

논문 20-10-11

# 전원전압에 따른 초전도 사고전류제한기의 켄치속도 분석

## Analysis on Quench Velocity of SFCL dependent on Source Voltage

임성훈<sup>1,a</sup>  
(Sung-Hun Lim<sup>1,a</sup>)

### Abstract

We investigated the quench velocity of superconducting fault current limiter (SFCL) dependent on the source voltage.  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) thin film was used as the current limiting element for SFCL. The analysis on the quench velocity of SFCL is essential to determine the capacity of circuit breaker (CB) or coordinate with CB. Generally, the quench velocity of SFCL is related with the short-circuit current. To change the short-circuit current, in this paper, the amplitude of the power source voltage is adjusted. Through the fault current limiting experiments, the quench velocity of SFCL was confirmed to increase fast as the source voltage increased. On the other hand, the peak limited current was shown to increase with steady rate of increase.

**Key Words** : Quench velocity, Superconducting fault current limiter (SFCL), Current limiting element

### 1. 서 론

다양한 분산전원을 포함한 전원설비증가와 함께 전력수요증가는 계통의 단락전류를 증가시키게 되었으며, 이로 인해 단락전류가 계통에 설치된 차단기의 용량을 초과하게 되는 변전소 개소가 점차 증가하고 있는 실정이다. 이에 대한 방안인 단락용량이 높은 차단기로 교체는 차단기 교체에 따른 비용증가와 용량증대에 따른 기술적인 한계를 가지고 있다. 고임피던스 전력설비나 직렬리액터를 설치하는 방법이 시도되고 있지만 정상시에 손실이 발생할 뿐 아니라 계통에 영향을 미치게 된다. 모선분리와 같은 방안은 인접계통에 과부하나 전압변동과 같은 전력계통의 안정도 저하 등을 수반하게 된다. 이와 같이 기존의 방안들이 가지고 있는 문제점을 해결하고 보다 효과적인 단락전류 저감을 위한 방안으로써 초전도현상을 이용한 초전도 사고전류제한기(SFCL)가 가장 이상적인 사고

전류제한기로서의 대안으로 주목받으면서 보다 활발한 연구가 진행되어 오고 있다[1-5].

초전도 사고전류제한기를 실계통에 적용할 경우 사고시 보다 신속한 켄치(Quench)발생으로 사고전류 크기를 제한함으로써 기존의 차단기의 단락용량을 증가시킬 수 있는 장점이 있다[1-3]. 이와 같은 사고시 초전도 사고전류제한기의 동작속도, 즉 켄치속도는 단락전류크기에 따라 다르게 되며, 이에 대한 변화특성을 분석하는 것은 기존의 보호장치가 부담하게 되는 단락전류와 단락용량을 결정하기위해서 선행되어야 할 내용이다.

본 논문에서는 단락전류 크기를 가변하기 위한 방법으로써 전원전압의 크기를 변화시켰다. 실험결과로부터, 전원전압 증가에 따른 사고시 초전도 사고전류제한기의 켄치특성을 고찰함으로써 초전도 사고전류제한기의 켄치속도를 계산하였다.

### 2. 실험

전류제한 실험을 위한 초전도 전류제한 소자는  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) 고온초전도 박막을 사용하였다. 초전도 전류제한 소자는 직경 2인치의 사파이어 기판위에 300 nm 두께로 YBCO 박막을 증착하였

1. 숭실대학교 전기공학부  
(서울시 동작구 상도 5동 1-1)  
a. Corresponding Author : superlsh73@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2007. 8. 13  
1차 심사 : 2007. 9. 12  
심사완료 : 2007. 9. 18

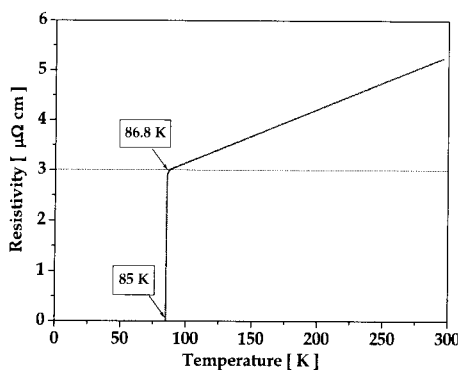


그림 1. YBCO 초전도 박막소자의 임계온도 곡선.  
Fig. 1. Critical temperature curve of a YBCO high- $T_c$  superconducting thin film device.

으며, 박막소자의 켈치시 국부적인 열발생으로부터 보호를 위해 200 nm 두께의 Au층을 YBCO 박막 위에 증착하였다. 제작된 박막소자를 식각공정을 통해 폭 2 mm, 전체길이 332 mm로 제작하였다[4-6].

사고전류제한 실험에 앞서 1 mA의 DC전류를 인가하면서 제작한 YBCO 박막소자의 임계온도를 측정하였다. 그림 1은 측정한 임계온도 곡선을 보여준다. 임계온도는 약 85 K였으며 임계온도를 넘는 온도범위(86.8 K이상)에서는 비저항값이 3 [ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ]으로 급격히 상승한 후 Au의 비저항특성인 일정한 온도기울기를 가지고 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 켈치시 YBCO 박막의 비저항값은 Au의 비저항값보다 약 100 배가량 큰 값을 가지고 있어 대부분의 전류가 Au층을 통해 흐르게 되어 나타난 결과임을 분석할 수 있다. 초전도 소자의 또 다른 기본특성값으로써 임계전류값을 측정하였으며, 약 14 A로 측정되었다. 측정시 기준전압값은 1 [mV/cm]를 기준으로 측정하였다.

단락전류를 변화시키는 방법으로 전원전압의 크기를 변화시켰으며, 인가전압에 따른 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하기 위해 인가전압은 30, 50, 70, 90, 110  $V_{rms}$ 로 20  $V_{rms}$ 간격으로 증가시켜 사고전류제한 특성실험을 실시하였다. 그림 2는 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 전원단 저항( $R_{in}$ )과 부하저항( $R_{load}$ )은 각각 1  $\Omega$ 과 50  $\Omega$ 를 사용하였다. 단락사고를 모의하기 위해 SW1을 투입한 후 SW2을 주어진 사고주기동안 투입하여 모의하였으며, 사고시 소자에 흐르는 전류와 소자양단전압을 CT, PT를 통해 측정하여 분석하였다.

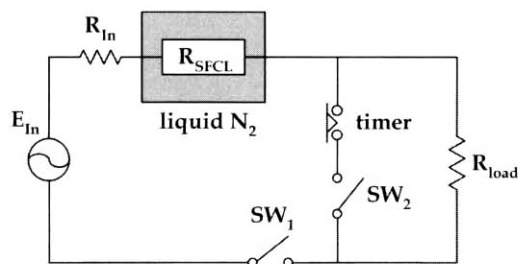


그림 2. 고온초전도 사고전류제한기의 모의실험 구성도.

Fig. 2. Experimental circuit of a HTSC FCL.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 전원전압을 50  $V_{rms}$ , 90  $V_{rms}$  인가한 경우 초전도 사고전류제한기의 사고전류 제한특성을 보여준다. 전원전압을 90  $V_{rms}$ 를 인가한 경우에 사고초기의 제한기 전류피크와 제한기에 유기되는 전압의 크기가 50  $V_{rms}$ 인 경우보다 증가되는 것을 비교할 수 있다.

사고발생 직후 시간이 진행함에 따라 제한기전류와 제한기에서 발생하는 소비전력 변화를 비교하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 사고발생시간 (a), 전류제한기 전류가 최대값에 도달하는 시간 (b), 초전도 전류제한기에서 발생하는 소비전력이 최대값에 도달하는 시간(c), 초전도 전류제한기에서 소비전력이 제로값에 도달하는 시간 (d), 초전도 전류제한기에서 소비전력이 두 번째 피크값에 도달하는 시간(e)을 구분하여 분석할 수 있으며, 사고가발생한 후 a, b, c, d, e 순으로 순차적으로 나타남을 볼 수 있다. 사고직후 전류제한기에 흐르는 전류가 최대값에 도달하는 시간과 제한기에서 소비되는 전력이 최대값에 도달하는 시간이 동일한 시간에 발생되지 않는 것을 분석할 수 있으며 전원전압이 90  $V_{rms}$ 인 경우에는 두 최대값이 발생하는 시간차이가 전원전압이 50  $V_{rms}$ 인 경우보다 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전원전압이 90  $V_{rms}$ 인 경우가 50  $V_{rms}$ 인 경우보다 최대값에 도달하는 초전도 전류제한기 전류와 소비전력이 가장 크게 나타남을 비교할 수 있다. 하지만, 이후 제한기 전류값과 제한기 소비전력이 영이 되는 시간과 제한기 소비전력의 두 번째 피크값이 0이 되는 시간은 전원전압크기에 관계없이 동일한 시간에서 나타남을 그림 4에서 비교할 수 있다.

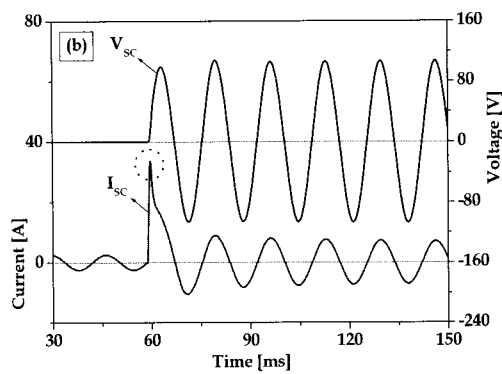
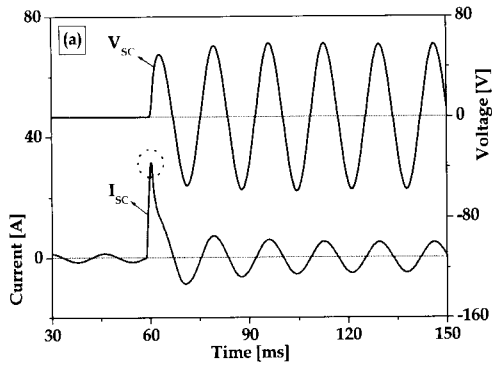


그림 3. 전원전압에 따른 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성의 사고전류제한 특성.

(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

Fig. 3. Fault current limiting characteristics of SFCL dependent on the source voltage.

(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

그림 5는 그림 4에서 분석한 제한기 전류와 제한기 소비전력간의 궤적을 도시한 것으로, 그림 4에서 분석한 사고초기에 나타나는 제한기 최대전류값(b)과 제한기 최대 소비전력값(c), 두 값이 나타나는 시간 간격이 전원전압이 90 V<sub>rms</sub>인 경우에 더욱 크게 나타남을 비교할 수 있으며, 이후, 사고주기가 증가함에 따라 두 값의 최대값, 최소값이 나타나는 시간은 동일한 시점에서 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 사고발생후 전원전압크기에 따라 제한기 전류가 최대값에 도달하는 시간과 소비전력이 최대값에 도달되는 시간을 도시한 것으로 전원전압이 증가함에 따라 사고시 제한기의 전류가 최대값에 도달되는 시간은 점차 감소되는 것을 볼 수 있으며, 제한기 소비전력이 최대값에 도달되는 시간은 일정한 값인 62.7 ms에 수렴하는 것을 분석할

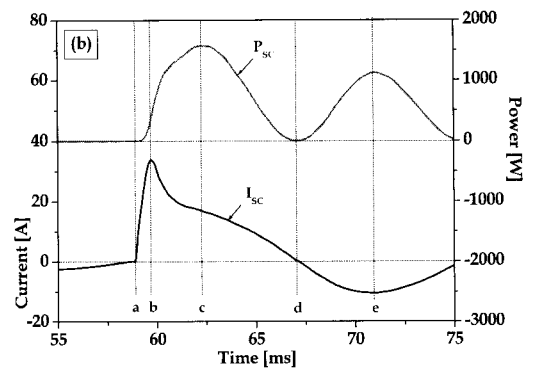


그림 4. 초전도 사고전류제한기의 사고초기 소비 전력 및 전류 변화.

(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

Fig. 4. Variation in the consumed power and current of SFCL during the initial fault time. (a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

수 있다. 그림 7은 전원전압크기에 따른 두 값의 최대값을 도시한 것으로 전원전압이 증가함에 따라 제한기 최대소비전력과 제한기 최대도통전류가 증가함을 분석할 수 있다.

전원전압크기에 따른 사고전류제한 특성으로부터 초전도 전류제한기의 저항곡선을 유도할 수 있으며, 유도한 저항곡선으로부터 사고시 저항을 변화곡선을 얻을 수 있다. 그림 8은 전원전압 50 V<sub>rms</sub> 과 90 V<sub>rms</sub>인 경우 도출한 초전도 전류제한기의 저항률 변화곡선을 보여준다. 전원전압이 50 V<sub>rms</sub>인 경우, 사고발생후 47.7 ms뒤에 초전도 전류제한기의 저항률이 3 [uΩ · cm]값을 넘게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 측정된 그림 1의 임계온도 곡선에서 볼 수 있듯이 초전도 전류제한기의 저항률이 3 [uΩ · cm]가 되는 경우 초전도 전류제한기의 전영역이

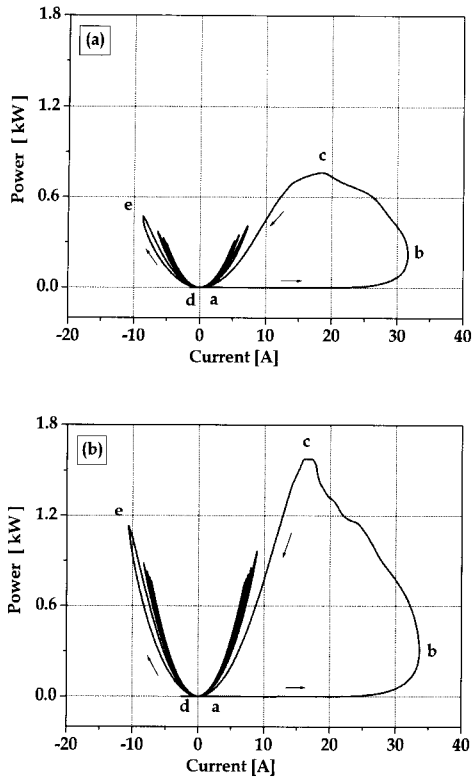


그림 5. 사고시 초전도 사고전류제한기의 소비전력과 소자전류 궤적 변화.  
(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

Fig. 5. Track variation in consumed power and current of SFCL during the fault time.  
(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

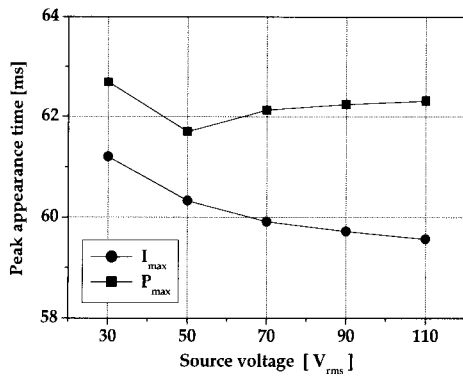


그림 6. 전원전압크기에 따른 초전도 사고전류 제한기의 최대전류 및 최대소비전력 변화.  
Fig. 6. Maximum peak current and maximum assumed peak power in SFCL dependent on source voltage.

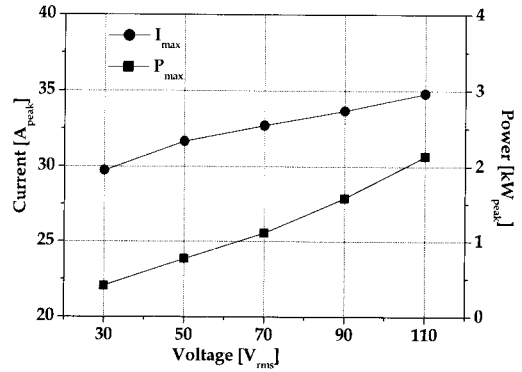


그림 7. 전원전압에 따른 초전도 사고전류제한기 최대소비전력 및 최대 소자전류 피크변화.  
Fig. 7. Maximum consumed power and maximum current in SFCL dependent on source voltage.

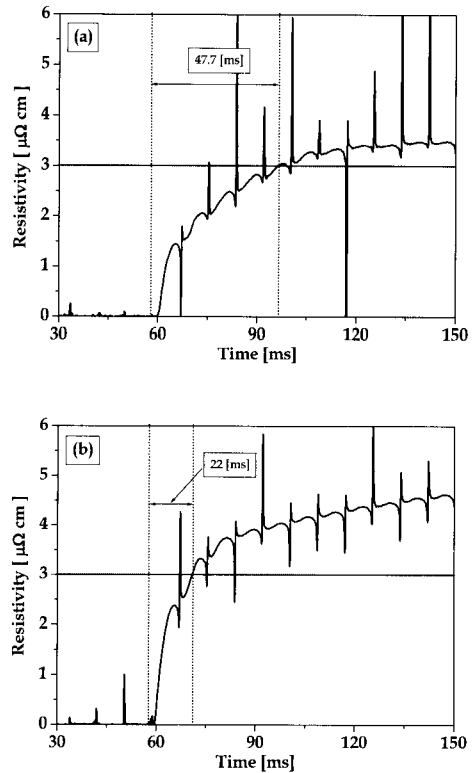


그림 8. 사고시 초전도 사고전류제한기의 저항을 변화.  
(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.  
Fig. 8. Variation of resistivity in SFCL during the fault period.  
(a) 50 V<sub>rms</sub>. (b) 90 V<sub>rms</sub>.

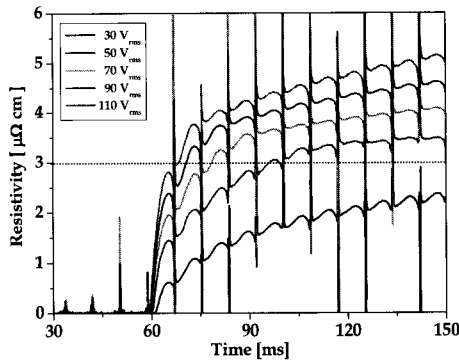


그림 9. 전원전압에 따른 초전도 사고전류 제한기의 저항을 변화 곡선.

Fig. 9. Resistivity variation curve in SFCL dependent on the source voltage.

완전퀀치가 이루어지는 값을 의미한다. 따라서, 위의 저항으로부터 사고발생후 초전도 사고전류기의 전영역에서 완전퀀치가 이루어지기까지의 퀀치속도를 계산할 수 있다.

전원전압이 50 V<sub>rms</sub>인 경우, 완전퀀치가 이루어질 때 까지 계산한 퀀치속도는 6.96 m/s였다. 전원전압이 90 V<sub>rms</sub>인 경우엔 완전퀀치가 이루어질 때 까지 22 ms가 소요되는 것을 그림 8(b)에서 확인할 수 있으며, 계산결과 퀀치속도는 15.27 m/s로 더욱 증가되어 나타났다. 전원전압크기에 따른 초전도 전류제한기의 전체 퀀치발생 시간은 그림 9에서 비교할 수 있듯이 전원전압크기가 30 V<sub>rms</sub>인 경우에는 사고주기가 5주기가 지날 때 까지 완전퀀치에 해당하는 저항을 값에 도달되지 않는 것을 볼 수 있으며, 전원전압이 110 V<sub>rms</sub>인 경우에는 약 18 ms가 지난후 완전퀀치가 발생하는 것을 저항을 곡선으로부터 확인할 수 있다.

전원전원크기에 따른 사고후 초전도 전류제한기가 완전퀀치가 이루어질 때까지 계산한 퀀치속도를 그림 10에 도시하였다. 사고직후 제한기 전류피크값은 전원전압크기가 증가함에 따라 완만한 증가를 보이는 것을 볼 수 있으나, 퀀치속도는 전원전압크기에 선형적으로 증가하고 있는 것을 분석할 수 있다. 위의 분석결과로부터 전원전압이 증가함에 따라 초전도 전류제한기의 퀀치속도가 더욱 증가되어 저항이 발생하게 되고 사고주기가 증가함에 따라 보다 큰 값으로 수렴하는 것을 분석할 수 있다. 이로 인해 사고전류 제한 효과는 더욱 향상되는 것을 분석할 수 있다.

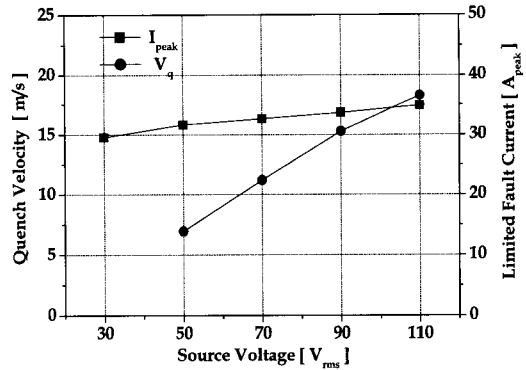


그림 10. 전원전압에 따른 초전도 사고전류 제한기의 퀀치속도 및 제한전류피크변화.

Fig. 10. Quench velocity and peak limited fault current in SFCL dependent on source voltage.

#### 4. 결론

사고시 초전도 사고전류제한기의 동작속도, 즉 퀀치속도는 단락전류크기에 따라 다르게 되며, 이에 대한 변화특성을 분석하는 것은 기존의 보호장치가 부담하게 되는 단락전류와 단락용량을 결정하는데 중요한 요소이다.

본 논문에서는 단락전류 크기를 가변하기 위한 방법으로써 전원전압의 크기를 변화시켰다. 실험결과로부터, 전원전압 증가에 따른 사고시 초전도 사고전류제한기의 퀀치특성을 조사하여 초전도 사고전류제한기의 퀀치속도를 계산하였다. 본 논문을 통하여 전압전압크기가 증가함에 따라 사고시 제한되는 초기피크값은 완만한 증가를 갖는 반면 퀀치속도는 전압전압크기에 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 송실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

#### 참고 문헌

- [1] 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, p. 2086, 2001.
- [2] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Toward the superconducting fault current limiter", IEEE Trans. On Power Del., Vol. 6, No. 2, p. 801, 1991.
- [3] W. Paul and M. Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, Vol. 35, p. 49, 1998.
- [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, p. 2056, 2003.
- [5] S.-H. Lim, B.-S. Han, and H.-S. Choi, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL using series resonance", Trans. EEM, Vol. 6, No. 4, p. 159, 2005.
- [6] S.-H. Lim, C.-R. Park, B.-S. Han, H.-M. Park, Y.-S. Cho, and H.-S. Choi, "Fault current limiting characteristics of flux-lock type SFCL with several secondary windings", Trans. EEM, Vol. 6, No. 5, p. 193, 2005.