

초전도소자의 트리거를 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 및 회복특성 분석

(Analysis on Current Limiting and Recovery Characteristics of a SFCL using a Trigger of Superconducting Element)

임성훈*

(Sung-Hun Lim)

요 약

본 논문에서는 고장발생 초기에 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 퀘칭발생을 검출하여 고장전류의 경로를 별도의 상전도 전류제한기로 우회시킴으로써 초전도 전류제한기의 회복시간을 단축시킬 수 있는 초전도소자의 트리거를 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 및 회복특성에 대해 분석하였다.

고장전류 크기를 조절하기 용이한 구성요소로 상전도 전류제한기의 저항크기에 따른 초전도 전류제한기를 구성하고 있는 전력용스위치의 개방시점과 투입시점의 변화를 비교하였으며, 분석을 통해 상전도 전류제한기의 저항이 증가할수록 초전도 전류제한기를 구성하는 전력용스위치의 복귀시간이 길게 나타남을 확인할 수 있었다.

Abstract

As one of the countermeasures to improve the recovery characteristics of the SFCL (superconducting fault current limiter), the method using the trigger of high-TC superconducting element (HTSC) when the quench in the HTSC element occurred was proposed. To confirm the suggested method, the control circuit to detect the quench occurrence of HTSC element in case of the fault occurrence was designed and the current limiting and recovery experiments of the SFCL using the designed control circuit were performed. Through the analysis for the experimental results, the points of both the open time and the closing time of a power switch comprising the control circuit could be adjusted by the resistance amplitude of a normal conducting current limiting resistor (CLR) and the recovery characteristics of the SFCL together with the current limiting operation could be confirmed to be improved by using the control circuit.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Trigger, Recovery Characteristics

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부

Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961, E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009년 9월 3일, 1차심사 : 2009년 9월 7일, 심사완료 : 2009년 11월 10일

1. 서 론

현재까지 개발된 초전도 전류제한기중 자속구속형 초전도 전류제한기는 가장 최근에 개발된 형태로 실 계통 적용을 위해 진행되고 있는 저항형 초전도 전류 제한기의 문제점들을 해결할 수 있는 특징이 있다. 저항형 초전도전류제한기의 경우, 실계통에 적용하기 위한 초전도 전류제한기 구성을 위해 단위초전도 소자의 직·병렬연결이 필수적이거나, 자속구속형 초전도 전류제한기는 구조적으로 초전도 소자가 고장전류의 일부를 부담함으로써 단위 초전도 소자의 개수를 줄일 수 있는 장점이 있다[1-3]. 또한, 저항형의 경우, 제한기 동작전류를 증가시키기 위해서, 병렬로 연결되는 단위초전도 소자의 개수를 증가시켜야 되나 자속구속형 초전도 전류제한기는 두 코일의 인덕턴스 비를 조절함으로써 제한기 동작전류를 증가시킬 수 있는 장점이 있음이 보고된 바 있다[3-5]. 특히, 직렬 연결시 단위 초전도소자들간의 임계전류 차이로 인해 야기되는 불균일한 전력부담을 자속구속형 초전도 전류제한기에서는 자속결합을 통해 균일하게 발생시킬 수 있다는 결과가 보고되기도 하였다[6].

초전도 전류제한기를 실계통에 적용하기 위해 해결해야 될 또 다른 문제점으로는 기존의 차단기와 연계 동작하여, 차단기에 의해 고장이 제거될 경우 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자들은 가능한 짧은 시간안에 정상상태인 초전도 상태로 복귀되는 것이 이상적이지만 고장발생시 신속한 전류제한 동작과 달리 긴 회복시간을 필요로 하고 있어 회복특성 향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[7-9].

본 논문에서는 자속구속형 초전도 전류제한기의 회복특성을 향상시키기 위한 기초연구로, 전력용스위치를 이용하여 고장발생 초기에 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 켄치발생을 검출하여 고장전류의 경로를 별도의 상전도 제한기로 우회시킴으로써 초전도 전류제한기의 회복시간을 단축시킬 수 있는 방안에 대해 분석하였다.

이를 위해 전력용스위치를 포함하여 제어회로를 제작하였으며, 제작된 제어회로를 이용한 단락모의실험을 통해 초전도 전류제한기를 구성하는 상전도전류제

한기(CLR)의 저항크기에 따른 전력용스위치의 개방시점과 투입시점의 변화를 비교하였으며, 이에 따른 초전도 전류제한기의 전류제한 및 회복특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

초전도소자의 트리거를 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 및 회복특성 분석을 위한 단락모의실험 장치를 그림 1에 나타내었다. 단락모의 실험시 동작순서는 고장발생시 초전도소자의 켄치발생여부를 전압센서(PT)를 통해 초전도소자의 전압을 실효값으로 검출하여 전력용스위치를 개방하게 되며, 고장이 제거될 경우 상전도전류제한기(CLR)에 흐르는 전류를 전류센서(CT)를 통해 실효값으로 감지하여 다시 전력용스위치를 투입하게 된다. 이때, 전압, 전류센서로부터 전력용스위치를 온 오프하기 위한 설정값은 고장발생전에 설정할 수 있으며, 본 논문에서는 전압 20[V], 전류 2[A]로 설정하였다. 또한, 본 논문에서 실험한 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도소자는 임계전류가 24[A]인 YBCO 박막을 사용하였다.

