

나선형태로 제작된 고온초전도 한류기의 특성해석

Characterization of the Spiral Type Fault Current Limiters Using High- T_c Superconducting Thin Films

정동철*, 박성진**, 강형곤**, 최효상***, 광민환****, 임해용*****, 황종선*****, 최명호*****, 주철원****,
홍석용****, 이종하****, 한병성**

(Dong-Chul Chung*, Sung-Jin Park**, Hyeong-Gon Kang**, Hyo-Sang Choi***, Min-Hwan Kwak****,
Hae-Ryong Lim*****, Jong-Sun Hwang*****, Myong-Ho Choi*****, Chul-Won Ju****, Suk-Yong Hong****,
Jong-Ha Lee****, Byung-Sung Han**)

Abstract

We reported the current limiting properties of superconducting fault current limiters (SFCL). Our SFCL was patterned in a spiral type on a $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (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 $13 V_{peak}$, which is the minimum quench point, and increased up to $17.6 A_{peak}$ at 60 Hz for the voltage of $141.4 V_{peak}$. The quench completion time was 5 msec at $13 V_{peak}$ and 4 msec at $141.4 V_{peak}$ respectively. We think that this architecture using spiral-type SFCL can be useful for the protection of the power delivery systems from fault currents.

Key Words : Spiral type SFCL, High- T_c superconducting (HTS) thin film, Fault Current Limiters, Quench

1. 서 론

도시 팽창과 산업화로 인한 전력 수요의 증가는

전력전송용량의 대폭적인 확장을 요구하고 있는 형편이며 이로 인해 사고 위험 또한 증가일로에 있다. 현재 국내에 설치된 154 kV급 선로의 경우 약 1/3 이상이 차단 내력을 초과하고 있는 것으로 보고되고 있으며 이 수치는 계속 상승할 것으로 보여진다[1]. 모선분리나 한류 리액터 삽입 등의 방법이 이러한 현상을 효과적으로 제어하기 위해 도입되고 있지만 이로 인한 전압 변동의 폭이 크고 공급 전력의 신뢰도 및 안정도 면에서 어려움이 있다[2].

고온초전도 물질은 전력기기용을 비롯한 통신 소자 및 안테나 등에서 다양한 응용이 모색되고 있다[3-5]. 특히 고온초전도 한류기는 고장 전류 발생 시 수십 msec 내에 신속하게 전류를 제한하는 잇점을 가지고 있기 때문에 전력 계통 투입시 많은 혜택을 가져다 줄 것으로 판단된다. 또한 초전도 한류기

* : 우석대학교 정보통신컴퓨터공학부
(전북 완주군 삼례읍 후정리 490
Fax : 063-290-1453
E-mail : dchung@woosuk.ac.kr

** : 전북대학교 공과대학 전기공학과

*** : 한국전력연구원 전력계통연구실

**** : 전주공업대학 전자과

***** : 전자통신연구원

***** : 표준연구원 초전도 그룹

***** : 담양대학교 전기공학과

***** : 광주보건대학 의료정보학과

2001년 3월 19일 접수, 2001년 5월 2일 1차심사완료

2001년 5월 23일 2차심사완료



그림 1. 제작된 고온초전도 한류기의 설계 패턴.

Fig. 1. Design patterns for the fabricated HTS fault current limiters.

는 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 고가의 냉매를 필요로 하는 저온초전도 응용기반 한류기에 비하여 고온초전도체를 이용한 한류기는 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 단점 때문에 전력용으로 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 1 kV, 125 A급 차단 내력을 가진 meander line 형태의 저항형 한류기가 제작된 바 있고 이외에도 고온초전도 후막이나 벌크 타입의 고온초전도체를 이용한 저항형 한류기 제작 등도 보고되고 있다 [6-7].

초전도 한류기는 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 한류기는 구조 및 원리가 간단하고 quench 시간이 빠른 점등 유도형과 다른 유리한 점을 가지고 있기 때문에 국내외 여러 연구팀에 의해서 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다[7-8].

본 논문에서는 YBCO 계 초전도 박막을 이용하

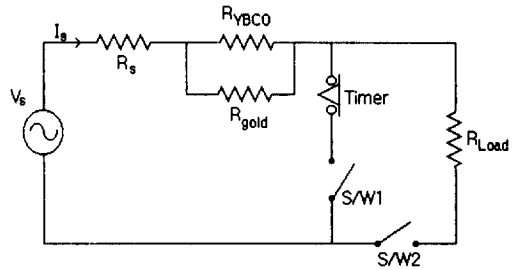


그림 2. 전류제한 특성 측정을 위한 실험 장치.

