

코일 형태로 제작한 박막형 고온초전도 전류제한기의 특성 해석

論 文

49A-8-8

Characteristics of a Coil type Fault Current Limiters using a High- T_c Superconducting Thin Film

鄭 東 哲* · 崔 孝 祥** · 朴 鍾 廣*** · 林 成 勳*** · 高 健 文*** · 韓 秉 誠§

(Dong-Chul Chung · Hyo-Sang Choi · Jong-Kwang Park · Sung-Hun Lim · Gon-Mun Go · Byoung-Sung Han)

Abstract - In this paper, we reported the current limiting properties of superconducting fault current limiters (SFCL). Our SFCL was patterned in a coil-type on a YBCO film deposited using rf sputtering techniques and was coated with a gold shunt layer in order to disperse the heat generated at hot spots in the YBCO film. Current increased up to 13.5 A_{peak} at 60 Hz for the voltage of 11.5 V_{peak} , which is the minimum quench point, and increased up to 17.6 A_{peak} at 60 Hz for the voltage of 80 V_{peak} . The quench completion time was 5 msec at 11.5 V_{peak} and 4 msec at 80 V_{peak} respectively. We think that this architecture using coil-type SFCL can be useful for the protection of the power delivery systems from fault currents.

Key Words : Superconducting fault current limiters, YBCO film, Quench completion time

1. 서 론

전력수요의 폭발적인 증가와 더불어 전력전송 용량의 대폭적인 확장으로 인해 사고 위험의 범위 또한 광범위해지고 있는 것이 오늘의 현실이다. 국내의 경우 1998년에 설치된 차단기에 대해 154 KV 선로의 경우 약 1/3 이상이 차단 내력을 초과하고 있고 앞으로도 이 수치는 계속 증가할 전망이다[1]. 이러한 현상을 효과적으로 개선하기 위해 모선분리나 한류 리액터 삽입 등의 방법이 도입되고 있지만 이로 인한 전압 변동의 폭이 크고 공급 전력의 신뢰도 및 안정도 면에서 어려움이 있다[2]. 이러한 측면에서 볼 때 고장 전류 발생 시 수십 msec 내에 신속하게 전류를 제한하는 고온초전도 전류 제한기는 실계통 투입시 많은 잇점을 가져다 줄 것으로 판단된다. 또한 초전도 한류기는 초전도체가 초전도 상태에서 일반 전도 상태로 상전이하면서 발생하는 높은 임피던스를 이용하여 사고전류를 제한하는 장치로서 기존의 전력 계통에 사용되어 오던 기계식 또는 유입식 차단기와는 달리 별도의 부가 장치를 필요로 하지 않는다. 더불어 기존의 합금계(NbTi, NbCu) 저온 초전도 사고 전류 제한기는 액체 헬륨을 냉매로 사용해야만 한다는 점에서 유지 관리가 어려울 뿐만 아니라 액체 헬륨의 공급이 어렵고 고가라는 점 또한 문제점으로 대두된 바 있다. 반면에 고온초전도체

는 액체 헬륨에 비하여 훨씬 가격이 저렴한 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있다는 점에서 주목을 받아왔다. 하지만 고온초전도 물질은 물질의 특성 상, 선재나 케이블 등으로 가공이 어렵다는 문제점 때문에 전력 응용으로 사용하는 것이 주저되어왔다. 그러나 최근 들어 높은 임계전류밀도를 가지는 고온초전도 박막 증착 기술의 개발은 이를 이용한 다양한 전자 소자 개발에 많은 가능성을 열어주었다는 점에서 시사하는 바가 크다. 최근 국내에서도 고온초전도 박막을 이용한 100 V급 차단 내력을 가진 meander line 형태의 저항형 전류 제한기가 제작된 바 있고 이외에도 고온초전도 후막이나 벌크 타입의 고온초전도체를 이용한 저항형 전류 제한기 제작 등도 보고되고 있다[3-4].

초전도 전류 제한기는 한류 방식에 따라 유도형과 저항형으로 나눌 수 있다. 유도형은 대용량화가 용이한 반면 기본구조상 철심 코어 등을 사용하기 때문에 크기가 커지고 히스테리시스 손실 및 철손을 극복해야하는 문제점을 가지고 있다. 반면에 저항형 전류제한기는 구조 및 원리가 간단하고 quench 시간이 빠른 점등 유도형과 다른 유리한 점을 가지고 있기 때문에 국내외 여러 연구팀에 의해서 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-5].

본 논문에서는 YBCO 계 초전도 박막을 이용하여 460 W급에서 동작하는 저항형 한류기를 코일 형태로 제작하였다. 코일형태로 제작된 초전도 한류기는 일반적으로 제작되는 meander line 형태로 제작되는 초전도 한류기와는 달리 임계온도 및 임계전류 부근에서 급격히 발생하는 내부 인덕

* 正 會 員 : 又石大 情報通信컴퓨터工學部 專任講師 · 工博

** 正 會 員 : 韓電 電力研究院 電力系統研究室

*** 正 會 員 : 全北大 電子情報工學部 博士課程

§ 正 會 員 : 全北大 電子情報工學部 教授

接受日字 : 2000年 6月 9日

最終完了 : 2000年 7月 27日

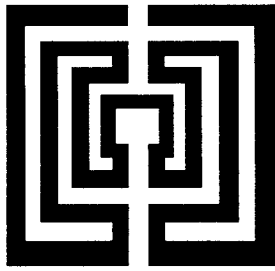


그림 1 제작된 고온초전도 한류소자의 설계 패턴
 Fig. 1 Design patterns for the fabricated HTS fault current limiters

턴스를 효과적으로 상쇄할 수 있다. 제작된 초전도 한류기의 과도 상태 침투값과 소비전력을 분담하기 위해서 박막 위에 금층을 입힌 경우에 대해 회로를 구성, 사고 전류에 대한 quench 특성과 전류 제한 특성을 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1 코일형 고온초전도 전류 제한기의 제작

본 실험에 사용한 고온초전도 한류소자는 2 cm × 2 cm 크기의 MgO 기판 위에 성장된 두께 300 nm의 YBCO 박막을 이용하여 제작하였다. 임계 온도와 임계 전류 밀도는 각각 90 K와 2×10⁵ A/cm² 이었다. 또한 퀠치 시 발생하는 열점(hot spot)의 열적 분포 역할을 담당하기 위해 YBCO 박막 위에 300 nm 두께의 금층을 sputtering을 이용해 증착하였으며 폭 1 mm 간격 0.5 mm 길이 14 cm의 초전도 선로를 그림 1과 같이 코일 형태로 제작하였다. 초전도 선로의 제작을 위해 표준 식각법을 사용하였으며 식각 용액으로 EDTA 용액과 왕수를 각각 사용하였다.

2.2 전류제한 특성 측정용 실험 장치의 구성

제작된 코일형 전류 제한기의 퀠치 특성 및 사고전류 제한 특성을 알아보기 위하여 그림 2와 같이 실험 장치를 구성하였다. 그림에서 V_S는 전원 전압이고 I_S는 전원전류, R_S는 전류 변화를 측정하기 위한 표준저항이며 한시동작 접점 스위치를 이용하여 과전류에 의한 초전도 박막의 소손을 방지하였다. 또한 금층이 증착된 코일형 전류 제한기에서 금층의 저항을 R_{gold}로, 퀠치가 발행했을 때 고온초전도층의 저항을 R_{YBCO}로 모델링했으며 전류 제한기에서 이들 두 저항이 병렬로 연결된 형태로 간주하였다. 이때 부하저항 R_{Load}는 퀠치시 가혹한 전압 조건을 인가하기 위해 통상 저항보다 높은 32 Ω로 하였고 코일형 전류 제한기의 상온 저항은 35.5 Ω이었다.

실험 기간 동안 전류 제한기 샘플은 액체 질소 속에 잠겨 있도록 하였다. 위 실험 회로에 근거하여 초전도 상태에서 일반 전도 상태로의 상전이 할 때의 전압은 다음 식으로 표시될 수 있다.

