

직렬 연결된 두 코일과 YBCO Coated Conductor로 구성된 초전도 전류제한기의 권선방향과 권선 비에 따른 전류제한 특성 분석

이동혁¹, 두호익^{2,a}, 김용진¹, 한병성¹, 한상철³, 이정필³

¹ 전북대학교 전기공학과

² 전북대학교 전자정보고급인력양성사업단

³ 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소

Analysis on Current Limiting Characteristics of the SFCL with Magnetically Coupled Two Coils and YBCO Coated Conductor Due to the Winding Direction and the Turn Number' Ratio Between Two Coils

Dong-Hyeok Lee¹, Ho-Ik Du^{2,a}, Yong-Jin Kim¹, Byoung-Sung Han¹, Sang-Chul Han³, and Jeong-Phil Lee³

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

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

³ Korea Electrical Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

(Received August 25, 2010; Revised October 19, 2010; Accepted December 17, 2010)

Abstract: The ongoing Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) development mainly has focused on the application of commercialization and power system through combining with normal-conducting device, moving away from current-limiting method, which is solely dependant on the existing superconductor. Compared to the structural development above, on the other hand, the research on applying superconducting current-limiting element to SFCL, the heart of SFCL, still has a lot left to do, apart from traditional resistive type SFCL. In this study, we looked into the current limiting characteristic of SFCL using core and coil. YBCO coated conductor with stainless steel stabilizer layer was verified by the excellent of current-limiting element of the resistive type SFCL that has a high J_c and index as well as being superior in mechanical property. Also, we study temperature characteristics and resistance characteristics, max voltage, response time and current-limiting ability that can be an indicator as current-limiting element while applying to superconducting current-limiting element caused by variation of winding direction, winding ratio of SFCL using core and coil.

Keywords: YBCO coated conductor, Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Winding ratio

1. 서론

지속적인 전력수요의 증가로 인한 전력 계통 설비

의 증설은 계통 사고 시 큰 사고 전류를 유발하게 되는 문제점을 안고 있다. 현재 사고 전류 대처 방안으로 모선분리, 파워퓨즈 등 여러 가지 해결책이 모색되고 있으나 이들은 전력 계통의 경제성 및 안전성, 신뢰성을 저하 시키고 있기 때문에 새로운 기술적 대

안이 절실히 요구되고 있는 실정이다 [1]. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위한 초전도전류제한기의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [2]. 현재 초전도전류제한기의 개발은 기존의 초전도체에만 의존한 전류제한 방식에서 탈피하여 상전도 기기와의 결합을 통한 상용화 및 전력 계통에 적용을 위한 연구가 주를 이루어 진행되고 있다 [3,4]. 반면 위와 같은 구조적인 개발에 비해 초전도 전류제한기의 핵심이라 할 수 있는 초전도 전류제한 소자의 초전도전류제한기 적용에 대한 특성 연구는 기존의 저항형 초전도전류제한기 이외에는 미비한 상황이다 [5,6]. 따라서 본 연구에서는 상전도 기기와 결합된 초전도전류제한기의 한 예인 철심과 권선을 이용한 초전도전류제한기에 초전도 전류제한 소자의 적용에 따른 전류제한 특성을 살펴 보았다. 철심과 권선을 이용한 초전도 전류제한기는 정상운전 시 권선에 유도되는 전압이 없어 선로에 영향을 미치지 않으며 사고발생 시 초전도 소자의 켄치 발생에 따라 권선에 전압이 유기되어 임피던스를 발생시키고 사고 전류를 제한하게 된다 [7]. 전류제한 소자로는 높은 전류밀도와 인덱스 값을 갖고 기계적 특성이 우수하며 기존 연구를 통해 저항형 초전도전류제한기의 전류제한 소자의 가능성 측면에서 우수하다고 판단되는 스테인레스 스틸을 안정화층으로 갖는 YBCO박막형 선재 (이하 YBCO@스테인레스 스틸 박막형 선재)를 사용하였다 [8]. 아울러 철심과 권선을 이용한 초전도전류제한기의 권선 방향 및 권선 비를 변화시킴에 따른 초전도 전류제한소자의 적용 시 전류제한소자로서의 판단 지표가 되는 전류제한 능력 및 저항 발생 경향, 응답시간, 안정성을 위한 온도 발생 경향 및 최대 전압에 대해 살펴보았다.