Fig. 2. Experimental system for HTS fault current limiters.

여 900 W급에서 동작하는 저항형 한류기를 나선 형태로 제작하였다. 나선 형태로 제작된 초전도 한류기는 일반적으로 제작되는 meander line 형태로 제작되는 초전도 한류기와는 달리 meander line 자체에서 발생하는 자기 인덕턴스와 meander line 선간에서 발생하는 상호 인덕턴스를 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 나선형 고온초전도 한류기의 제작

본 실험에 사용한 고온초전도 한류기는 벤치 시 발생하는 열점(hot spot)의 열적 분포 역할을 담당하기 위해 YBCO 박막 위에 300 nm 두께의 금층을 sputtering을 이용해 증착하였으며 1 inch 크기의 LaAlO 기판 위에 성장된 두께 300 nm의 YBCO 박막을 이용하여 제작하였다. YBCO 박막은 그 두께가 대단히 얇은 반면 J_c (약 3 MA/cm²)는 대단히 높기 때문에 국부적인 hot spot에서 발생하는 열을 순간적으로 분산시키지 않으면 용단된다. 따라서 전류 분류 및 열분산을 원활히 하기 위하여 저항값이 낮은 금을 입혔으며 또한 금은 시간이 흘러도 산화가 거의 없기 때문에 aging에도 효과가 있고 수분에 약한 세라믹 초전도체의 단점을 보완하기 위하여 코팅한 측면도 있다. 실험에서 얻어진 정상시 손실은 한류실험이 사고발생 후 3사이클이내에 끝나기 때문에 지속시간이 짧아 거의 무시할 수 있으며 측정이 불가능할 정도이다. 제작된 초전도 박막의 임계 온도

는 각각 90 K였다. 또한 폭 1 mm 길이 24 cm의 초전도 선로를 그림 1과 같이 나선형 형태로 제작하였다. 초전도 선로의 제작을 위해 표준 식각법을 사용하였으며 식각 용액으로 EDTA 용액과 왕수를 각각 사용하였다.

2.2 전류제한 특성 측정용 실험 장치의 구성

그림 2와 같이 실험장치를 구성하여 나선형 한류기의 퀘칭 특성 및 사고전류 제한 특성을 측정하였다. 그림에서 V_s 는 전원 전압이고 I_s 는 전원전류, R_s (1Ω)는 전류 변화를 측정하기 위한 표준저항이며 한시동작 집점 스위치를 이용하여 과전류에 의한 초전도 박막의 소손을 방지하였다. 또한 금층이 증착된 나선형 한류기에서 금층의 저항을 R_{gold} 로, 퀘칭이 발행했을 때 고온초전도층의 저항을 R_{YBCO} 로 모델링했으며 전류 한류기에서 이들 두저항이 병렬로 연결된 형태로 간주하였다. 이때 부하저항 R_{Load} 는 퀘칭시 가혹한 전압 조건을 인가하기 위해 통상 저항보다 높은 32Ω 으로 하였고 나선형 한류기 금층의 상온 저항 즉, R_{gold} 은 35.5Ω 이었다.

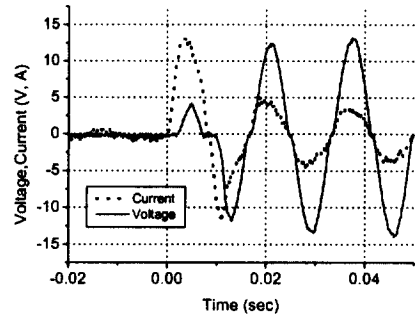
특성 측정 중 한류기 샘플은 액체 질소 속에 잠겨 있도록 하였다. 위 실험 회로에 근거하여 초전도 상태에서 일반 전도 상태로의 상전이 할 때의 전압은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$V_s = (R_s + \frac{R_{gold}R_{YBCO}}{R_{gold} + R_{YBCO}}) \cdot I_s \quad (1)$$

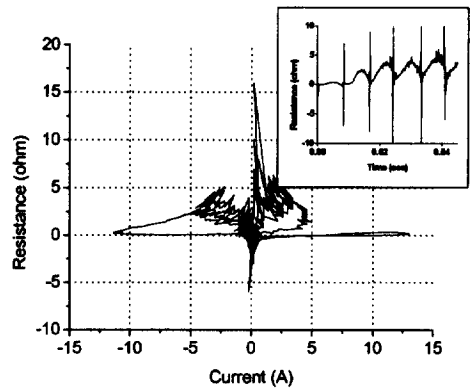
실험 회로의 정격 전압은 V_s 는 $1 V_{peak}$ 에서부터 $141.4 V_{peak}$ 까지 변화해가면서 가변 하였으며 상용 전력 주파수인 60 Hz를 정격 주파수로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

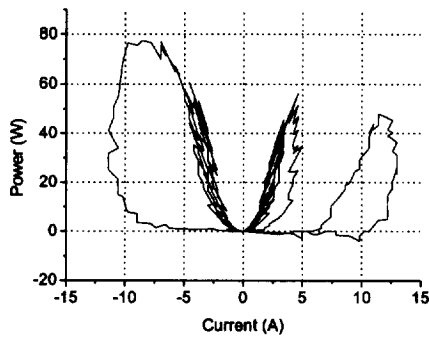
최초 퀘칭 시작전압에서부터 최대 $141.4 V_{peak}$ 까지 그림 2에 나타낸 바와 같이 실험장치를 구성하고 전압을 가변하면서 전기적 특성을 측정하였다. 그림 3은 인가 전압 V_s 를 $13 V_{peak}$ 로 하고 표준 저항 R_s 를 1Ω , 부하저항 R_{Load} 를 32Ω , 사고각을 0° 로 했을 때 최초 전압 $13 V_{peak}$ 에서 quench가 발생한 경우에 대하여 전기적 특성을 도사한 것이다. 먼저 그림 3의 (a)에서 사고가 나기전 정상 전류는 0.4



(a)



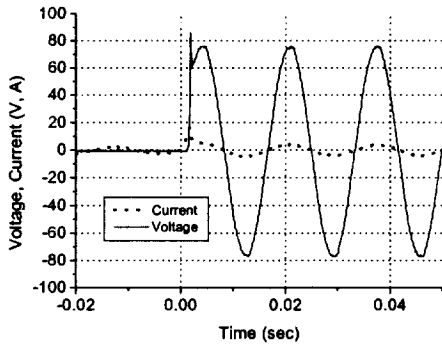
(b)



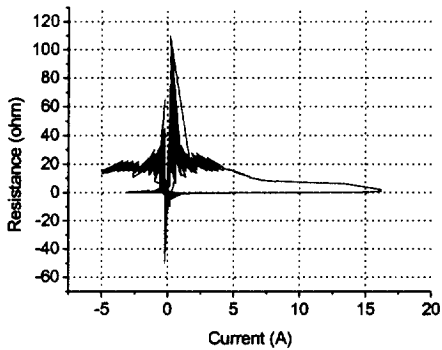
(c)

그림 3. 최초 Quench 시점인 $13 V_{peak}$ 에서 전기적특성 ; (a) 전류,전압-시간곡선 (b)저항-전류곡선, 삽입 그림(저항-시간곡선) (c)전력-전류곡선.

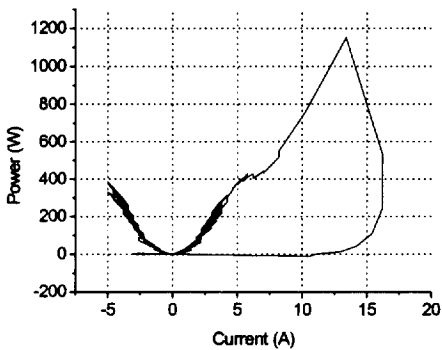
Fig. 3. Electrical properties at minimum quench of $13 V_{peak}$; (a) Current and voltage - time curve (b) resistance-current curve; inset (resistance-time curve) and (c) power - current curve.



(a)



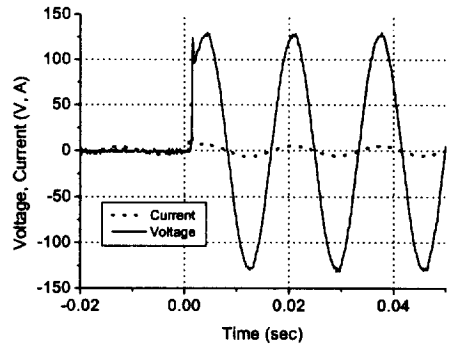
(b)



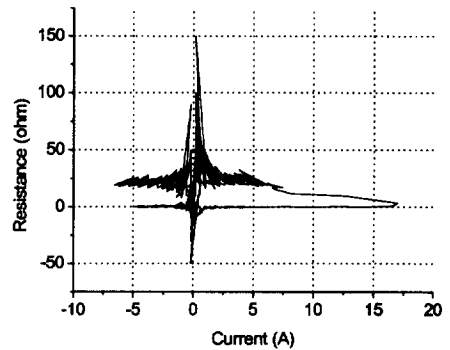
(c)

그림 4. 인가전압 75 V_{peak} 시점에서 전기적 특성 ; (a) 전류,전압 - 시간곡선 (b) 저항 - 전류 곡선 (c) 전력 - 전류곡선.