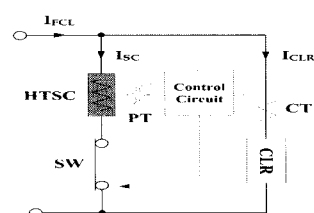


그림 1. 초전도체의 트리거를 이용한 초전도전류 제한기의 모의실험 구성도

Fig. 1. Configuration diagram for simulated experiment of a SFCL using trigger of HTSC element

그림 2는 전압, 전류 설정값을 20[V], 2[A]로 설정한 경우 스위치의 동작신호를 보여준다. 그림 2에서 보는 바와 같이 고장발생으로 초전도소자의 전압이 20[V]를 넘는 시점에서 스위치신호가 0으로 되며 고장이 제거되어 상전도 전류제한기에 흐르는 전류가 2[A]이하가 되는 시점에서 다시 스위치신호가 1로 되는 것을

확인할 수 있다.

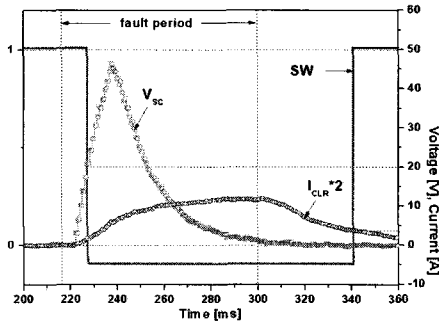


그림 2. 초전도소자 전압과 상전도 전류제한기 전류변화에 따른 전력용스위치 신호변화
 Fig. 2. Signal variation of a power switch dependent on voltage of HTSC element and current of CLR

고장발생직후 전력용스위치의 개방시점과 고장제거 후 투입시점은 전압·전류 설정값, 초전도소자의 상전도 저항 및 상전도 전류제한기의 임피던스에 따라 변동될 수 있으며, 본 논문에서는 고장발생시 고장전류 저감을 조절하기에 보다 용이한 상전도 전류제한기의 저항 크기에 따른 전류제한 및 회복특성을 분석하였다.

2.2 결과 및 고찰

그림 3은 상전도 전류제한기의 저항크기에 따라 고장발생초기 전력용스위치 개방시점 변화로 인한 전류제한특성을 보여준다. 그림 3 (a)에서 보는 바와 같이 고장전에는 선로전류(IFCL)가 모두 초전도소자를 통해 흐르게 되지만, 고장발생과 동시에 초전도소자에 흐르는 전류(ISC)가 급격히 상승하여 임계전류를 초과함에 따라 켄치발생으로 저항이 발생하게 되며 이로 인해 초전도소자에 전압(VSC)이 발생하게 된다. 이로 인해, 상전도 전류제한기로 일부전류(ICLR)가 분배되어 흐르게 되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 과정을 거치는 동안 초전도소자전압은 상승하게 되며, PT에서 설정한 값(20[V])을 초과하는 시점에서 전력용스위치가 개방됨에 따라 초전도소자는 고장전류로부터 분리가 된다. 이와 같은 동작은 전력용스위치가 개방된 시점부터 초전도소자는 회복되기 시작하게 되

며, 계통에 설치된 차단기의 동작으로 고장이 제거된 후 재투입될 경우 초전도소자를 포함한 초전도 전류제한기는 초전도상태에서 선로에 영향없이 반복적인 전류제한 동작이 가능하게 된다.

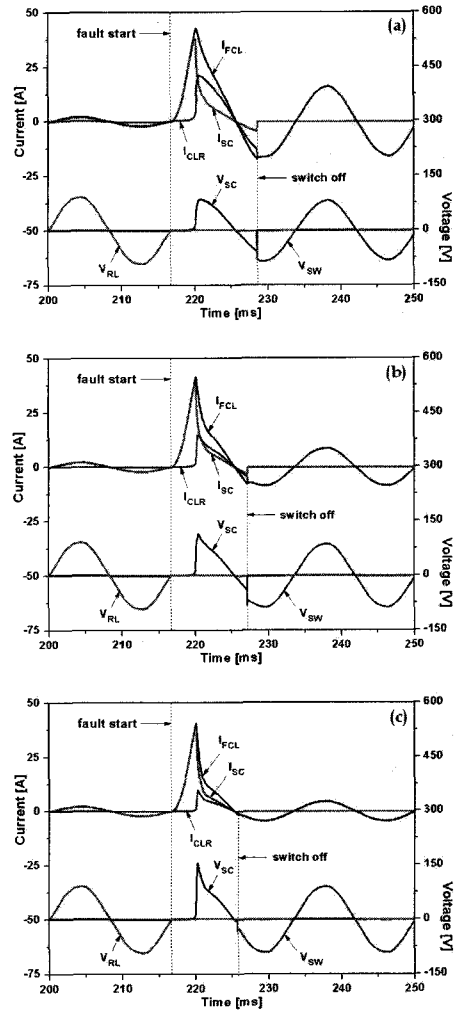


그림 3. 상전도 전류제한기의 저항크기에 따른 고장 초기 전력용스위치의 개방시점 변화
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]
 Fig. 3. Variation in a point of an open time in a power switch dependent on resistance amplitude of CLR during initial fault time
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]

상전류 전류제한기의 저항이 10.3[Ω], 20.6[Ω]으로 증가함에 따라, 상전도저항으로 고장전류의 분류가 감소하게 되어 초전도소자의 전압(VSC)이 보다 증가하

게 되며, 이에 따라 전력용스위치의 개방시점이 감소되는 것을 그림 3 (b), (c)에서 비교할 수 있다.

고장제거직후 상전도전류제한기에 흐르는 전류가 CT에 설정된 값보다 감소되어 전력용스위치의 투입이 이루어지게 되며 이때, 상전도 전류제한기의 저항 크기에 따른 고장제거후 전력용스위치의 투입시점 변화를 그림 4에 나타내었다.

그림 4 (a)에서 보는 바와 같이 상전도 전류제한기

(CLR)의 상전도저항이 5.15[Ω]인 경우에는 10.3[Ω], 20.6[Ω]인 경우보다 상전도 전류제한기에 보다 큰 전류가 흐르게 되며 CT에 설정된 값보다 감소되기까지 상전도 저항이 10.3[Ω], 20.6[Ω]인 경우보다 긴 시간이 걸리는 것을 비교할 수 있다. 이에 따라 전력용스위치의 투입시간은 상전도저항이 증가함에 따라 짧아지는 것을 관찰할 수 있다. 상전도저항이 작은 경우 전력용스위치의 투입시간을 단축시키기 위한 방법으로 CT

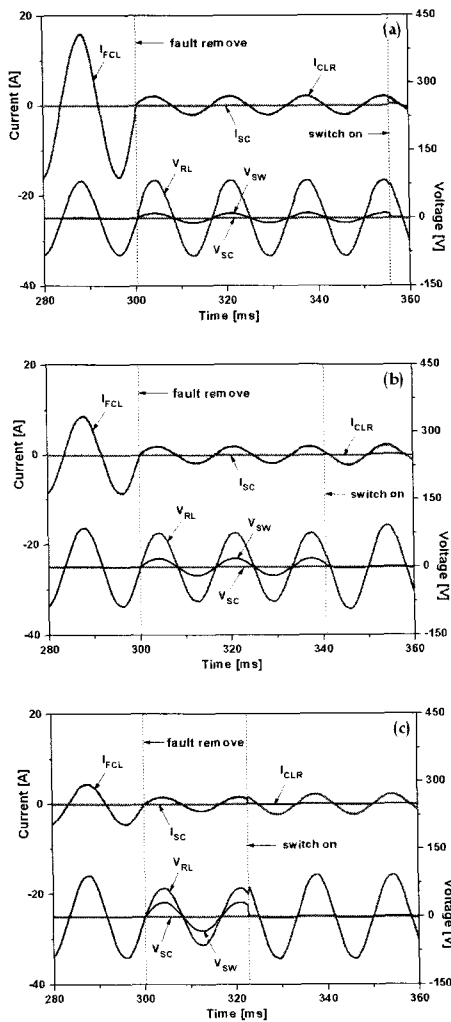


그림 4. 상전도 전류제한기의 저항크기에 따른 고장제거 후 전력용스위치의 투입시점 변화
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]
 Fig. 4. Variation in a point of a closing time in a power switch dependent on resistance amplitude of CLR after a fault removes
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]

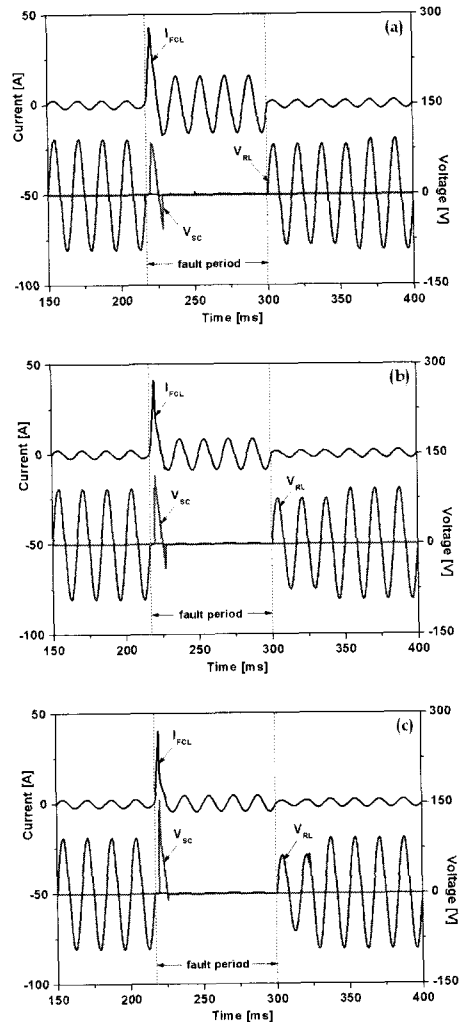


그림 5. 상전도 전류제한기의 저항크기에 따른 고장 전류, 초전도소자 및 부하 전압
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]
 Fig. 5. Fault current and voltages of HTSC element and load dependent on resistance amplitude of CLR
 (a) 5.15[Ω]. (b) 10.3[Ω]. (c) 20.6[Ω]

의 설정값을 증가시킴으로써 가능할 것으로 사료된다.

그림 5는 상전도 전류제한기의 저항크기에 따른 고장전류를 포함한 초전도소자 및 부하 전압을 보여준다. 상전도 전류제한기의 저항이 증가함에 따라 고장시 고장전류제한이 크게 이루어지는 것을 볼 수 있는 반면, 고장발생 초기 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 전압은 다소 증가되는 것을 비교할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 고장발생시 초기고장전류를 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자가 먼저 감지하여 고장전류가 초전도 소자에서 병렬연결된 상전도 전류 제한기(CLR)로 흐르게 하여 제한함으로써 고장제거 후 초전도 전류제한기의 회복시간을 단축시킬 수 있는 방안을 제안하였다.

이를 위해 전력용스위치를 포함하여 제어회로를 제작하였으며, 제작된 제어회로를 이용한 단락모의실험을 통해 초전도 전류제한기를 구성하는 상전도 전류 제한기(CLR)의 저항크기에 따른 전류제한 및 회복특성을 분석하였다.

분석을 통해 상전도 전류제한기의 저항크기가 증가함에 따라 고장발생 직후 전력용 스위치의 개방시점이 짧아진 반면, 고장제거시 전력용 스위치의 투입시점이 늦게 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 결과를 바탕으로 두 코일의 직렬 또는 병렬연결된 구조를 갖는 자속구속형 초전도 전류제한기의 회복특성을 향상시키기 위한 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-331-D00159)로서 이에 감사드립니다.

References

- [1] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, S. C. Ko, and B. S. Han, "Impedance variation of a flux-lock type SFCL dependent on winding direction between coil 1 and coil 2", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, pp. 2039-2042, June 2005.
- [2] S. H. Lim and H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL", *Physica C*, Vol. 416, pp. 34-42, Nov. 2004.
- [3] S. H. Lim, T. H. Han, S. W. Yim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL dependent on fault angles and core saturation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, No. 2, pp. 1827-1830, June 2007.
- [4] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, "Current limiting characteristics of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, pp. 2056-2059, June 2003.
- [5] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han "Operational characteristics of flux-lock type SFCL using series resonance", *Cryogenics*, Vol. 44, No. 4, pp. 249-254, April 2004.
- [6] S. H. Lim and H. S. Choi, "Quench characteristics of HTSC elements in series-connected flux-lock type SFCLs through magnetic flux-linkage", *Physica C*, Vol. 445-448, pp. 1073-1077, Oct. 2006.
- [7] Y. Shirai, K. Fujikawa, T. Kitagawa, M. Shiotsu, H. Hatta, S. Muroya, and T. Nitta, "Study on recovery time of a superconducting fault current limiter with adjustable trigger current level", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp. 2086-2089, March 2001.
- [8] T. H. Han, H. S. Choi, S. H. Lim, and N. Y. Lee, "Recovery characteristics of flux-lock type superconducting fault current limiter", *Physica C*, Vol. 463-465, pp. 1209-1212, Oct. 2007.
- [9] H. Hatta, T. Nitta, S. Muroya, T. Oide, Y. Shirai, M. Taguchi, and Y. Miyato, "Study on recovery current of transformer type superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, pp. 2096-2099, June 2003.

◆ 저자소개 ◆

임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.

주 관심분야 : 초전도 전력계통 보호, 보호협조, 분산전원, 초전도 전력응용 및 친환경전력기기 등

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr