

YBa₂Cu₃O₇ 박막을 이용한 하이브리드형 초전도 사고전류제한기의 특성

Properties of a Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiter using YBa₂Cu₃O₇ Films

최효상^{1,a}, 조용선¹

(Hyo-Sang Choi^{1,a} and Yong-Sun Cho¹)

Abstract

We present investigations of a hybrid type superconducting fault current limiter (SFCL), which consists of transformers and resistive superconducting elements. The secondary windings of the transformer were separated into several electrically isolated circuits and linked inductively with each other by mutual flux, each of which has a superconducting current limiting element of YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) stripes as a current limiting element. Simple connection in series of the SFCL elements tends to produce ill-timed quenching because of power dissipation unbalance between SFCL elements. Both electrical isolation and mutual flux linkage of the elements provides a solution to power dissipation unbalance, inducing simultaneous quench and current redistribution of the YBCO films. This design enables to increase the voltage rating of SFCL with given YBCO stripes.

Key Words : Hybrid-type superconducting fault current limiter, Power imbalance, Simultaneous switching

1. 서론

전력 송·배전 시스템의 복잡화와 연결망의 증가로 사고 전류는 회로에 이용되고 있는 차단기의 차단내력을 초과하여 증가되고 있다. 이러한 사고 전류는 시스템 정격전류의 10~20배 이상으로 높게 증가될 수 있고, 전력망에 매우 큰 악영향을 초래할 수도 있다. 그래서 사고전류를 빠른 시간 내에 그리고 정확하고 확실하게 판단하여 차단 및 제한할 수 있는 신속성과 신뢰성을 갖는 장치가 요구된다. 초전도 사고전류제한기는 매우 짧은 응답시간과 다른 사고 감지장치 없이 사고전류를 제한하는 특성을 갖는다. 초전도 사고전류제한기는 현재 많은 나라에서 개발되고 있다[1-9].

현재 개발 중인 SFCL은 저항형, 유도형, 하이브리드형 등 다양한 종류들이 있다. 저항형 SFCL은 원리와 구조가 매우 간단하며, 특히 얇은 박막을 사용하기 때문에 소형으로 만들기가 매우 용이하다[6-10]. 얇은 박막을 이용한 SFCL의 정격전압을 증가시키기 위해 SFCL 소자를 직렬로 연결하였으나, SFCL 소자들 사이에서 임계전류밀도의 작은 차이점으로 소자 사이에 중대한 전력분담의 불균형을 일으킨다. 우리는 SFCL 소자에 병렬로 셉트 저항을 연결하여 이 문제를 해결하였으나, 여전히 공급된 전압에 따라 셉트 저항의 값도 바뀌어야 한다는 문제점이 남아있다[10].

본 연구는 직렬로 연결된 SFCL 소자의 동시켄치 발생을 위한 다른 해결책으로서 얇은 YBCO 박막을 이용한 하이브리드형 SFCL을 제작하였고, 그 특성을 조사하였다.

2. 실험

초전도 사고전류 제한소자는 지름 2 inch로 Al₂O₃

1. 조선대학교 전기공학과
(광주시 동구 서석동 375)

a. Corresponding Author : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2005. 8. 26

1차 심사 : 2005. 11. 17

심사완료 : 2006. 2. 28

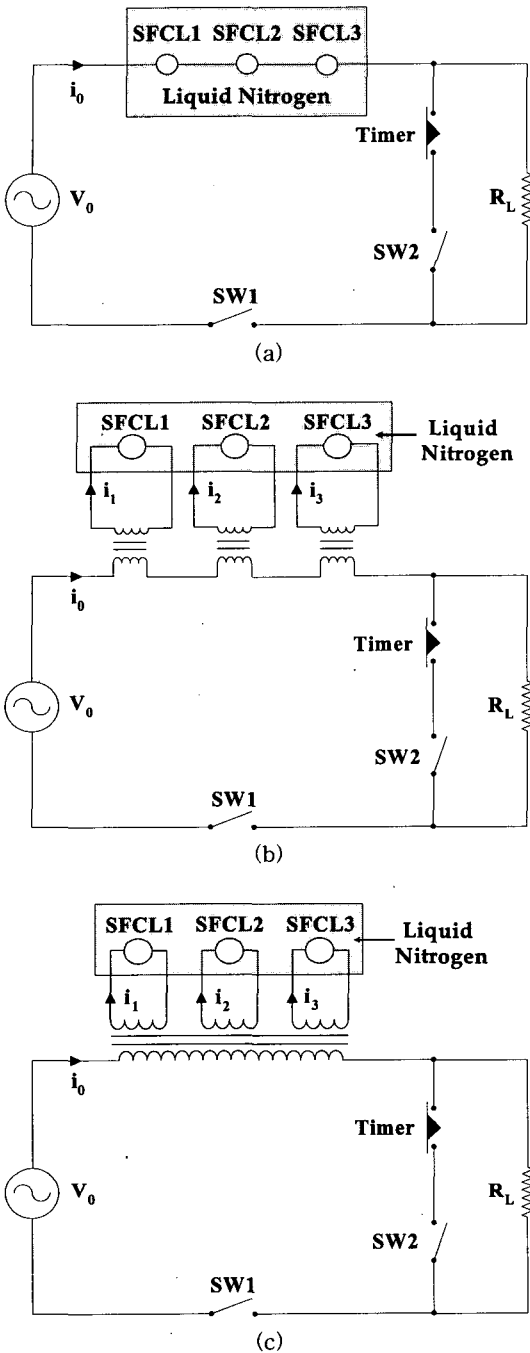


그림 1. 실험 회로 구성도.

Fig. 1. Scheme of test circuits for SFCLs.

(a) Simple serial connection. (b) Hybrid type SFCL using three transformers. (c) Hybrid type SFCL using a single ferromagnetic core.

기판위에 성장된 300 nm 두께의 얇은 YBCO 박막을 사용하여 제작하였다. 이에 대한 자세한 제원을 참고문헌[6]에 나타내었다.

그림 1은 다양한 방식의 SFCL의 전류제한 시험을 위해 사용된 3개의 실험 회로도이다. 도형에서 V_0 는 전원 전압이고, i_0, i_1, i_2, i_3 는 각각의 SFCL 소자에 흐르는 전류로서 전류 프로브로 측정하였다. 타이머는 과도한 전력으로부터 얇은 YBCO 박막이 용해되는 것을 보호하기 위한 것으로 사고 발생 시간을 조절하는 스위치로 동작시킨다. R_L 은 선로의 부하저항으로써 단순 직렬연결을 위한 84 Ω 과 변압기를 사용하는 회로를 위한 144 Ω 을 사용하였다. SFCL 소자는 전력 시스템이 일반적으로 운영되는 동안 초전도 상태를 유지하고 있어야 하므로, 그 상태를 유지하기 위해 온도가 77 K인 저온 질소용액에 담겨있다. 금 박막을 포함한 SFCL 소자의 저항은 상온에서 33 Ω 이었다.

그림 1(c)의 실험 회로도를 위한 회로 방정식은 아래와 같다. 방정식 (1)은 SW1을 닫았을 때 SFCL 소자가 초전도 상태인 경우의 회로 방정식이고, 방정식 (2)-(4)는 SW1과 SW2가 모두 닫혀 있을 때 퀘치가 발생한 SFCL 소자의 경우이다. 전원 전압과 변압기 권선의 내부 임피던스는 그것을 무시할 수 있는 값이기 때문에 여기서 고려하지 않았다. 방정식에서 R_{SFCL} 은 퀘치 시 SFCL 소자에서 발생한 저항이고, ϕ_x 는 자기자속을 설명하며, ϕ_{xy} 는 상호 결합자속을 의미한다.

$$R_L i_0 + \frac{d\phi_0(i_0)}{dt} + \frac{d\phi_{01}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{02}(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{03}(i_3)}{dt} = V_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$\{R_{SFCL1}(i_1, B, T)\}i_1 + \frac{d\phi_1(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{10}(i_0)}{dt} + \frac{d\phi_{12}(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{13}(i_3)}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\{R_{SFCL2}(i_2, B, T)\}i_2 + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{20}(i_0)}{dt} + \frac{d\phi_{21}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{23}(i_3)}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$\{R_{SFCL3}(i_3, B, T)\}i_3 + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_{30}(i_0)}{dt} + \frac{d\phi_{31}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{32}(i_2)}{dt} = 0 \quad (4)$$

회로 소자들의 값은 YBCO 박막의 임계전류와 켄치 시작점을 고려하여 결정된다. 실험 데이터는 다채널 디지털장치를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

