

저항형 고온초전도 소자의 스위칭 동작을 이용한 브리지형 고온초전도 전류제한기의 동작 특성

論 文

53A-11-6

Operational Characteristics of Bridge Type SFCL Using Switching Operation of Resistive Type HTSC Element

林 成 勳* · 李 相 一** · 崔 孝 祥† · 韓 秉 誠***

(Sung-Hun Lim · Sang-Il Lee · Hyo-Sang Choi · Byoung-Sung Han)

Abstract - We proposed the bridge type superconducting fault current limiter(SFCL) using switching operation of high-Tc superconducting(HTSC) thin film. The proposed bridge type SFCL consists of HTSC thin film, a diode bridge and a dc reactor. The controller for the operation of an interrupter is required in the conventional bridge type SFCL to prevent the continuous increase of fault current after a fault happens. On the other hand, the proposed bridge type SFCL can limit the fault current without the interrupter and the controller for its operation by the resistance generated when the gradually increased fault current exceeds HTSC thin film's critical current. We calculated the time when the gradually increased fault current started to be limited by the resistance generated in HTSC thin film after a fault happened and confirmed that it could be dependent on the amplitude of source voltage. The experimental results well agreed with the calculated ones from simulation.

Key Words : Superconducting Faut Current Llimiter(SFCL), Bridge Type, Switching Operation, Resistive Type

1. 서 론

기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기는 고온초전도 코일의 인덕턴스에 의해 사고시 급격한 사고전류 증가를 억제할 수 있으며 고온초전도체의 켄치동작이 필요치 않은 장점 때문에 그동안 활발한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 사고 발생 후 지속적으로 증가하는 코일전류를 억제하기 위해서는 부가적인 차단기와 이를 동작시키기 위한 제어가 필수적으로 요구되고 있다[1-3].

본 논문에서는 저항형 고온초전도 전류제한기로 사용되고 있는 YBCO 고온초전도 박막의 스위칭동작을 이용한 브리지형 고온초전도 전류제한기를 제안하였다. 제안한 장치는 고온초전도 박막, 다이오드 브리지, dc 리액터로 구성되어 있으며 기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기의 구성요소인 차단기와 이의 동작을 위한 제어기대신 고온초전도소자를 이용한 구조를 갖는다. 즉, 기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기가 사고발생후 사고전류가 일정한 값에 도달되었을 때 차단기를 동작시켜 사고전류를 차단했던 방법과 달리 본 논문에서 제안한 장치는 사고발생 후 지속적으로 증가하는 사고전류가 저항형 고온초전도 소자의 임계전류값에 도달한 시점에서 켄치발생에 의한 스위칭 동작에 의해 제한되는 특징을

갖는다.

본 논문에서는 브리지형 고온초전도 전류제한기의 동작모드에 대한 분석과 전원전압크기에 따라 사고발생 후 코일전류의 변화를 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 저항형 고온초전도 소자를 도입한 브리지형 고온초전도 전류제한기의 실험을 통해 전원전압에 따른 사고전류 제한특성을 비교분석하였다.

2. 제안한 브리지형 고온초전도 전류제한기

2.1 구조

고온초전도 박막을 이용한 브리지형 전류제한기는 그림 1에 보인 바와 같이 다이오드 브리지, 고온초전도 박막과 DC 리액터로 구성된다. 그림에서 id, iL 및 RSC는 DC 리액터 전류, 전원단으로부터 부하로 흐르는 전류 및 고온초전도 박막의 저항을 나타낸다. DC 리액터는 고온초전도 선재대신에 공심코어를 이용하여 제작하였다. 사고발생후 증가된 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하는 시간을 계산하기 위해 DC 리액터와 다이오드 브리지만 구성된 제한기가 전원과 부하사이에 설치된 회로에 대한 분석을 수행하였다. 구성된 회로에 대한 분석은 충전모드와 방전모드로 나눌 수 있다.

2.2 동작모드 분석

충전모드에서 다이오드 D1과 D4 또는 D2와 D3를 통과하는 선로전류는 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

† 교신저자, 正會員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

* 正會員 : 全北大學校 工業技術研究센터 研究員 · 工博

** 正會員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 教授

*** 正會員 : 全北大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 4月 28日

最終完了 : 2004年 9月 15日

$$\sqrt{2} V \sin \omega t = r i_L + L \frac{d i_L}{d t} - (-1)^n 2 V_{DF} \quad (1)$$

여기서 $r = R_{In} + R_{load} + R_d + R_{SC}$, $L = L_d$, V_{DF} 는 다이오드의 순방향 바이어스 전압강하를 나타낸다. R_{In} , R_{load} 및 R_d 는 각각 전원단 저항, 부하저항 및 dc 리액터저항을 나타낸다. 또한, L_d 는 리액터의 인덕턴스를 나타낸다. 식 (1)의 미분방정식으로부터 선로전류 i_L 은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

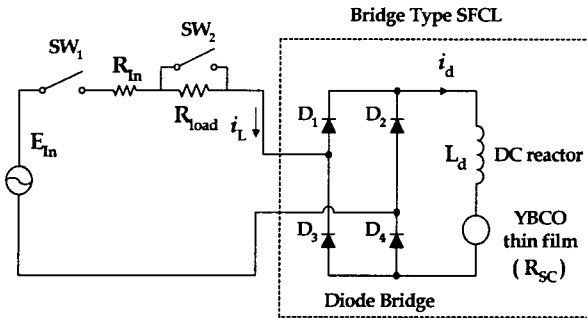


그림 1. 제안한 고온초전도 소자를 이용한 브리지타입 고온초전도 전류제한기 구조.

Fig. 1. Schematic diagram of bridge type SFCL using HTSC thin film.

$$i_L = e^{-\frac{t}{L}} \left(I_0 + \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin \phi - \frac{(-1)^n 2 V_{DF}}{r} \right) + \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t - \phi) + \frac{(-1)^n 2 V_{DF}}{r} \quad (2)$$

여기서 $Z = \sqrt{r^2 + \omega L^2}$, $\tan \phi = \omega L / r$, I_0 는 충전모드 초기전류를 나타낸다. 리액터 전류 i_d 는 $(-1)^{(1-n)} i_L$ 와 같다. 방전모드에서의 선로전류와 리액터전류를 포함한 회로방정식은 식 (3), (4)와 같다.

$$\sqrt{2} V \sin \omega t = r i_L + L \frac{d i_L}{d t} \quad (3)$$

$$L_d \frac{d i_d}{d t} = -2 V_{DF} \quad (4)$$

식 (3), (4)의 방정식으로부터 선로전류 (i_L), 리액터전류 (i_d)는 식(5), (6)과 같이 구할 수 있다.

$$i_L = e^{-\frac{t}{L}} \left(I_1 + \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\phi) \right) + \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t - \phi) \quad (5)$$

$$i_d = I_1 - \frac{2 V_{DF}}{L_d} t \quad (6)$$

여기서 I_1 은 방전모드의 초기 선로전류와 리액터전류를 나타낸다. 각 모드에 대한 회로방정식으로부터 사고발생 후 고온초전도 소자의 켄치 발생시간을 계산할 수 있다. 즉, 사고 후 리액터를 도통하는 전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하는 시점이 고온초전도 소자의 켄치 발생시간에 해당된다.

2.3 제한기 구성요소 제작

제한기 구성요소로서 스위칭 동작을 위한 고온초전도 소자는 2인치 지름의 Al_2O_3 기판위에 300 nm의 두께로 증착된 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)를 이용하였다. 사고시 주울열 발생에 따른 열분산을 위해 YBCO층위에 200 nm 두께로 금코팅을 실시하였으며, 식각공정을 통해 폭 2 mm, 총길이 420 mm로 14개의 라인을 갖는 패턴을 형성시켰다(그림 2). 사고발생시 각 라인의 켄치발생을 조사하기 위한 전압탐을 동시에 형성시켰으며 본 실험에서는 그림 2에 표기한 것처럼 번호를 붙인 단자의 전압을 측정하여 켄치특성을 분석하였다. 제작한 소자의 임계전류값은 그림 3에서 보는 바와 같이 약 12.5 A 값을 보여주었다.

DC리액터는 고온초전도 코일대신에 구리동선을 이용하여 설계한 보빈에 권선하여 제작하였으며 제작한 고온초전도 소자와 DC리액터의 사양을 표 1에 나타내었다. 모의사고실험을 위한 선로저항 (R_{In})은 제한기가 설치되지 않은 경우 사고전류계산을 용이하게 하기 위해 1Ω 로 설정하였으며, 부하저항 (R_{load})은 50Ω 로 설정하였다. 이때, 사고조건은 0° 사고각에서 5주기 동안 발생시켰다.

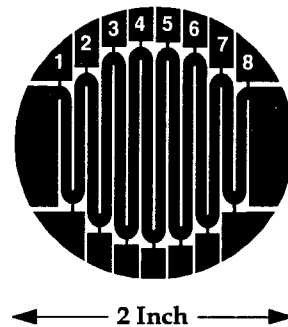


그림 2. 고온초전도 소자 패턴.

Fig. 2. Pattern of an HTSC element.

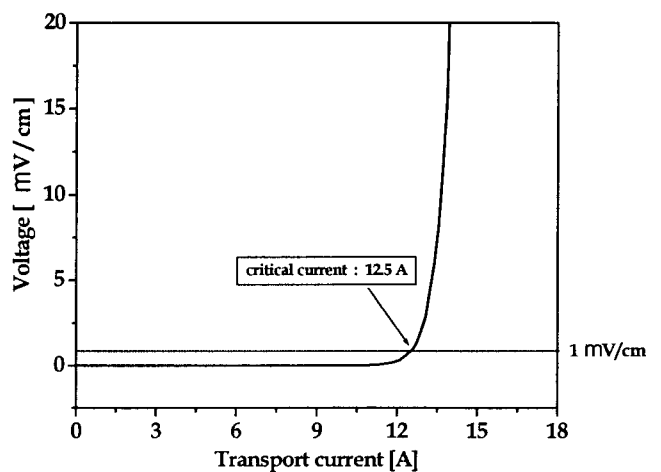


그림 3. 고온초전도 소자의 임계전류.

Fig. 3. Critical current of an HTSC element.

표 1. DC 리액터 및 고온초전도 소자 사양

Table 1. Specification of a DC reactor and an HTSC element

DC Reactor	Size	Unit
Inner Radius	40	mm
Outer Radius	45	mm
Height	340	mm
Number of Turns	2000	Turns
Self Inductance(Ld)	149	mH
Resistance(Rd)	1.5	Ω
HTSC Thin Film (YBCO)	Value	Unit
Critical Temperature	87	K
Critical Current	12.5	A
Total Meander Line Length	420	mm
Line Width	2	mm
Thin Film Thickness	0.3	μm
Gold Layer Thickness	0.2	μm

3. 결과 및 고찰

그림 4는 YBCO 고온초전도 소자가 없는 브리지형 전류제한기의 총, 방전모드의 미분방정식으로부터 유도한 식을 이용하여 전원전압크기에 따라 계산한 리액터전류파형을 보여준다. 전원전압이 50, 70, 90, 110 V_{rms}에서 사고발생 후 YBCO 박막의 임계전류값에 도달되는 시간은 각각 150 ms, 97 ms, 86 ms, 78 ms로 전원전압 크기가 증가함에 따라 도달되는 시간이 감소됨을 관찰할 수 있으며 그림 4로부터 사고발생 후 고온초전도 소자의 켄치 발생시간을 예측할 수 있다. 이는 기존의 브리지형 전류제한기의 경우 사고전류가 설정된 값에 도달할 경우 이를 감지하여 차단기가 동작하기 전까지의 시간에 해당된다.

전원전압크기에 따른 저항형 스위칭 소자를 이용한 사고전류제한 특성을 그림 5에 나타내었다. 전원전압이 50 V_{rms}인 경우엔 사고발생 후 5주기 후에 고온초전도 소자는 켄치가 발생되지 않음을 볼 수 있으며 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 5주기사고동안 리액터에 흐르는 전류가 고온초전도 소자의 임계전류값을 넘지 않은 것에 기인함을 알 수 있다. 이때 전류제한 동작은, 코일의 인덕턴스에 의해 사고전류가 제한되는 것으로 고온초전도 코일을 이용한 기존의 브리지타입 전류제한기와 동일한 동작을 하게 된다. 반면에 전원전압이 70 V_{rms}로 증가한 경우엔 코일의 리액턴스에 의해 사고 발생 직후 급격한 증가 없이 점진적으로 증가하던 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 시점을 지나 소자의 저항이 충분히 증가된 후부터 감소되기 시작함을 관찰할 수 있다. 이때, 사고전류가 임계전류값에 도달되는 시점은 그림 3에서 계산한 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 한편, 전원전압크기가 70 V_{rms}인 경우에는 증가되었던 소자의 저항이 사고전류크기가 감소됨에 따라 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 소자에서 발생하는 주울열에 의한 열발생보다 액체질소에 의한 냉각이 지배적으로 작용하여 발생된 것으로 사료된다.

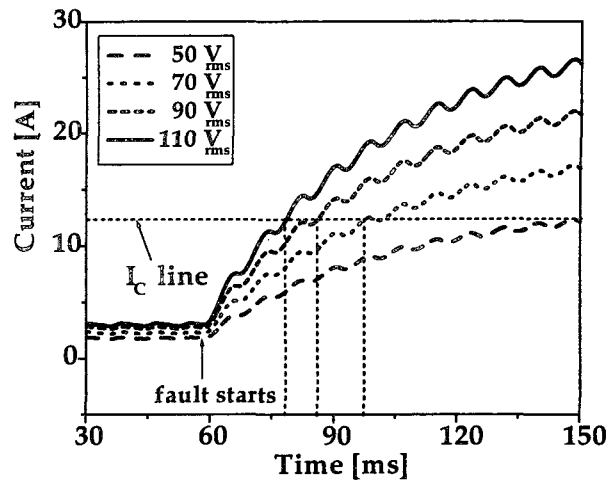
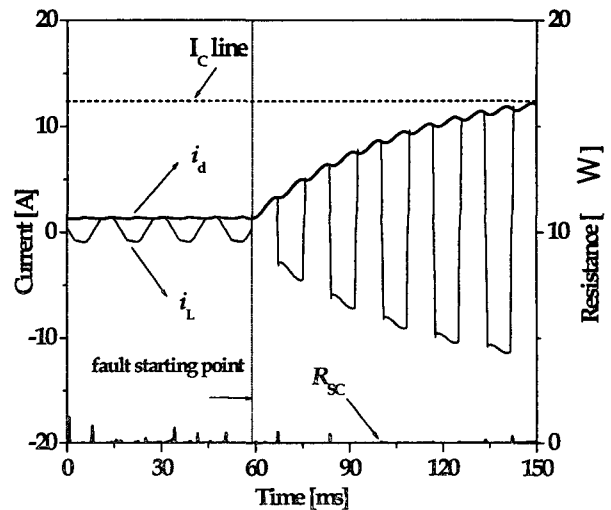


그림 4. 고온초전도 소자가 없는 브리지형 전류제한기의 각 모드의 식으로부터 구한 리액터 전류파형.

Fig. 4. Current waveforms of a bridge type SFCL without an HTSC element obtained from the equations of each mode.

전압전압이 90 V_{rms}, 110 V_{rms}로 증가함에 따라 사고발생 후 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 시간이 보다 감소함을 알 수 있으며 이때, 발생하는 고온초전도 소자의 저항크기는 전원전압크기가 증가함에 따라 보다 큰 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 전원전압이 90 V_{rms}인 경우엔 사고전류가 임계전류값을 넘는 시점에서 증가된 소자의 저항이 일정한 값에 머물고 있는 것을 관찰할 수 있으며 이는 앞서 언급한 소자에서 발생하는 주울열에 의한 열발생과 액체질소에 의한 냉각에 의해 회복과 천이를 반복한 결과로 생각된다. 반면에 전원전압크기가 110 V_{rms}인 경우엔 주울열 발생이 지배적으로 작용함에 따라 사고이후에도 소자의 저항이 증가되고 있는 것을 관찰할 수 있다.



(a)

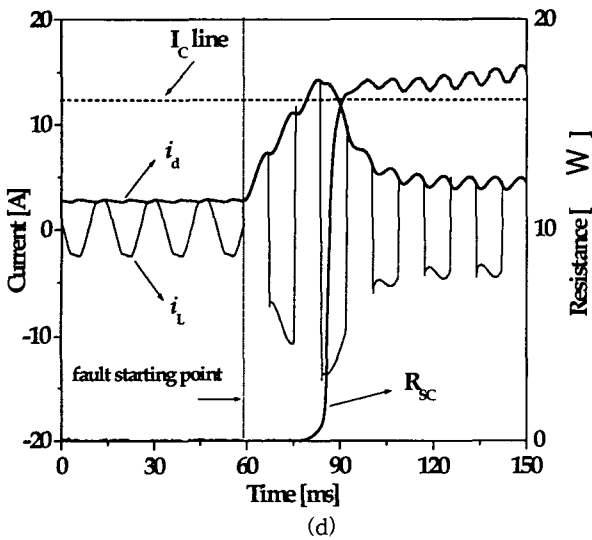
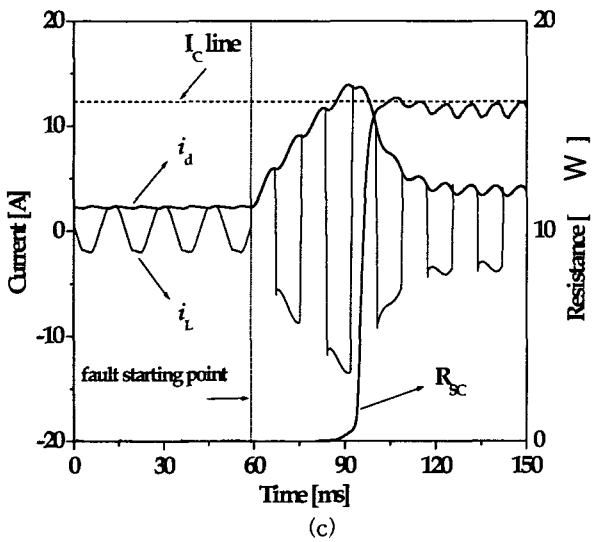
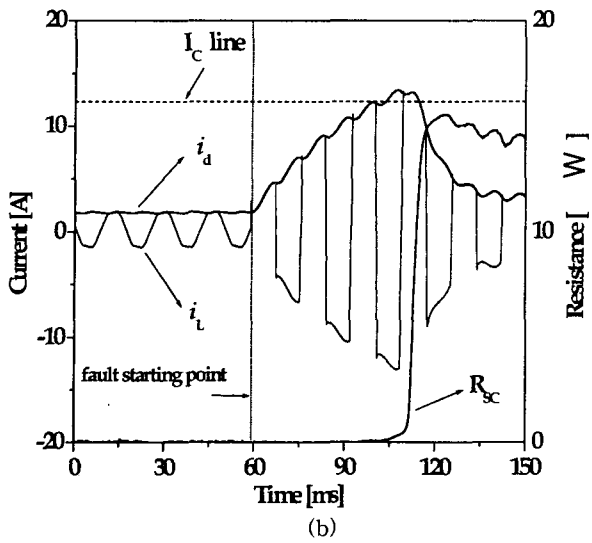


그림 5. 전원전압크기에 따른 전류제한 특성
(a) 50 Vrms (b) 70 Vrms (c) 90 Vrms (d) 110 Vrms

Fig. 5. Fault current limiting characteristic dependent on the amplitude of source voltage.
(a) 50 Vrms (b) 70 Vrms (c) 90 Vrms (d) 110 Vrms

그림 6은 사고발생 후 사고전류가 임계전류값에 도달되는 시간을 전원전압 크기에 따라 비교한 곡선으로 실험에서 분석한 바와 같이 임계전류에 도달되는 시간이 전원전압 크기에 따라 지수적으로 감소함을 확인할 수 있다. 전원전압크기에 따라 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류값에 도달 직후 소자 각 라인의 저항발생을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 소자바깥쪽에 있는 라인(R12, R78)보다 중앙에 있는 라인(R34, R45, R56)에서 먼저 퀘치가 발생하는 것을 볼 수 있으며 이는 소자의 바깥쪽이 액체질소에 의한 냉각효과가 크기 때문인 것으로 분석할 수 있다[4].

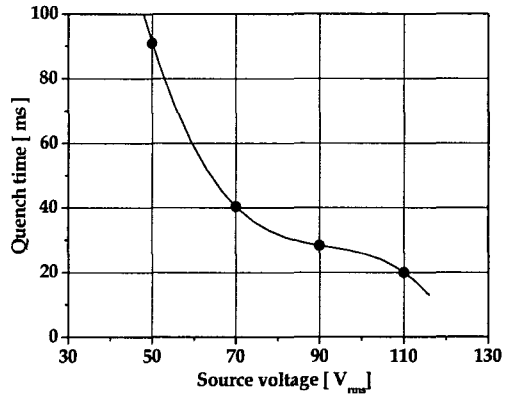
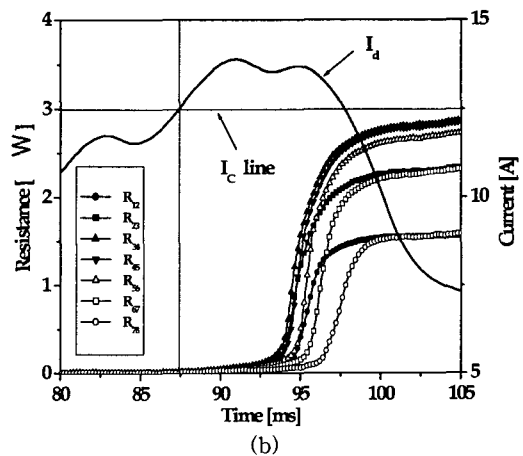
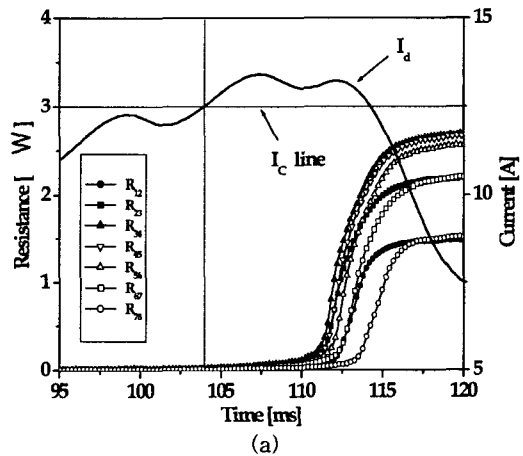


그림 6. 전원전압 크기에 따른 사고 후 고온초전도 소자의 퀘치 발생 시간.

Fig. 6. Quench time of HTSC element after a fault happens dependent on the amplitude of the source voltage.



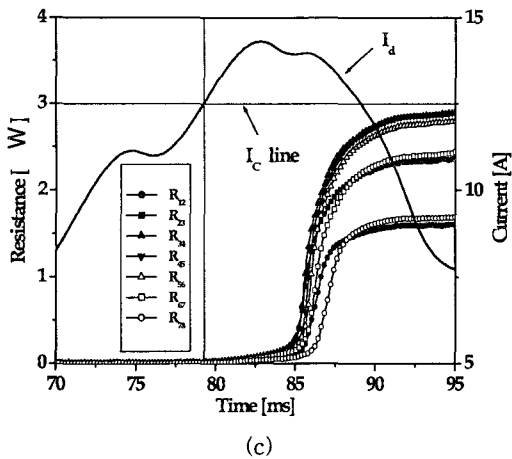


그림 7. 전원전압 크기에 따른 고온초전도 소자 각 라인의 저항곡선. (a) 70 V_{rms} (b) 90 V_{rms} (c) 110 V_{rms}
 Fig. 7. Resistance curves of each line in HTSC element dependent on the amplitude of source voltage.
 (a) 70 V_{rms} (b) 90 V_{rms} (c) 110 V_{rms}

사고전류가 소자의 임계전류를 넘은 뒤 소자의 저항발생에 의해 사고전류크기가 임계전류이하로 감소되기 전에도 소자의 모든 라인에서 저항이 일정값에 도달되지 않은 경우엔(그림 7(a), (b)) 사고 후에 소자의 저항이 지속적으로 증가되지 않지만, 모든 라인에서 발생된 저항이 일정값에 도달한 경우(그림 7(c))엔 사고발생 후 고온초전도 소자의 저항이 지속적으로 증가하는 것으로 분석할 수 있다. 즉, 사고가 발생되어 소자의 저항이 발생한 경우, 발생된 저항에 의해 소자에 흐르는 전류가 임계전류이하로 감소되었을 때 소자에서 발생하는 저항이 일정한 값 부근에 도달한 경우엔 소자의 저항이 지속적으로 증가됨을 앞의 그림 5의 분석을 통해 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 부가적인 차단기와 제어회로가 필요치 않은 고온초전도 소자를 이용한 브리지형 고온초전도 전류제한기의 동작모드에 대한 분석과 전원전압크기에 따른 사고발생 후 코일전류의 변화를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 또한, 저항형 고온초전도 소자를 도입한 브리지형 고온초전도 전류제한기의 실험을 통해 전원전압에 따른 사고전류 제한특성을 비교분석하였다. 전원전압이 증가함에 따라 고온초전도 소자의 임계전류값을 넘는 시점이 짧아짐을 확인할 수 있었다. 향후, 고온초전도 소자의 켄치특성을 반영한 모델링을 수행하고자 한다.

감사의 글

“이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음”

참 고 문 헌

[1] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, T. Honjo, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature super-

conducting coil”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, pp.940-943, June 1999.

[2] K. Yokoyama, T. Sato, T. Nomura, S. Fukui and M. Yamaguchi, “Application of single DC reactor type fault current limiter as a power source”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, pp.2106-2109, Mar. 2001.
 [3] Tsumotomu Hoshino, Khosru Mohammad Salim, Akio Kawasaki, Itsuya Muta, Taketsune Nakamura and Masato Yamada, “DC reactor effect on bridge type superconducting fault current limiter during load increasing”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, pp.1944-1947, Mar. 2003.
 [4] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, “Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin films”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, pp. 2414-2417, Mar. 2001.

저 자 소 개



임 성 훈(林 成 勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 9월 - 현재 전북대학교 공업기술연구소 연구원.
 E-mail : superlsh73@hanmail.net



이 상 일(李 相 一)

1942년 12월 20일생. 1967년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업(학사). 1985년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 조선대학교 전기공학과 교수.
 E-mail : siblee@chosun.ac.kr



최 효 상(崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 2003년- 현재 조선대학교 전기공학과 교수.
 E-mail : hyosang@chosun.ac.kr



한 병 성(韓 秉 誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이 파스퇴르대학 박사학위 취득. 1998년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소) 연구원. 2002년 9월 - 2004년 8월 전북대학교 공대 학장. 현재 전북대 공대 전기공학과 교수.
 E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr