

저항형 고온초전도 소자의 스위칭동작을 이용한 브리지타입 고온초전도 전류제한기의 동작 특성

임성훈¹, 박충렬², 이종화³, 고석철⁴, 박형민⁵, 최효상⁶, 한병성⁷

¹공업기술연구원, ²전북대학교, ³전북대학교 전자정보공학부, ⁴조선대학교 전기공학과

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

Sung-Hun Lim, Chung-Ryul Park, Jong-Hwa Lee, Seokcheol Ko, Hyo-Sang Choi, Byoung-Sung Han

Abstract - We proposed the bridge type fault current limiter(FCL) using switching operation of high-Tc superconducting(HTSC) thin film. The proposed bridge type FCL 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 FCL to prevent the continuous increase of fault current after a fault happens. On the other hand, the proposed bridge type FCL 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.

1. 서 론

기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기는 고온초전도 코일의 인덕턴스에 의해 사고시 급격한 사고전류 증가를 억제할 수 있으며 고온초전도체의 켈치동작이 필요치 않은 장점이 이에 대한 연구를 활발하게 진행시켜 왔다. 그러나, 사고발생후 지속적으로 증가된 코일전류를 억제하기 위해서는 부가적인 차단기와 이를 동작시키기 위한 제어기가 필수적으로 요구되고 있다.

본 논문에서는 저항형 고온초전도 전류제한기로 사용되고 있는 YBCO 고온초전도 박막의 스위칭동작을 이용한 브리지타입 고온초전도 전류제한기를 제안하였다. 제안한 구조는 고온초전도 박막, 다이오드 브리지, dc 리액터로 구성되어 있으며 기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기에서 필수적인 차단기와 이의 동작을 위한 제어기가 불필요한 장점이 있다. 기존의 브리지형 고온초전도 전류제한기가 사고발생후 사고전류가 일정한 값에 도달되었을때 차단기를 동작시켜 사고전류를 차단했던 방법과 달리 본 논문에서 제안한 장치는 사고발생후 지속적으로 증가되었던 사고전류가 저항형 고온초전도 소자의 임계전류값에 도달한 시점에서 켈치발생에 의한 스위칭 동작에 의해 제한되는 특성을 갖게 된다.

본 논문에서는 브리지형 고온초전도 전류제한기의 동작 모드에 대한 분석과 전원전압크기에 따라 사고발생후 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 브리지타입 전류제한기는 그림 1에 보인 바와 같이 다이오드 브리지, 고온초전도 박막과 DC 리액터로 구성된다. 그림에서 i_d , i_L 및 R_{SC} 는 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 브리지만만 구성된 제한기가 전원과 부하 사이에 설치된 회로에 대한 분석을 수행하였다. 구성된 회로에 대한 분석은 충전모드와 방전모드로 나눌 수 있다.

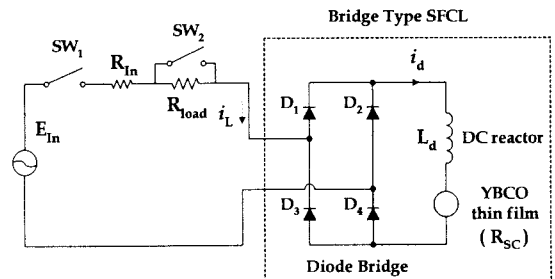


그림 1. 제안한 고온초전도 소자를 이용한 브리지타입 고온초전도 전류제한기 구조

2.2 동작모드 분석

충전모드에서 다이오드 D_1 과 D_4 또는 D_2 와 D_3 를 통과하는 선로전류는 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

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

여기서 $r = R_{In} + R_{load} + R_d + R_{SC}$, $L = L_d$, V_{DF} 는 다이오드의 순방향 바이어스시 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.

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

여기서 $Z = \sqrt{r^2 + \omega L^2}$, $\tan\phi = \omega L/r$, I_0 는 충전모

드 초기전류를 나타낸다. 리액터 전류 i_d 는 $(-1)^{(1-n)}i_L$ 와 같다.

방전모드에서의 선로전류와 리액터전류를 포함한 회로방정식은 식 (3), (4)와 같다.

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

$$L_d \frac{di_d}{dt} = -2V_{DF} \quad (4)$$

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

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

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

여기서 I_1 은 방전모드의 초기 선로전류와 리액터전류를 나타낸다.

각 모드에 대한 회로방정식으로부터 사고발생후 고온초전도 소자의 퀘치 발생시간을 계산할 수 있다. 리액터를도통하는 전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하는 시점이 고온초전도 소자의 퀘치시작 시간이다.

2.3 제한기 구성요소 제작

스위칭 동작을 위한 고온초전도 소자는 2인치 지름의 Al_2O_3 기판위에 300nm로 두께로 증착된 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)를 이용하였다. 또한 사고시 주열발생에 따른 열분산을 위해 YBCO층위에 200nm 두께로 금코팅을 실시하였다. 마지막으로 식각공정을 통해 폭 2mm, 총길이 420mm로 14개의 스트립을 갖는 패턴을 형성시켰다. DC 리액터는 고온초전도 코일대신에 구리동선을 이용하여 설계한 보빈에 권선하여 제작하였다. 제작한 고온초전도 소자와 DC리액터의 사양은 표 1과 같다. 모의사고실험을 위한 선로저항 (R_{in}) 및 부하저항 (R_{load})는 각각 1 Ω , 50 Ω 로 설정하였다.

표 1. DC 리액터 및 고온초전도 소자 사양

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)	Size (Value)	Unit
Critical Temperature	87	T
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 2는 YBCO 고온초전도 소자가 없는 브리지형 전류제한기의 중, 방전모드의 미분방정식으로부터 유도한 식을 이용하여 전원전압크기에 따라 계산한 리액터전류 파형을 보여준다. 전원전압 50, 70, 90, 110 V_{rms} 에서 사고발생후 YBCO 박막의 임계전류값에 도달되는 각각의 시간은 150ms, 97ms, 86ms, 78ms로 전원전압크기가 증가함에 따라 도달되는 시간이 감소됨을 볼 수 있다. 그림 2로부터 사고발생후 고온초전도 소자의 퀘치발생시간을 계산할 수 있다.

전원전압크기에 따른 저항형 스위칭소자를 이용한 사고전류제한 특성을 그림 3에 나타내었다.

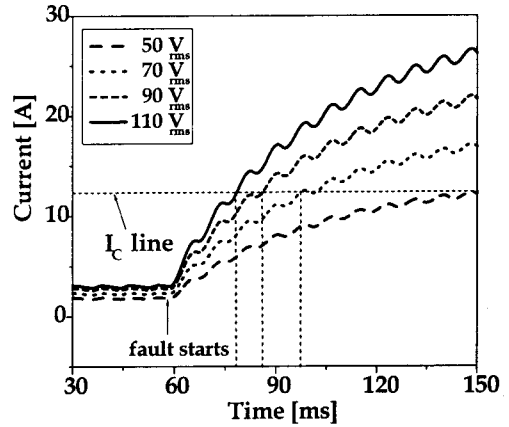
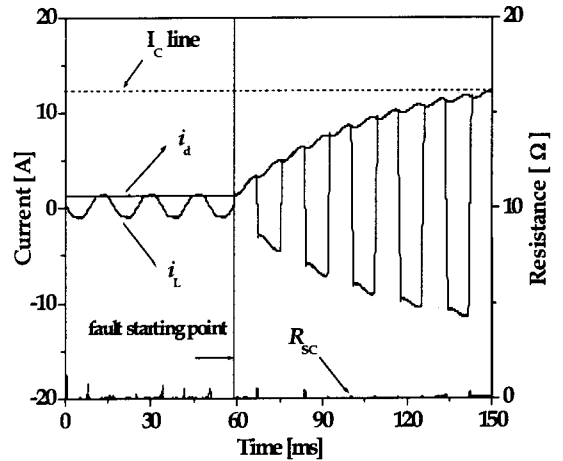
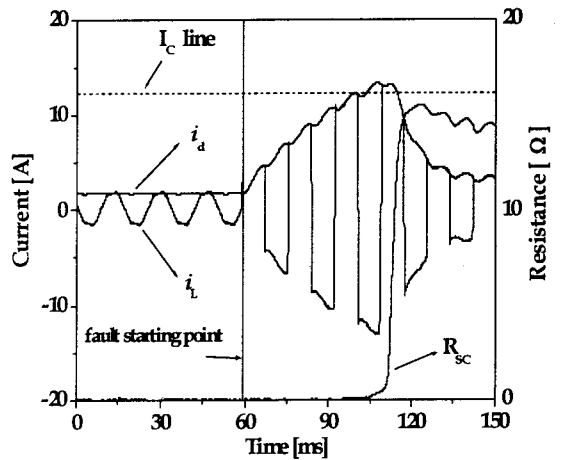


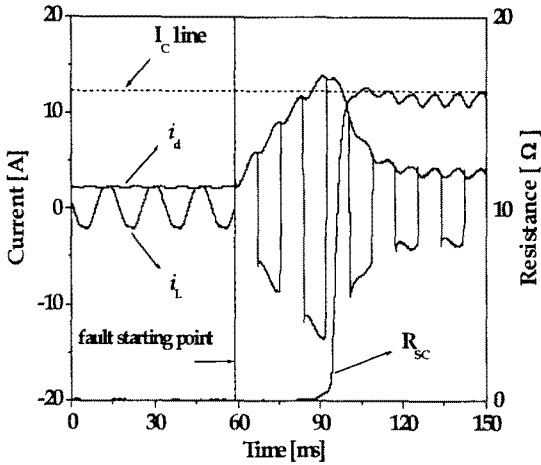
그림 2. 고온초전도 소자가 없는 브리지형 전류제한기의 각 모드의 식으로부터 구한 리액터 전류파형.



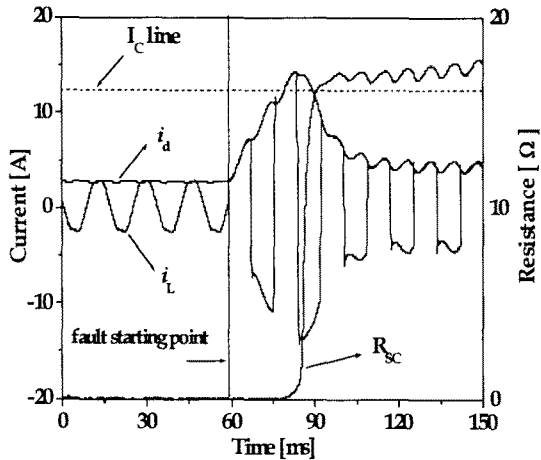
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 전원전압크기에 따른 전류제한특성
(a)50 V_{rms} (b)70 V_{rms} (c)90 V_{rms} (d)110 V_{rms}

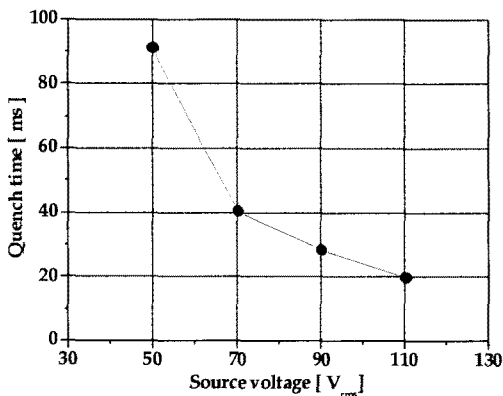


그림 4. 전원전압 크기에 따른 고온초전도 소자의 퀘치 발생 시간

전원전압이 50 V_{rms}인 경우엔 사고발생후 고온초전도 소자는 퀘치가 발생되지 않음을 볼수 있으며 그림에서 보는 바와 같이 리액터에 흐르는 전류가 고온초전도 소자의 임계전류값을 넘지 않은 것에 기인함을 알 수 있다. 이때 동작은, 코일의 인덕턴스에 의해 사고전류가 제한되는 것으로 고온초전도 코일을 이용한 기존의 브리지 타입 전류제한기와 동일한 동작을 하게 된다. 반면에 전원전압이 70 V_{rms}로 증가한 경우엔 사고발생후 코일의 리액턴스에 의해 급격한 증가없이 천천히 증가하던 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 시점에서 감소되기 시작함을 확인 할 수 있다. 또한 사고전류가 감소되기 시작하는 시점은 그림 2에서 계산한 결과와 일치함을 확인 할 수 있다. 전압전압이 90, 110V_{rms}로 증가함에 따라 사고발생후 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 시점이 보다 짧아짐을 볼 수 있다. 그림 4는 전원전압크기에 따라 사고발생후 사고전류가 임계전류값에 도달되는 시간을 비교한 곡선으로 실험에서 분석한 바와 같이 임계전류에 도달되는 시간이 전원전압크기에 반비례해서 감소됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 추가적인 차단기와 제어회로가 필요치 않은 고온초전도 소자를 이용한 브리지형 고온초전도 전류제한기의 동작모드에 대한 분석과 전원전압크기에 따른 사고발생후 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 퀘치특성을 반영한 모델링을 수행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

[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 superconducting 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] Tsutomu 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