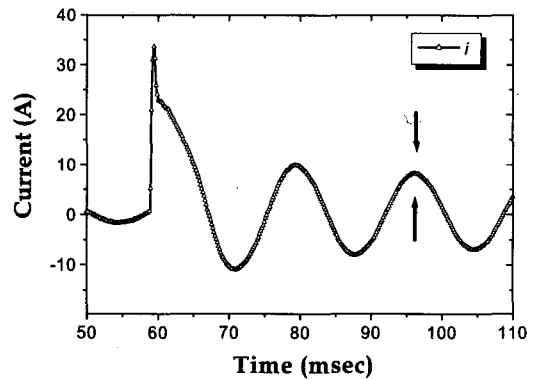
전력 시스템에 SFCL을 공급하는데 있어 가장 중요한 점 중 하나는 SFCL의 정격전압을 증가시키는 것이다. 그러므로 우리는 직렬로 SFCL 소자를 연결하였다. 이번 연구에서는 실험을 위해 3개의 SFCL 소자를 사용하였다. SFCL 소자들의 개별적인 I-V 곡선은 그림 1에서 보여준다. I-V 특성은 하이브리드형 SFCL이 AC 전력 시스템에 공급될 것이기 때문에 AC 전원으로 측정하였다. 소자들의 켄치 전류 I_q 는 약간의 차이점이 있다는 것을 수치를 통해서 볼 수 있다. SFCL1, SFCL2, SFCL3의 켄치 전류는 각각 20.8, 22.6, 19.7 A이었다. I_q 는 실제적인 공학관점에서 보는 임계전류 밀도로서 온도의 상승으로부터 켄치가 시작될 때의 전류라고 정의되었다. 여기서 켄치 전류(I_q)의 기준선은 그림 2에서 1 mV/cm이었다. 각각 SFCL 소자의 상전이 특성을 조사하기 위해 우리는 수식 $E=k(i)^n$ 을 이용하여 소자 각각의 n-value가 1에서 10 mV/cm까지의 등급에서 12.7, 16.8, 11.8 mV/cm임을 확인하였다. 우리는 상전이 시 더 높은 I_q 값이 더 좋은 특성을 보임을 확인하였다. 그림 3(b)는 그림 1(a)에서 보여준 3개의 SFCL 소자가 단순 직렬 연결된 회로를 사용하여 전압 220 V_{rms}를 공급하였을 때의 전압곡선을 보여준다. 따

라서 그림 2와 이전의 방정식으로부터 예상할 수 있는 것처럼, SFCL3가 먼저 켄치되고 다음으로 SFCL1이 켄치된 다음 SFCL2는 켄치가 되지 않았다. 켄치 시작점의 차이는 SFCL 소자들 사이에서의 불균형적인 전력분담을 발생시킨다.

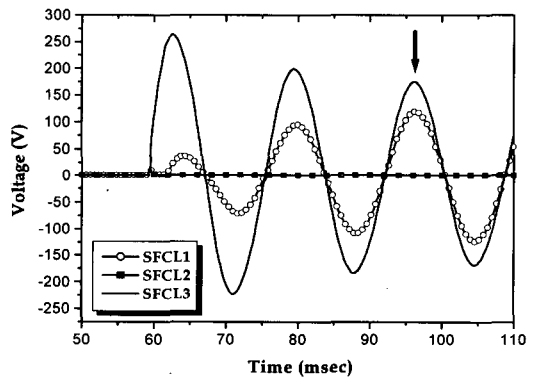
식 (1)-(4)와 같이 단순하게 다시 쓸 수 있다.

$$R_L i_0 = V_0 \sin \omega t \quad (5)$$

$$(R_{SFCL1} + R_{SFCL2} + R_{SFCL3}) i_0 = V_0 \sin \omega t \quad (6)$$



(a)



(b)

그림 3. 단순 직렬 연결된 SFCL의 전기적 특성 (전원 전압 : 220 V_{rms}).

Fig. 3. Electrical properties of three SFCLs connected simply in series (applied voltage : 220 V_{rms}). (a) Current curve of the circuit. (b) Voltage curves of three SFCLs.

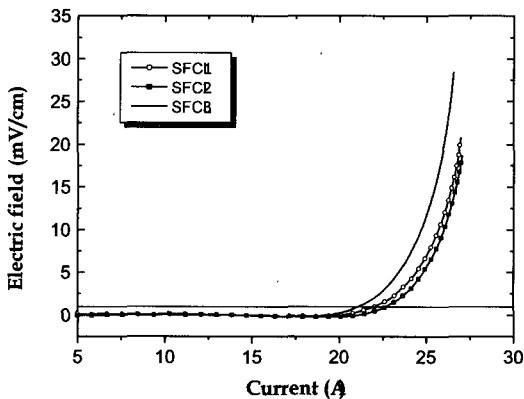


그림 2. 초전도 소자의 I-V 곡선.

Fig. 2. I-V curves of individual SFCL units.

따라서 SFCL3는 퀘치의 초기 기간동안 공급된 모든 전력을 부담한다. SFCL3의 저항은 초전도 소자의 온도가 190 K일 때 실험한 그림 3(a)와 (b)에 화살표로 표시된 점에서 23 Ω 을 나타냈다. 그림 3(a)에서 보여준 전류는 발생된 열에 의해 초전도 소자의 온도가 상승하였기 때문에 SFCL 소자의 퀘치 전류는 다음 주기에서부터 감소하였다. 그 결과 우리는 단순 직렬연결에서 더 이상 전압 등급을 증가시킬 수 없었다. 바꾸어 말하면, 전류 제한 소자의 동시퀘치는 직렬연결에서 매우 중요하다. 더 높은 전압으로 인해 증가된 입력전력은 전력 분담의 초기 불균형을 감소시킨다. 그러나 사고 초기의 온도 증가율은 낮은 전압일 때보다 더 높게 발생한다.

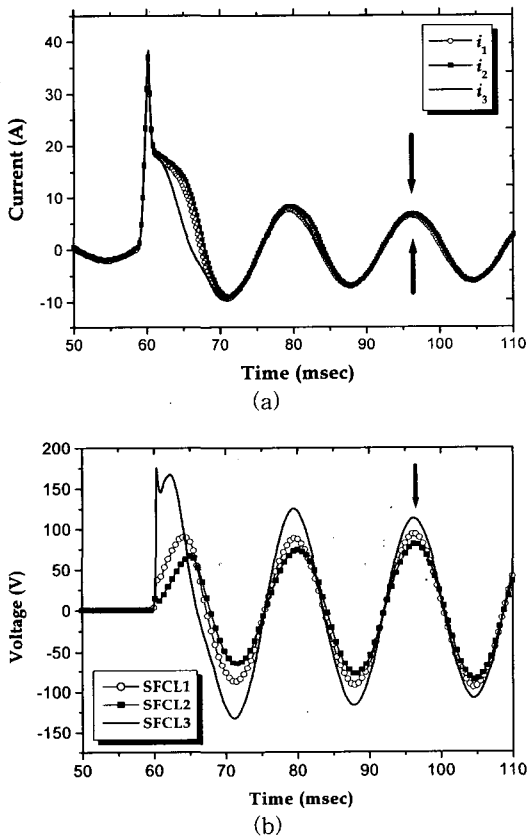


그림 4. 하이브리드형 SFCL의 전기적 특성(전원 전압 : 220 V_{rms}).

Fig. 4. Electrical properties of SFCL units in a hybrid type SFCL (applied voltage: 220 V_{rms}). (a) Current curves of three SFCLs. (b) Voltage curves of three SFCLs.

SFCL 소자 사이의 이러한 전력 불균형을 감소시키기 위한 방법으로서 우리는 그림 1(b)에서 보는 것과 같이 3개의 변압기를 사용하였다. 변압기들은 다른 것들과의 접촉을 제거하기 위해 충분한 거리로 분리되어 있다. 그것들의 1차 권선은 서로 직렬로 연결되어 있고, 각각의 2차 권선에는 SFCL1, SFCL2, SFCL3가 연결되어 있다. 각 변압기의 1·2차 권선의 권선비는 1:1이다. 즉, 1·2차 권선에 흐르는 전류는 같다. 그림 4는 공급 전압이 220 V_{rms}일 때의 전기적 특성을 보여준다. 우리는 변압기간에 연결이 되지 않을 정도로 거리를 유지하고, 변압기와 연결되는 케이블을 서로 꼬아서 액체질소에 담긴 SFCL 소자와 연결하여 실험하였다. SFCL 소자에서의 퀘치는 동시에 시작하지만

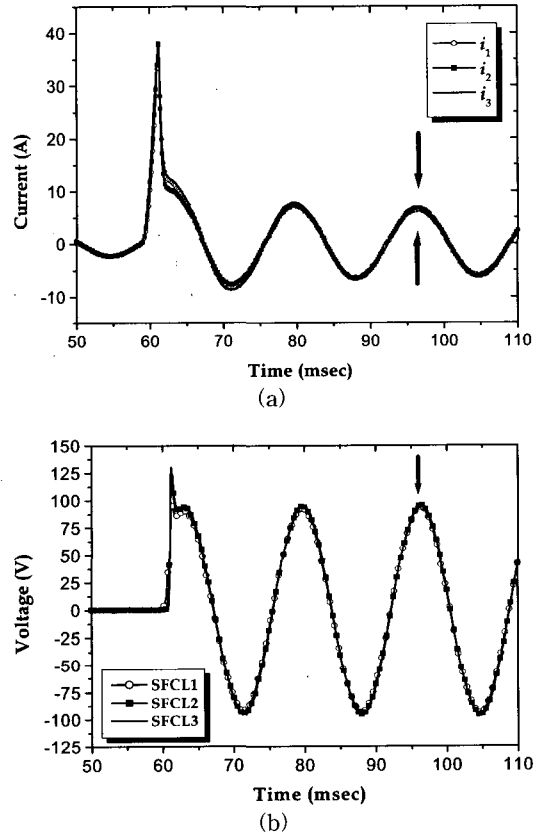


그림 5. 하나의 강자성체 철심을 사용한 SFCL의 전기적 특성(전원 전압 : 220 V_{rms}).

Fig. 5. Quench properties of SFCL units using a single ferromagnetic core(applied voltage: 220 V_{rms}). (a) Current curves of three SFCLs. (b) Voltage curves of three SFCLs.

SFCL 소자에 발생하는 전압은 다르다. 전압의 경우에는 예상한 바와 같이 그림 2의 I_q 값과 반대였다. 켄치특성은 단순 연결과 비교하여 개선되었으나, 이 방법은 여전히 약간의 전력 불균형을 나타내었다. 방정식 (1)-(4)는 이 배치에서는 존재하지 않는 2차 권선들 사이에서의 쇄교 자속으로부터 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$R_L i_0 + \frac{d\phi_0(i_0)}{dt} + \frac{d\phi_0(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{02}(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{03}(i_3)}{dt} = V_0 \sin \omega t \quad (7)$$

$$\{R_{SFCL1} (i_1, B, T) i_1\} + \frac{d\phi_1(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{10}(i_0)}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$\{R_{SFCL2} (i_2, B, T) i_2\} + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{20}(i_0)}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$\{R_{SFCL3} (i_3, B, T) i_3\} + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_{30}(i_0)}{dt} = 0 \quad (10)$$

방정식 (5), (6)과 함께 (7)-(10)을 비교하여, 변압기의 2차 권선에 연결된 SFCL 소자의 켄치는 각 변압기의 1·2차권선 사이의 쇄교 자속 때문에 가속이 되었음을 확인하였다. 이러한 전력불균형을 더욱 감소시키기 위해, 그림 1(c)에서 보여준 바와 같이 하나의 강자성체 철심을 사용하여 2차 권선들 사이에서의 쇄교 자속을 늘렸다. 그림 5는 이러한 배치로 연결된 SFCL 소자의 켄치 특성을 나타낸다. SFCL 소자의 켄치 시작점은 모두 같고, 그들의 전압은 SFCL1, SFCL2, SFCL3사이에서 균일하게 분배되었다. 그림 5(a), (b)에 화살표로 표시된 점에서 SFCL1의 저항은 SFCL 소자들의 동시 켄치 때문에 16 Ω만 나타났다. 이러한 결과는 방정식 (7)-(10)과 대조하여 2차 권선에 있는 SFCL 소자 사이에 상호 쇄교 자속을 포함하고 있는 방정식 (1)-(4)로부터 설명할 수 있다.

다음으로 SFCL 소자 사이에서의 동시켄치 메커니즘을 조사하기 위해 켄치 시작시점 부근의 켄치 특성을 그림 6(a), (b)에서 보여준다. 그림에서 전류는 2차 권선이 완전히 독립적이지 못하기 때문에 발생하는 위상차로 i_1, i_2, i_3 순서로 증가하였고 전압 또한 같은 순서로 나타났다. SFCL1이 켄치되

었을 때 i_2 와 i_3 는 상호 쇄교 자속 때문에 증가하였고, SFCL2의 켄치는 빠르게 발생하였다. 그때, i_3 는 더 증가했고, SFCL3는 급격히 켄치점에 도달했다. 그림 6(a)에서 “current redistribution line”이라 표시된 지점을 보면 SFCL3의 전류가 표시점 이후에 급격히 떨어지고, SFCL1과 SFCL2의 전류는 상승하였다가 다시 떨어지는 것을 볼 수 있었으며, 그 이후에는 세 개의 과형이 같게 되었다. 전류는 3개의 SFCL 소자 사이에서 상호 쇄교 자속이 정확히 분배되기 때문에 재분배되었다고 할 수 있다. 이와 같이 상호 쇄교 자속으로 연결된 SFCL 소자들은 전압울에 관해서는 직렬로 연결된 것처럼 작동하고, 전류의 재분배에 관해서는 병렬 연결된 것처럼 동작하였다. 즉, 비록 개개의 SFCL 소자간의

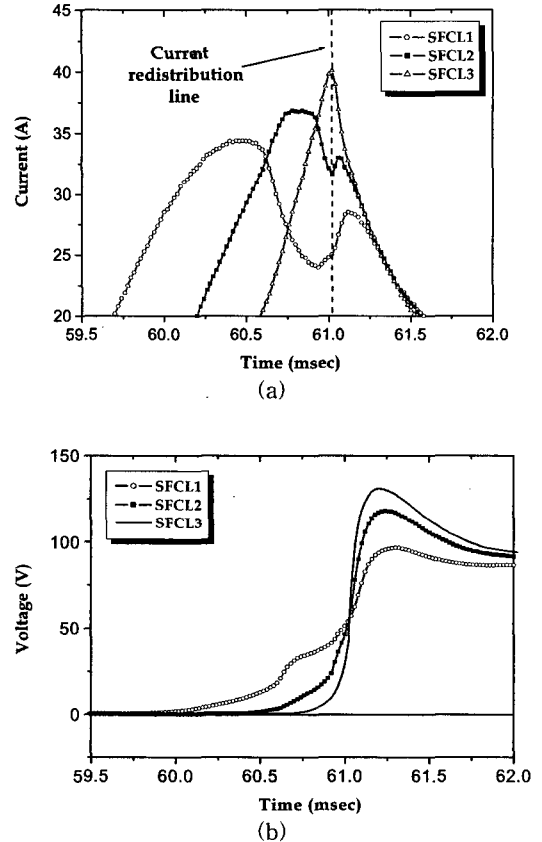


그림 6. SFCL의 켄치 특성(전원 전압 : 220 V_{rms}).
 Fig. 6. Quench properties of SFCL units (applied voltage: 220 V_{rms}). (a) Current redistribution curves. (b) Voltage curves.

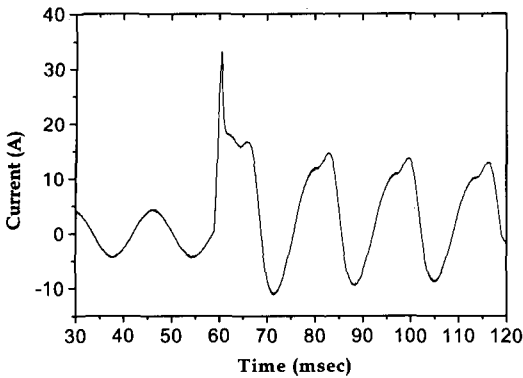


그림 7. 하이브리드형 SFCL의 전류 제한 곡선.
 Fig. 7. The current limiting waveform of a hybrid type SFCL(applied voltage: 440 V_{rms}).

퀵 시작점에 약간의 차이점이 있다 할지라도, 그들의 퀵치는 2차 권선 사이에서의 자속 결합 때문에 거의 동시에 발생하였다.

이것은 SFCL 소자들의 특성을 정확히 동일하게 제작하기가 어렵기 때문에 전력 시스템에서 SFCL의 정격 전압 증가에 있어 중요한 점이다. 그림 7은 440 V_{rms} 전압 전압일 때 그림 1(c)의 연결구조에서 하이브리드형 SFCL의 종합적인 전류 제한 특성을 보여준다. 퀵치는 사고 발생 후 2.5 msec 이내에 종결되었다. 이 시간은 전력 시스템의 다양한 장치들이 높은 사고 전류로부터 충격을 받지 않을 정도로 충분히 짧은 시간이다. 사고 전류는 사고 발생 후 SFCL 소자에서 발생한 저항으로 최대 33 A_{peak} 이하로 제한되고, 3주기 이후에는 약 12 A_{peak} 까지 감소되었다. SFCL이 연결되지 않았다면 사고 전류는 293 A_{peak} 까지 증가할 것이다. 사고 발생 후 전류 파형의 왜곡은 변압기로부터 발생하는 고주파에 의해 발생하였다.

4. 결론

전력 시스템에서 초전도 사고 전류 제한기의 정격 전압을 증가시키기 위하여, 직렬로 SFCL 소자를 연결하였다. 그러나 SFCL 소자의 단순 연결 시 소자 사이에서의 퀵 전류 밀도 차이 때문에 가혹한 전력 불균형이 발생하였다. 비록 3개의 SFCL 소자 사이에서 퀵 전류 밀도의 차이가 최대 13% 이내이지만, SFCL 소자는 3주기 이후부터 퀵

되지 않았다. 이러한 경우 정격 전압은 퀵된 SFCL 소자가 사고 기간동안 대부분의 전력을 감당하기 때문에 더 증가시킬 수 없다. 그러므로 각각의 SFCL 소자는 이러한 전력 불균형을 제거하기 위해 동시에 퀵치가 발생하도록 했다.

하이브리드형 SFCL에서 SFCL 소자 사이의 상호 쇄교 자속으로부터 동시 퀵치를 포함한 해결책을 제안했다. SFCL 소자들이 1·2차권선 사이의 결합으로부터 부분적으로 연결이 되었을 때, 퀵치 시작점들 사이의 차이는 단순 연결을 한 것보다 더 작게 되었다. 그러나 그 차이는 여전히 존재했다. 이것은 2차권선의 자속 경로가 3개의 독립된 철심의 사용으로 영향을 서로 받지 않았기 때문이었다. 그러나 1개의 철심을 사용했을 때, 퀵치 전류 밀도의 차이를 갖는 3개의 SFCL 소자들은 같은 정격 전압에서 모두 동시에 퀵치되었다. 이것은 쇄교 자속이 1개의 자속경로를 갖는 2차 권선으로부터 서로 쇄교되는 자속이 강해졌기 때문이다. 이것은 주어진 YBCO 박막으로 정격전압의 증가를 가능하게 한다. 그러나 이는 전력 시스템에 하이브리드형 SFCL을 적용하는데 있어 불가피한 대형화, 적은 전력손실, 변압기 철심에서 나타나는 파형의 왜곡과 같은 몇 가지 문제점이 여전히 남아있다.

참고 문헌

- [1] M. Noe and B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems", IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 9, p. 1347, 1999.
- [2] V. Meerovich, V. Sokolovsky, J. Bock, S. Gauss, S. Goren, and G. Jung, "Performance of an inductive fault current limiter employing BSCCO superconducting cylinders", IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 9, p. 4666, 1999.
- [3] R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs, and P. Lahl, "Current limiting properties of superconducting $YBa_2Cu_3O_7$ films on various substrates", IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 7, p. 1021, 1997.
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth, H. W. Neumuller,

- and S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 7, p. 828, 1997.
- [5] K. Tekletsadik, M. Saravolac, and A. Rowley, "Development of a 7.5 MVA superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 9, p. 672, 1999.
- [6] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, and S.-J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 2418, 2001.
- [7] H.-R. Kim, H.-S. Choi, H.-R. Lim, I.-S. Kim, and O.-B. Hyun, "Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin films", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 2414, 2001.
- [8] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, "15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성", *전기전자재료학회논문지*, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [9] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 켄치전파", *전기전자재료학회논문지*, 13권, 4호, p. 337, 2000.
- [10] 김태중, 강형구, 고태국, "유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작", *전기전자재료학회논문지*, 16권, 12호, p. 1292, 2003.