2. 실험 방법

표 1에 본 실험에서 사용된 YBCO@스테인레스 스틸 박막형 선재 및 리액터의 제원을 나타내었다. 미국 AMSC 사에서 제작한 YBCO@스테인레스 스틸 박막형 선재는 금속기판위에 YBCO초전도체가 증착되었으며 통전 시 안정성 향상을 위해 은이 초전도층 위에 피복된 형태로 제작 되었다. 선재는 20 μm 두께의 스테인레스 스틸을 안정화 층이 증착되었으며 70 A의 임계전류, 90 K의 임계온도와 0.6 V/cm의 전압등급을 갖는다. 또한 철심과 권선을 이용한 초전도 전류제한기는 1차 측 권선을 63 턴, 2차 측 권선을

Table 1. Specification of the YBCO@Sus CC and Reactor.

YBCO@Sus coated conductor	
Producer	AMSC
Stabilizer	Stainless steel surround 20 μm
Substrate	Hastelloy 50 μm
Overlayer	Ag 2 μm
T_c	90 K
I_c	70 A (1 $\mu\text{N}/\text{cm}, @77\text{ K}$)
Rate voltage	0.6 V/cm (at 300 K)
Resistance	3.7 m Ω /cm (at 300 K)
Iron core (Laminated Si)	
Outer horizontal length	370 mm
Outer vertical length	350 mm
Inner horizontal length	230 mm
Inner vertical length	210 mm
Thickness	181 mm
Primary winding	
Self inductance	25.6 mH
Number of turns	63 turns
Secondary winding	
Self inductance	2.9 / 11.4 mH
Number of turns	21 / 42 turns

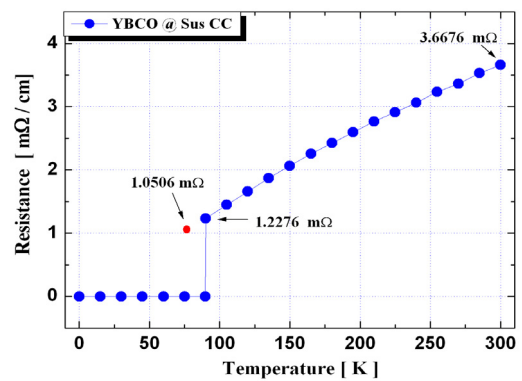


Fig. 1. Resistance characteristic curve by temperature of YBCO@Sus CC.

21 턴과 42 턴으로 달리하여 실험을 진행 하였다.

그림 1은 선재의 온도에 따른 저항 변화를 측정하여 나타낸 그래프이다. YBCO@스테인레스 스틸 박막형 선재의 저항은 90 K에서 1.2276 m Ω /cm, 상온인 300 K에서는 3.6676 m Ω /cm가 측정되었다. 이를 바탕으로 사고 발생 시 초전도 전류제한 소자의 저항발생을 측정하여 선재의 온도를 알 수 있으며 이는 초전도 전류제한 소자의 안정성을 판단할 수 있는 지표가

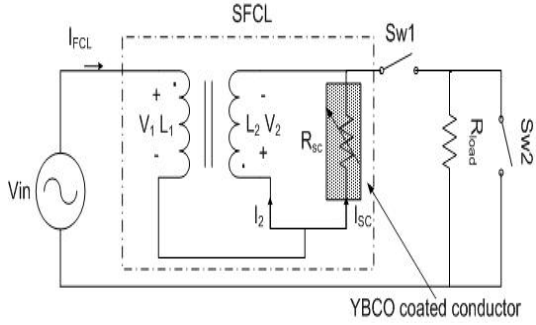


Fig. 2. Configuration of the experimental circuit.

된다.

그림 2는 실험장치 구성도를 나타낸다. 초전도전류제한기는 철심에 1차 권선과 2차 권선이 직렬연결 되어있으며 2차 권선과 초전도소자가 병렬로 연결된 구조를 갖는다. 초전도전류제한기의 1차 권선, 2차 권선 및 초전도 전류제한 소자의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{FCL}(I_1) = I_2 + I_{SC} \quad (1)$$

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 \pm j\omega M I_2 \quad (M = k\sqrt{L_1 L_2}, k = 1) \quad (2)$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 \pm j\omega M I_1 = I_{SC} R_{SC} \quad (3)$$

L_1 , L_2 는 1차 권선, 2차 권선의 자기 인덕턴스이며, M 은 상호인덕턴스를 나타낸다. + 부호는 1차측 권선과 2차 측 권선의 결선방향이 가극결선 시를 나타내고 - 부호는 감극결선 시를 나타낸다. 이 식들로부터 초전도 전류제한 소자에 흐르는 전류와 초전도전류제한기의 등가 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$I_{SC} = \frac{(j\omega L_2 \pm j\omega M) I_1}{R_{SC} + j\omega L_2} \quad (4)$$

$$Z_T = \frac{j\omega L_1 + j\omega L_2 \mp j\omega 2MR_{SC}}{R_{SC} + j\omega L_2} \quad (5)$$

식 (4)에서 +부호는 1차 측 권선과 2차 측 권선의 결선방향이 가극결선 시를 나타내고 -부호는 감극결선 시를 나타낸다. 반면에 식 (5)에서 -부호는 코일의 결선방향이 가극결선 시를 나타내고 +부호는 감극결선 시를 나타낸다.

사고를 모의하기 위해 Sw1과 Sw2를 순차적으로

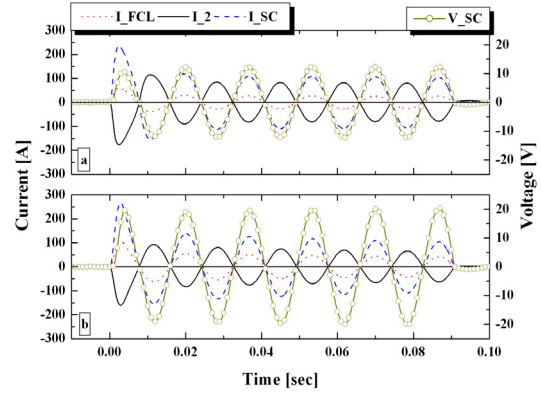


Fig. 3. Voltage-current characteristics in case of the additive polarity winding. (a) N1:N2=63:21, (b) N1:N2=63:42.

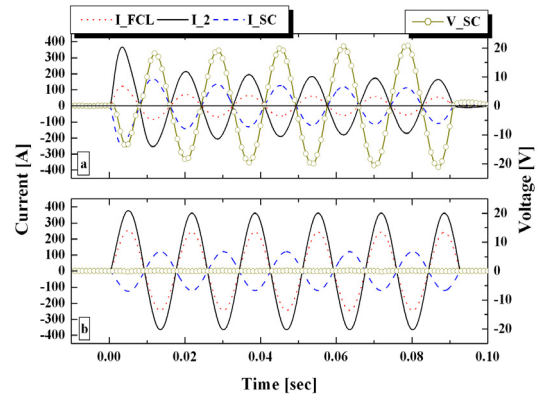


Fig. 4. Voltage-current characteristics in case of the subtractive polarity winding. (a) N1:N2=63:21, (b) N1:N2=63:42.

동작시켰으며 초전도전류제한기의 1차 측과 2차 측 권선의 결선을 각각 가극 3:1 권선비와 3:2 권선비, 감극 3:1 권선비와 3:2 권선비로 바꾸어 가며 동작시켰다. 사고 주기는 5.5 주기로 설정하였으며 R_{load} 은 40 Ω , V_{in} 에 45 V_{rms} 를 인가하여 구성된 회로에 1889 Apeak의 사고전류를 흐르게 하였다. 2.1 절의 내용을 입력하여 주십시오.

3. 결과 및 고찰

그림 3, 4는 각각 45 V_{rms} 인가 시 YBCO@스테인레스 스틸 박막형 선재를 적용시킨 초전도전류제한기의 권선의 결선 방향과 권선 비에 따른 동작 상태를

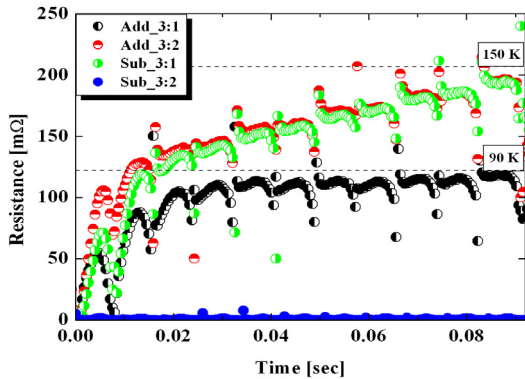


Fig. 5. Resistance characteristics of the YBCO@Sus CC according to connection type of the coil.

나타내는 그래프이다. 초전도 소자에서 발생 하는 전압과 제한된 전류 (I_{FCL})를 바탕으로 가극 및 감극 3:1, 3:2 권선비의 모든 경우에서 초전도 소자는 켄치가 발생하였음을 알 수 있으며 초전도전류제한기는 정상적으로 동작하고 임피던스를 발생하여 45 V_{rms} 인가에 따른 1889 A_{peak} 의 사고 전류를 I_{FCL} 의 크기 만큼 제한하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 사고 전류 통전 후 측정된 초전도 전류제한 소자의 저항 발생 경향과 5.5 주기 이후 도달 온도를 나타낸 그래프이다. 감극 3:2 권선비의 경우 초전도 소자의 저항 발생은 매우 작으며 가극 3:2 권선비와 감극 3:1 권선비의 경우 사고 주기가 증가함에 따라 지속적으로 저항이 증가하며 유사한 저항 발생 경향을 보인다. 또한 가극 3:1 권선비의 경우 사고 주기가 증가함에 따라 저항 발생이 더 이상 증가하지 않고 일정하게 포화되는 것을 알 수 있는데 이는 초전도전류제한기에 의해 제한되어진 전류가 초전도소자와 병렬연결 된 2차 권선에 분배되는 과정에 있어서 권선 비에 의한 2차 권선에 유도되는 전류에 의해 상대적으로 초전도소자에 흐르는 전류는 작게 되고 따라서 초전도소자의 저항증가는 이루어 지지 않는다고 판단된다. 이러한 권선 방향 및 권선 비에 따른 상이한 저항 발생 경향은 식 (5)에 나타낸 초전도전류제한기의 등가임피던스의 변화에 따라 달라지는 제한되는 사고전류 크기와 초전도 소자와 병렬로 연결된 2차 측 권선의 인덕턴스의 변화로 인해 초전도 소자에 흐르는 전류가 달라지기 때문이라고 판단된다. 한편 저항 발생 경향과 그림 1을 바탕으로 초전도 소자의 온도를 판단하였을 때 가극 3:1 권선비와 감극

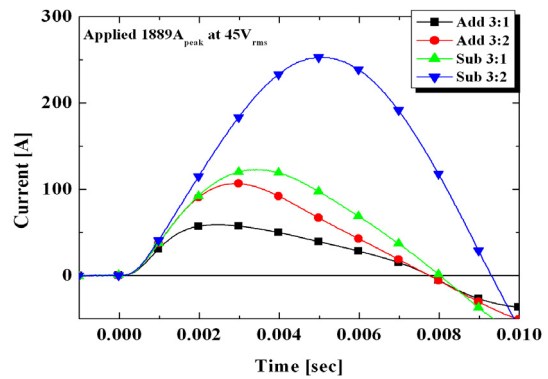


Fig. 6. Initial limiting current of SFCL according to connection type of the coil.

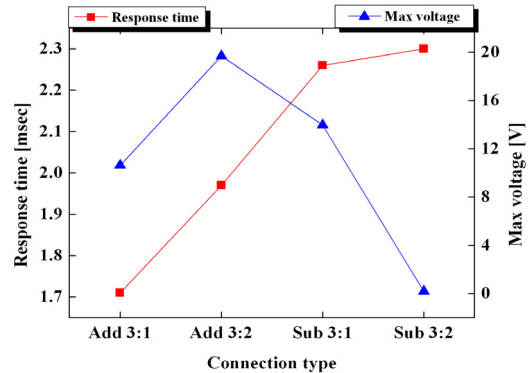


Fig. 7. Response time and max voltage of the YBCO@Sus CC according to connection type of the coil.

3:2 권선비의 경우 선재의 임계 온도인 90 K 이하로 유지되며 가극 3:2 권선비와 감극 3:1 권선비의 경우 선재의 온도가 150 K까지 도달함을 예상 할 수 있다. 따라서 가극 3:1 권선비와 감극 3:2 권선비의 경우 초전도 소자의 온도가 낮게 유지되어 보다 안정적 동작 할 수 있다고 사료된다.

그림 6은 1889 A_{peak} 의 사고전류 인가 시 초전도전류제한기의 임피던스 발생에 의해 제한되어진 초기제한전류 I_{FCL} 을 권선 방향 및 권선 비에 따라 나타낸 그래프이다. 초전도전류제한기에 의해 제한되는 전류 크기에 있어서 가극 3:1 권선비의 경우에 가장 크며 감극 3:2 권선비의 경우에 가장 작음을 알 수 있다. 이는 2차 측 권선 수 및 결선 방향이 변화함에 따라 식 (5)에서 나타내어진 초전도전류제한기의 등가임피던스의 크기가 달라지기 때문이다. 또한 이를

그림 5의 저항 발생 경향과 비교해 보았을 때 발생 저항 크기에 따라 제한되는 전류의 크기가 달라지는 기존의 저항형 초전도전류제한기와 달리 초전도 소자의 저항 발생의 경향에 전적으로 의지하지 않고 권선의 방향과 권선 비에 의해 전류제한의 크기가 달라진다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 권선 방향 및 권선 비에 따른 응답시간 및 최대전압 특성을 나타낸 그래프이다. 먼저 전류가 최대 제한전류 값에 도달하는 시점과 퀘치 시작 시점의 시간간격을 나타낸 응답시간은 가극 3:1 권선비의 경우가 가장 빠르고 감극 3:2 권선비의 경우 가장 느리다는 것을 알 수 있으며 이는 그림 6의 초기제한전류의 상승각을 비교함으로써도 확인 할 수 있다. 한편 사고발생 직후 초전도 소자의 양단에 맨 처음 발생하는 피크 전압을 나타내는 최대 전압 특성은 초전도 소자의 안정성을 평가하는 바탕이 되며 측정된 결과를 살펴 볼 때 모든 경우에서 초전도 소자는 전압 등급 내에서 안전하게 운전되고 있다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 권선 방향과 권선 비가 다른 철심과 권선을 이용한 초전도전류제한기에 스테인레스 스틸을 안정화층으로 갖는 YBCO박막형 선재를 적용하여 전류제한소자로서의 동작 특성을 분석하였다. 사고 발생 시 초전도 소자의 저항은 가극 3:2 권선비와 감극 3:1 권선비의 경우에서 가장 크게 발생하였으나 제한되는 전류의 크기는 가극 3:1 권선비의 경우에서 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 초기제한전류의 상승각 및 응답시간을 바탕으로 가극 3:1 권선비의 경우에서 보다 빠르게 사고전류를 제한한다는 것을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 선재의 온도 발생 경향과 최대전압을 분석한 결과 가극 3:2, 감극 3:1

권선비의 경우에 비해 가극 3:1, 감극 3:2 권선비의 경우에서 보다 안정성을 유지하며 전류제한 소자로서 동작할 수 있다고 판단되었다. 결과로부터 권선 방향과 권선 비를 달리하였을 때 가극 3:1 권선비로 결선된 초전도전류제한기에 적용 시 초전도 전류제한 소자의 동작이 보다 안정적이며 우수한 전류제한성능을 나타낸다고 사료된다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] J. H. Kim, and K. W. Lee, *Electrical Journal*, **257**, 19 (1998).
- [2] J. W. Jo, *The Electrical World*, **55**, 32 (2006).
- [3] H. M. Park, S. H. Lim, C. R. Park, H. S. Choi, and B. S. Han, *J. KIEEME*, **18**, 363 (2005).
- [4] S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond*, **17**, 1895 (2007).
- [5] D. K. Park, S. E. Yang, T. S. Yoon, M. C. Ahn, H. M. Kim, Y. S. Kim, J. W. Park, and T. K. Ko, *IEEE Trans. Appl. Supercond*, **17**, 1851 (2007).
- [6] H. I. Du, M. J. Kim, S. K. Doo, Y. J. Kim, D. H. Lee, and B. S. Han, *J. KIEEME*, **20**, 854 (2009).
- [7] H. S. Choi, N. Y. Lee, Y. H. Han, T. H. Sung, and B. S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond*, **18**, 737 (2008).
- [8] T. Watanabe, Y. Shiohara, and T. Izumi, *IEEE Trans. Appl. Supercond*, **13**, 2445 (2003).