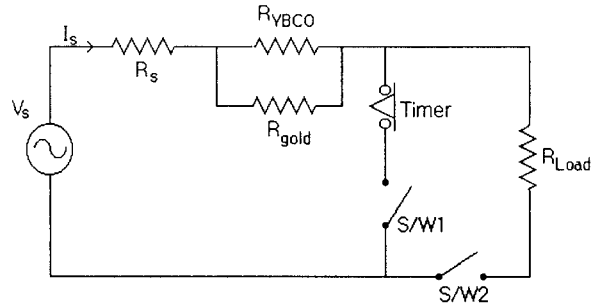


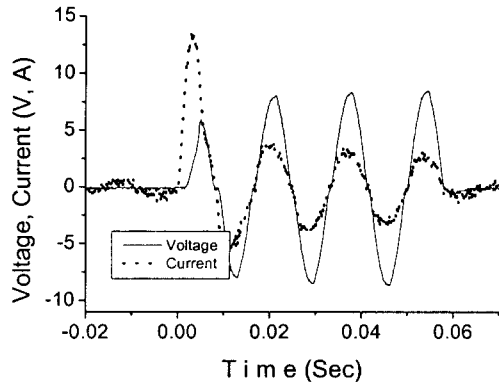
그림 2 전류제한 특성 측정을 위한 실험 장치
 Fig. 2 Experimental system for HTS fault current limiters

$$V_S = (R_S + \frac{R_{gold}R_{YBCO}}{R_{gold} + R_{YBCO}}) \cdot I_S \quad (1)$$

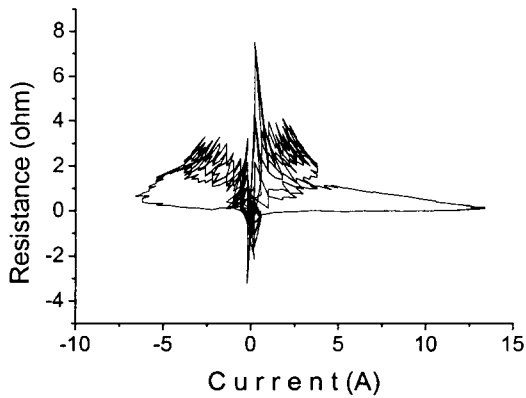
실험 회로의 정격 전압은 V_S는 1 V_{peak}에서부터 80 V_{peak}까지 변화해가면서 가변 하였으며 상용 전력 주파수인 60 Hz를 정격 주파수로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

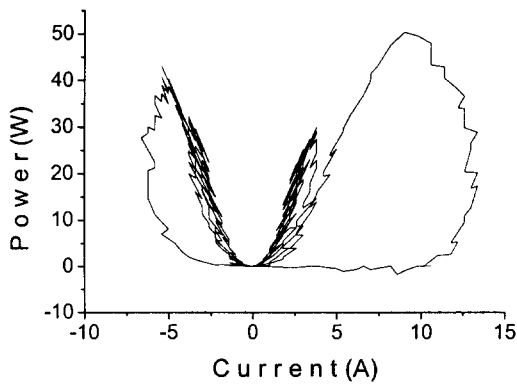
그림 2의 회로를 기준으로 최초 퀠치 시작전압에서부터 최대 80 V_{peak}까지 전압을 가변하면서 전기적 특성을 측정하였다. 그림 3은 인가 전압 V_S를 11.5 V_{peak}로 하고 표준 저항 R_S를 1Ω, 부하저항 R_{Load}를 32 Ω, 사각각을 0°로 했을 때 최초 전압 11.5 V_{peak}에서 quench가 발생한 경우에 대하여 전기적 특성을 도시한 것이다. 먼저 그림 3의 (a)에서 사고가 나기전 정상 전류는 0.7 A_{peak}였으며 선로 고장이 발생하는 순간, 사고전류가 유입되면서, 0.30 msec 후, 최대 13.5 A_{peak}의 전류값을 나타낸 다음 전류가 점차로 감소함을 볼 수 있다. 이때 부분퀠치에서 완전 퀠치로 이행되는 시간이 후술하게될 높은 인가 전압에 비하여 길어지는데 이러한 이유는 낮은 인가전압으로 인해 퀠치의 진행이 상대적으로 느리게 진행되기 때문이다. 이와는 반대로 전압의 경우 사고가 발생하기 전, 초전도 전류제한기 양단의 저항은 '0'이므로 전압값을 나타내지 않다가 quench가 발생한 직후부터 전압이 발생하여 점점 증가하는 형태를 보여주고 있다. 한편, 그림 3 (b)와 그림 3 (c)는 그림 3 (a)로부터 계산한 저항값과 소비전력을 나타낸 것이다. 저항곡선의 경우 퀠치가 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 2~4 Ω의 저항값에서 주로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이때 그림에서 '0' 전류 값을 중심으로 급격한 저항의 증가가 나타남을 볼 수 있는데 이는 교류 전류와 전압이 '0' 값을 가질 때 보여지는 계산 상의 오류이며 이러한 결과는 참고문헌 [5]과 잘 일치함을 알 수 있다. 마지막으로 소비전력을 나타내는 그림 3의 (d)를 살펴보면 최초, 전력 값이 '0'이고 퀠치가 발생한 직후부터 전력값이 증



(a)



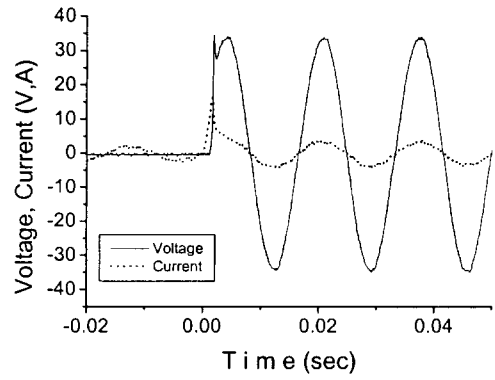
(b)



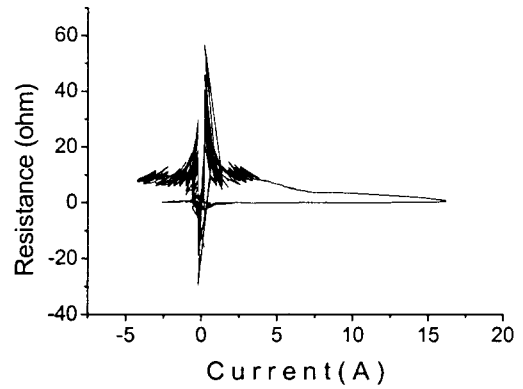
(c)

그림 3 최초 Quench 시점인 11.5 V_{peak} 에서 전기적 특성;
(a) 전류,전압-시간곡선 (b) 저항-전류곡선
(c) 전력-전류곡선.

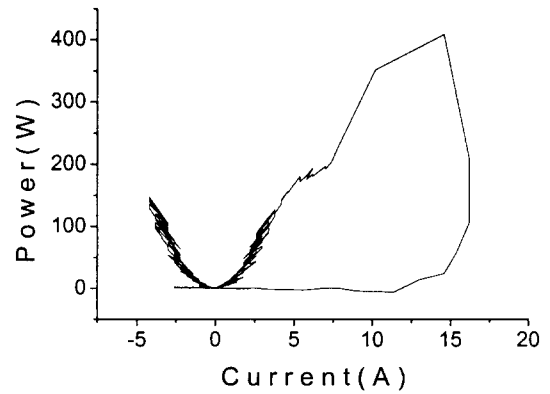
Fig. 3 Electrical properties at minimum quench of 11.5 V_{peak} ;
(a) Current and voltage - time curve
(b) resistance-current curve and
(c) power - current curve.



(a)



(b)



(c)

그림 4 인가전압 38.4 V_{peak} 시점에서 전기적 특성 ;
(a) 전류,전압 - 시간곡선 (b) 저항 - 전류곡선
(c) 전력 - 전류곡선.

Fig. 4 Electrical properties at 38.4 V_{peak} ;
(a) Current and voltage - time curve
(b) resistance-current curve and
(c) power-current curve.

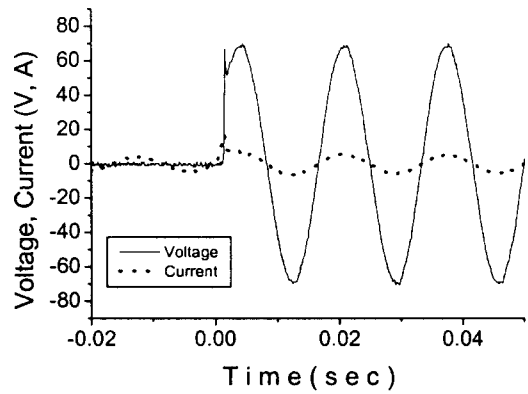
가하여 8.2 A_{peak} 에서 50.5 W에 달함을 알 수 있다. 이때

전류가 음 성분을 가지면서 전류제한기의 저항성분이 quench

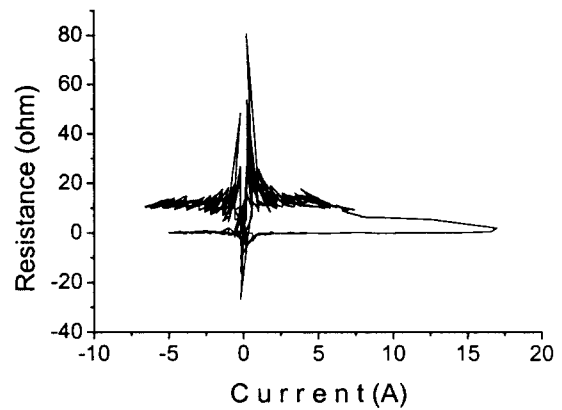
전파에 따라 증가하고 전류값이 감소하면서 43 W까지 증가했다가, 30 W에서 안정된 전력값을 보여주며 발진(oscillation)함을 알 수 있다. 이러한 과정은 코일 형태 전류제한기의 저항발생 메카니즘으로 이해될 수 있다. 먼저 상기에 설명된 과정은 코일 형태의 초전도체에서 사고 전류 유입에 따른 부분적인 퀘치가 발생한 다음 시간이 흐르면서 완전한 퀘치로 진행되기 때문으로 보여지며 이 시간 동안 소비 전력이 증가하는 것으로서 추정이 가능하다. 또한 선로 고장에 따른 사고가 발생한 후 코일형 전류제한기의 병렬 저항으로 작용하는 급층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력 증가가 발생하는 것으로 판단된다. 급층의 저항증가는 냉매로 사용되는 액체 질소의 냉각이 퀘치 시 생성되는 기포의 영향과 액체 질소 고유의 열전달 속도로 인하여 발생하는 열을 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 여겨지며 약 3 주기가 지나가면 일정한 값으로 포화되어 발진함을 알 수 있었다.

그림 4는 동일한 코일형 초전도 전류제한기에 인가 전압 V_S 를 $38 V_{peak}$ 로 표준 저항 R_S 를 1Ω , 부하저항 R_{Load} 를 32Ω , 사고각을 0° 로 했을 때 quench가 발생한 경우에 대하여 전기적 특성을 도시한 것이다. 먼저 그림 4의 (a)에서 사고가 나기전 정상 전류는 $2.2 A_{peak}$ 였으며 선로 고장이 발생하여 사고 전류가 증가하기 시작, 0.16 msec 후, 최대 $17.2 A_{peak}$ 의 전류값까지 증가하였다가 감소함을 볼 수 있다. 전압의 경우는 그림 3의 경우와 마찬가지로 사고가 발생하기 전, 초전도 전류제한기 양단의 저항은 '0'이므로 전압값을 나타내지 않다가 quench가 발생하여 저항이 증가하면서부터 전압이 발생하여 점점 증가하는 형태를 보여주고 있다. 더불어 그림 4 (b)와 그림 4 (c)는 그림 4 (a)의 전압값과 전류값으로부터 계산한 저항값과 소비전력을 나타낸 것이다. 이때 퀘치가 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 8~18 Ω 의 분포를 보여주는 것을 알 수 있다. 이때 저항 곡선을 살펴보면 그림 3 (b)의 저항곡선에 비하여 상당히 안정된 곡선을 보여주는 데 이는 인가 전압이 $38 V_{peak}$ 로 증가함에 따라 초전도 전류제한기 회로 내의 부분 퀘치가 상당히 감소했음을 의미하는 것이다. 따라서 이러한 저항곡선의 안정도는 전압을 높일수록 향상되며 후술하게 될 $80 V_{peak}$ 인가 전압에서 매우 안정된 궤적을 보여준다. 이때 도표에서 '0' 전류 값을 중심으로 급격한 저항의 증가가 나타남을 볼 수 있는데 전술하다시피 이는 교류 전류와 전압이 '0' 값을 가질 때 보여지는 계산상의 오류이다. 마지막으로 소비전력을 나타내는 그림 4의 (c)를 살펴보면 최초, 전력 값이 '0'이었다가 퀘치가 발생한 직후부터 전력값이 증가하여 $14.7 A_{peak}$ 에서 $408.7 W$ 에 달함을 알 수 있다. 이때 전력 곡선의 좌반면이 그림 3의 (c)와는 달리 급격한 전력의 증가가 일어나지 않고 있음을 알 수 있는데 이는 인가 전압의 증가에 따른 부분 퀘치가 감소되어 나타나는 현상으로 이해될 수 있다. 이후 전력 곡선은 150 W와 130 W 사이에서 진동을 하며 약간씩 증가하며 이때 전류값은 -5 A에서 5 A사이에서 진동하고 있음을 알 수 있다.

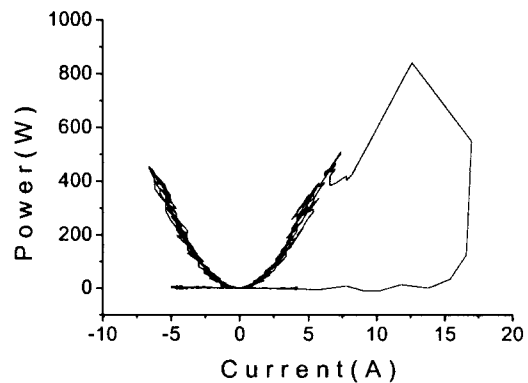
그림 5는 최종적으로 전압 V_S 를 $80 V_{peak}$ 까지 인가하고



(a)



(b)



(c)

그림 5 인가전압 $80 V_{peak}$ 시점에서 전기적 특성; (a)전류,전압 - 시간곡선 (b) 저항 - 전류곡선 (c) 전력 - 전류곡선.

Fig. 5 Electrical properties at $80 V_{peak}$; (a) Current and voltage - time curve (b) resistance-current curve and (c) power - current curve.

여타의 조건은 앞절과 동일하게 취했을 때 사고전류 유입과 퀘치 발생 시점에서 3주기 동안의 전기적 특성을 도시한 것이며 이때 사고각은 0° 였다. 그림 5의 (a)를 살펴보면 최

초 사고가 발생 하기 전 정상 전류는 4.1 A_{peak} 였으며 선로 고장이 발생하여 사고 전류가 증가하기 시작, 0.14 msec 후 최대 17.6 A_{peak} 의 전류값을 보였다가 이에따른 저항이 증가하기 시작하여 전류가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 전압의 경우는 그림 3이나 4의 경우와 마찬가지로 사고가 발생 하기 전, 초전도 전류제한기 양단의 저항은 '0'이므로 전압값을 나타내지 않다가 quench가 발생하여 저항이 증가하면서 부터 전압이 발생하여 점점 증가하는 형태를 보여주고 있다. 그림 5 (b)와 그림 5 (c)는 그림 5 (a)의 전압값과 전력값으로부터 계산한 저항값과 소비전력을 나타낸 것이다. 저항 곡선의 경우 퀀치가 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 10~22 Ω 의 저항분포를 보여주며 전류값 -7 A에서 7 A사이에서 발진을 하고 있음을 보여준다. 이는 전술하다시피 그림 3의 11.5 V_{peak} 에 비해 훨씬 높은 전압치를 인가함에 따라 전류제한기의 초전도 회로에 부분 퀀치가 상당부분 감소했기 때문으로 여겨진다. 소비전력을 나타내는 그림 5의 (c)를 살펴보면 최초, 전력값이 '0'이었다가 퀀치가 발생한 직후부터 전력값이 증가하여 12.5 A_{peak} 에서 823 W에 달함을 알 수 있다. 퀀치직후 최대 전류 17.6 A_{peak} 와 최대 전력일 때 전류값 12.5 A_{peak} 가 일치하지 않는 이유는 퀀치직후에는 아직 초전도 전류제한 소자의 퀀치가 충분히 이루어지지 않아 전압발생이 상대적으로 적기때문으로 사료된다. 이후 퀀치가 진행됨에 따라 전력 곡선은 450 W와 500 W 사이에서 진동을 하며 약간씩 증가하며 이때 전류값은 -6 A에서 6 A사이에서 진동하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

전력계통의 사고전류에 신속하게 대처할 수 있는 새로운 개념의 초전도 한류기 중에서 YBCO 박막을 이용한 코일 형태의 저항형 한류기를 설계하고 퀀치 특성 및 사고 전류제한 특성, 전압, 저항 및 전력의 변화 특성에 대하여 고찰 하였으며 다음과 같은 특성을 얻었다.

인가 전압 11.6 V_{peak} 이고 표준 저항이 1 Ω , 부하저항이 32 Ω 일때 정상 전류는 0.67 A_{peak} 였다. 사고 전류는 인가후 0.3 msec만에 최대 13.5 A_{peak} 까지 상승하였다.

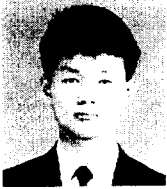
인가전압 $V_s = 80 V_{peak}$ 일 때 사고 전류 인가 후 0.14 msec 이후에 17.6 A_{peak} 에서 최대 한류 전류값을 보인 후 5.8 A_{peak} 에서 안정되었다. 이러한 과정은 코일 형태 전류제한기의 저항 발생 메카니즘으로 이해될 수 있다. 먼저 상기에 설명된 과정은 코일 형태의 초전도체에서 사고 전류 유입에 따른 부분적인 퀀치가 발생한 다음 시간이 흐르면서 완전한 퀀치로 진행되기 때문으로 보여지며 이 시간 동안 사고 전류가 증가하는 것으로서 추정이 가능하다. 또한 선로 고장에 따른 사고가 발생한 후 코일형 전류제한기의 병렬 저항으로 작용하는 급층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력 증가가 발생하는 것으로 생각된다. 급층의 저항증가는 냉매로 사용되는 액체 질소의 냉각

이 발생하는 열을 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 여겨지며 약 3 주기가 지나가면 일정한 값으로 포화되어 발진함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강환, "전력계통 고장전류 증대와 대처방안", 전기저널, vol. 5, pp. 24~31, 1998.
- [2] E. Leung, "Surge protection for power grids", IEEE Spectrum, vol. 34, no. 7, pp. 26~30, 1997.
- [3] B. Gromoll, et. al., "Resistive fault current limiters with YBCO films - 100 KVA functional model", IEEE Trans., Appl. Supercond. vol. 9, no. 2, pp. 656~659, 1999.
- [4] 최효상 외, "분로저항이 초전도 한류기에 전류제한효과에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회논문지, 1권 2호, pp. 49-53, 1999.
- [5] 최효상 외, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 전기학회논문지, 48B권, 10호, pp. 537-543, 1999.

저 자 소 개



정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월 20일생. 1994년 전북대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1999년 전북대 반도체 물성연구센터 연구원, 2000년 현재 우석대 정보통신컴퓨터 공학부 전임강사
E-mail : dchung@electric.chonbuk.ac.kr



임 성 훈 (林 成 勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대 전기공학과 졸업. 1998년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 0652-270-2396, Fax : 0652-277-0918
E-mail : dolphine@shinbiro.com



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학교 전기공학과 석사 졸업. 1995년 ~ 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원
Tel : 042-865-5977, H·P : 017-238-3155
E-mail : hschoi@kepri.re.kr



고 건 문 (高 健 文)

1975년 12월 20일생. 1997년 수원대 전기공학과 졸업. 1999년 전북대학교 대학원 전기공학과 입학. 2000년 현재 동 대학 전기공학과 석사과정
E-mail : gm0907@hanmail.net



박 중 광 (朴 鍾 廣)

1971년 12월 2일생. 1997년 호원대 전자공학과 졸업. 1999년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
E-mail : bigtree@electric.chonbuk.ac.kr



한 병 성 (韓 秉 誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이 파스퇴르대학 박사학위취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소)연구원. 현재 전북대 공대 전기공학과 교수
Tel : 0652-270-2396, Fax : 0652-277-0918
E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr