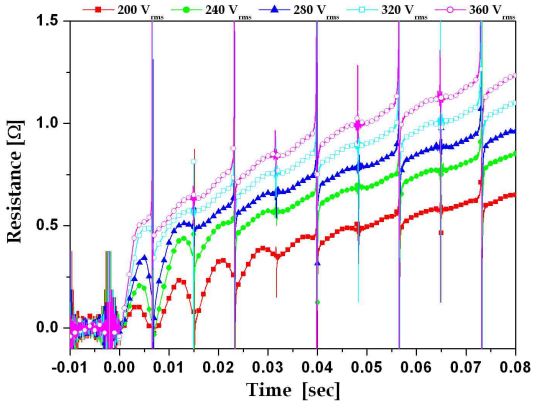

그림 9. 인가전압 변화에 따른 저항 특성 (R상 기준, 사고 각 45°, 1선 지락사고)

Fig. 9. Resistance characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 45°, single line-to-ground fault).

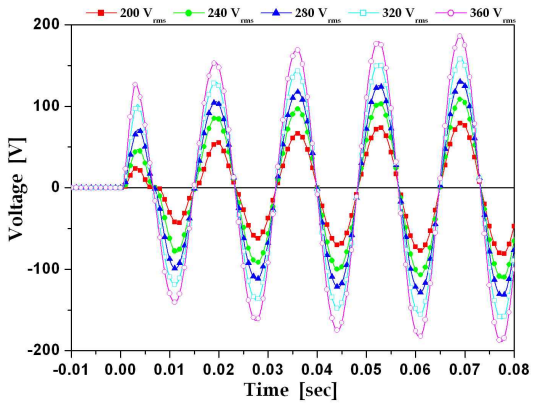

그림 8. 인가전압 변화에 따른 전압 특성 (R상 기준, 사고 각 45°, 1선 지락사고)

Fig. 8. Voltage characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 45°, single line-to-ground fault).

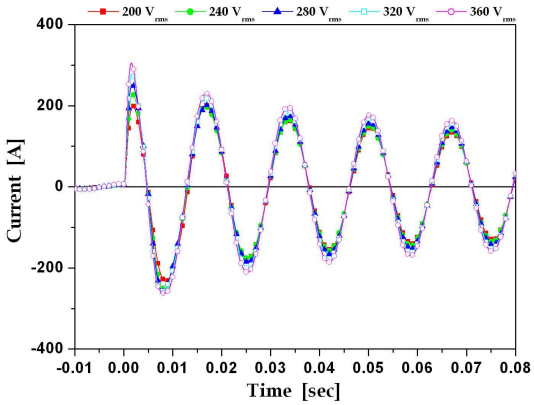

그림 10. 인가전압 변화에 따른 전류 특성 (R상 기준, 사고 각 90°, 1선 지락사고)

Fig. 10. Current characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 90°, single line-to-ground fault).

주기 피크는 각각 236.28, 266.05, 287.32, 311.58, 333.46 A_{peak}이고, 전류제한율은 각각 27.65, 32.12, 37.16, 40.37, 43.28%이다. 사고 각이 45°로 증가하여 사고전류의 상승속도가 증가하였을 경우에도 무리 없이 전류가 제한됨을 알 수 있다. 또한 인가전압이 증가하였을 경우에도 0° 사고와 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있다. 그림 8은 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸 그림이다. 사고 각 0°에서와 마찬가지로 인가전압의 크기가 작을 경우에 초전도 소자의 부분 퀜치가 일어났음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 그림 9의 200 V_{rms}와 240 V_{rms}, 280 V_{rms}을 인가한 첫 주기에서도 동일한 경향을 보인다.

그림 10은 R상 기준 사고 각 90°일 때, 1선 지락 사고 시 인가전압에 따른 사고전류 파형을 나타낸 결과이다. 그림에서 각 인가전압에 따른 사고

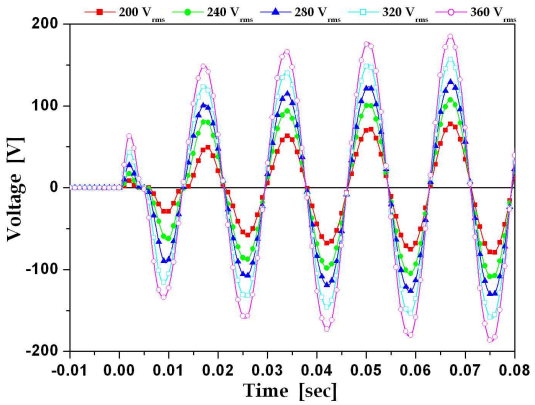

그림 11. 인가전압 변화에 따른 전압 특성 (R상 기준, 사고 각 90°, 1선 지락사고)

Fig. 11. Voltage characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 90°, single line-to-ground fault).

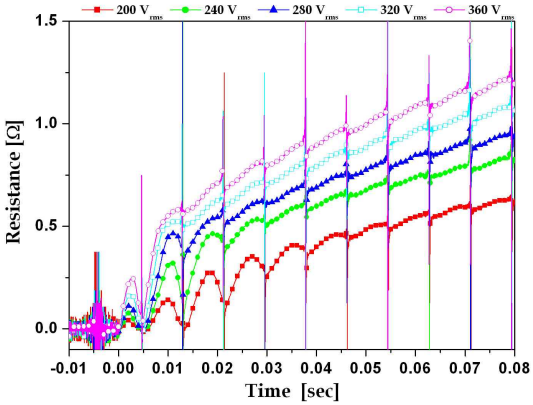

그림 12. 인가전압 변화에 따른 저항 특성 (R상 기준, 사고 각 90°, 1선 지락사고)

Fig. 12. Resistance characteristics according to applied voltage variation (R phase, fault angle 90°, single line-to-ground fault).

전류의 첫 주기 피크는 각각 199.32, 228.31, 252.28, 278.61, 304.95 A_{peak}이고, 전류제한율은 각각 38.97, 41.75, 44.83, 46.68, 48.13%이다. 사고 각이 90°로 증가하여 사고전류의 상승 속도가 45°인 경우 보다 빠름에도 불구하고, 사고전류 제한이 정상적으로 이루어지고 있으며, 인가전압이 증가할수록 0° 45° 사고 각의 경우와 마찬가지로 피크점에 도달하는 시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 그림 11은 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸 그림이다. 앞의 0°, 45° 사고 각에서 고찰하였듯이 인가전압의 크기가 작을 경우에 90° 사고 각에서도 초전도 소자의 부분 퀜치 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 12는 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타낸 그림이다. 그림에서 초전도 소자의 저항은 낮은 전압의 초기 주기에서 일시적으로 퀜치가 회복되는 경향을 보이며, 인가전압이 증가함에 따라 저항의 발생 경향은 0°, 45°와 동일하다.

4. 결 론

본 논문에서는 초전도전류제한기의 전류제한소자로 적용이 기대는 스테인레스 안정화 층을 갖는 YBCO coated conductor에 대한 전류제한 특성을 고찰하였다. 시험 조건은 1선 지락사고에 대해 각각 0°, 45°, 90° 사고조건에서 전압을 200 V_{rms} ~ 360 V_{rms}까지 증가시켜가며, 저항형 전류제한기로의 적응 특성을 고찰하였다. 결과로부터 사고 각 증가 여부와 관계없이 전원 전압이 증가할수록 전류제한 특성이 우수해지며, 피크점에 도달하는 시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 인가전압에 증가에 함에 따라 전류제한이 빠르게 이루어지는 것을 의미한다. 또한, 사고 각이 증가하여 사고 전류의 상승속도가 빨라진 경우에도 무리 없이 사고전류를 제한하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 특성으로부터 YBCO coated conductor는 인가전압 증가 및 사고 각의 증가 여부에 관계없이 안정적인 전류제한 성능을 보임을 확인하였다. 그러나 전류제한소자의 완전 퀜치를 유도하기 위해 전류제한기의 적용 전압 등급에 따른 적절한 소자의 길이를 산정해야 하며, 아울러 소자 길이 증가에 따른 완전 퀜치 방안에 대한 추가 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2007-521-D00177)의 지원받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] N. Amemiya, S. Murasawa, N, Banno, and K. Miyamoto, "Numerical modeling of superconducting wires for AC loss calculations", Physica C, Vol. 310, p. 16, 1998.

[2] T. Watanabe, Y. Shiohara, and T. Izumi, "Progress and future prospects of research and development on coated conductors in Japan", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, p. 2445-5-2451, 2003.

[3] 두호익, 김민주, 박충렬, 두승규, 김용진, 한병성, "안정화 층을 갖는 YBCO coated conductor와 BSCCO 선재의 결합이 과전류 통전 특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 21권, 10호, p. 950, 2008.