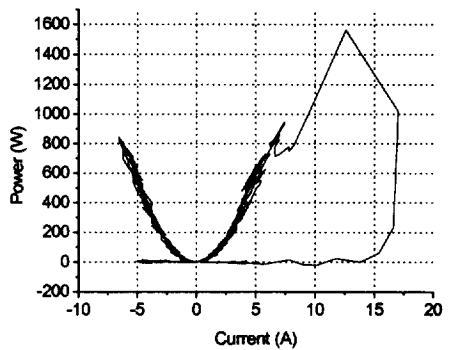
Fig. 4. Electrical properties at 75 V_{peak}; (a) Current and voltage - time curve (b) resistance-current curve and (c) power-current curve.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 인가전압 141.4 V_{peak} 시점에서 전기적 특성; (a) 전류,전압 - 시간곡선 (b) 저항 - 전류 곡선 (c) 전력 - 전류곡선.

Fig. 5. Electrical properties at 141.4 V_{peak}; (a) Current and voltage - time curve (b) resistance-current curve and (c) power - current curve.

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 부분켄치에서 완전 켄치로 이행되는 시간이 후술하게 될 높은 인가 전압에 비하여 길어지는데 이러한 이유는 낮은 인가전압으로 인해 켄치의 진행이 상대적으로 느리게 진행되기 때문이다. 이와는 반대로 전압의 경우 사고가 발생하기 전, 초전도 한류기 양단의 저항은 '0'이므로 전압값을 나타내지 않다가 quench가 발생한 직후부터 전압이 발생하여 점점 증가하는 형태를 보여주고 있다. 특히 그림 3 (a)에서 첫 사고 주기에서 위상차가 발생하는 것처럼 측정되는 부분은 매우 흥미롭다. 매우 흥미롭다. 그러나 이러한 현상은 위상차라기보다는 초전도체의 켄치-회복과정에서 회복후 늦게 다시 켄치가 일어났기 때문에 상대적으로 전류의 피크값이 일찍 발생했기 때문에 보여진다, 즉, 초전도체에 일정전류 (이 경우 약 10 A_{peak})가 흘러야 완전 켄치가 일어나서 적절한 전압값을 보일 수 있다.

한편, 그림 3 (b)와 그림 3 (c)는 그림 3 (a)로부터 계산한 저항값과 소비전력을 나타낸 것이다. 저항곡선의 경우 켄치가 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 2~5 Ω 의 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 [8]와 잘 일치함을 알 수 있다. 부가적인 설명을 위해서 그림 3 (b)에 시간에 대한 저항 그래프를 추가하였다. 마지막으로 소비전력을 나타내는 그림 3의 (c)를 살펴보면 최초, 전력 값이 '0'이고 켄치가 발생한 직후부터 전력값이 증가하여 - 8.2 A_{peak} 에서 77 W에 달함을 알 수 있다. 이때 전류가 양 성분을 가지면서 한류기의 저항성분이 quench 전파에 따라 증가하고 전류값이 감소하면서 43 W까지 감소했다가, 53 W에서 안정된 전력값을 보여주며 발진(oscillation)함을 알 수 있다. 이러한 과정은 나선 형태 한류기의 저항발생 메카니즘으로 이해될 수 있다. 먼저 상기에 설명된 과정은 나선 형태의 초전도체에서 사고 전류 유입에 따른 부분적인 켄치가 발생한 다음 시간이 흐르면서 완전한 켄치로 진행되기 때문으로 보여지며 이 시간 동안 소비 전력이 증가하는 것으로서 추정이 가능하다. 또한 선로 고장에 따른 사고가 발생한 후 나선형 한류기의 병렬 저항으로 작용하는 금층으로 대부분의 전

류가 흐르게 되고 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력 증가가 발생하는 것으로 판단된다. 금층의 저항증가는 냉매로 사용되는 액체 질소의 냉각이 켄치 시 생성되는 기포의 영향과 액체 질소 고유의 열 전달 속도로 인하여 발생하는 열을 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 여겨지며 약 3 주기가 지나가면 일정한 값으로 포화되어 발진함을 알 수 있었다.

그림 4는 동일한 나선형 초전도 한류기에 인가 전압 V_S 를 75.5 V_{peak} 로 표준 저항 R_S 를 1 Ω , 부하저항 R_{Load} 를 32 Ω , 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 한류기 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 켄치가 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 18~28 Ω 의 분포를 보여주는 것을 알 수 있다. 저항 곡선을 살펴보면 그림 3 (b)의 저항곡선에 비하여 상당히 안정된 곡선을 보여주는 데 이는 인가 전압이 75.5 V_{peak} 로 증가함에 따라 초전도 한류기 회로 내의 부분 켄치가 상당히 감소했음을 의미하는 것이다. 따라서 이러한 저항곡선의 안정도는 전압을 높일수록 향상되며 후술하게 될 141.4 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 계산 상의 오류이다. 마지막으로 소비전력을 나타내는 그림 4의 (c)를 살펴보면 최초, 전력 값이 '0'이었다가 켄치가 발생한 직후부터 전력 값이 증가하여 13.5 A_{peak} 에서 1,150 W에 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 켄치가 감소되어 나타나는 현상으로 이해될 수 있다. 이후 전력 곡선은 360 W와 400 W 사이에서

진동을 하며 약간 씩 증감하며 이때 전류값은 -5 A에서 5 A사이에서 진동하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 최종적으로 전압 V_s 를 141.4 V_{peak} 까지 인가하고 여타의 조건은 앞절과 동일하게 취했을 때 사고전류 유입과 퀘칭 발생 시점에서 3주기 동안의 전기적 특성을 도시한 것이며 이때 사고각은 0° 였다. 그림 5의 (a)를 살펴보면 최초 사고가 발생하기 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 발생하기 전, 초전도 한류기 양단의 저항은 '0'이므로 전압값을 나타내지 않다가 quench가 발생하여 저항이 증가하면서부터 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 퀘칭이 시작되는 시점에서 전류의 크기는 감소하고 저항이 증가하기 시작하며 20~30 Ω 의 저항분포를 보여주며 전류값 -7 A에서 7 A사이에서 발진을 하고 있음을 보여준다. 이는 전술하다시피 그림 3의 13 V_{peak} 에 비해 훨씬 높은 전압치를 인가함에 따라 한류기의 초전도 회로에 부분 퀘칭이 상당부분 감소하여 완전 퀘칭으로 이행했기 때문으로 여겨진다. 소비전력을 나타내는 그림 5의 (c)를 살펴보면 최초, 전력 값이 '0'이었다가 퀘칭이 발생한 직후부터 전력값이 증가하여 12.5 A_{peak} 에서 1,580 W에 달함을 알 수 있다. 퀘칭직후 최대 전류 17.6 A_{peak} 와 최대 전력일 때 전류값 12.5 A_{peak} 가 일치하지 않는 이유는 퀘칭직후에는 아직 초전도 전류제한 소자의 퀘칭이 충분히 이루어지지 않아 전압발생이 상대적으로 적기때문으로 사료된다. 이후 퀘칭이 진행됨에 따라 전력 곡선은 850 W와 900 W 사이에서 진동을 하며 약간 씩 증감하며 이때 전류값은 -6 A에서 6 A사이에서 진동하고 있음을 알 수 있다. 또한 인가전압에 따라서 최대 퀘칭 전류가 다르게 관찰되는데 이는 인가전압이 높아질수록 초전도 한류소자가 받는 소비에너지가 높아지기 때문에 한류기 온도가 상대적으로 높아져 저항 상승률이 급격해지기 때문으로 풀이된다.

4. 결론

전력계통의 사고전류에 신속하게 대처할 수 있는 새로운 개념의 초전도 한류기 중에서 YBCO 박막을 이용한 나선 형태의 저항형 한류기를 설계하고 퀘칭 특성 및 사고 전류 제한 특성, 전압, 저항 및 전력의 변화 특성에 대하여 고찰하였으며 다음과 같은 특성을 얻었다.

인가 전압 13 V_{peak} 이고 표준 저항이 1 Ω , 부하저항이 32 Ω 일때 정상 전류는 0.7 A_{peak} 였다. 사고 전류는 인가후 0.3 msec만에 최대 13.5 A_{peak} 까지 상승하였다.

인가전압 $V_s = 141.4 V_{peak}$ 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 나선 형태 한류기의 저항 발생 메카니즘으로 이해될 수 있다. 먼저 상기에 설명된 과정은 나선 형태의 초전도체에서 사고 전류 유입에 따른 부분적인 퀘칭이 발생한 다음 시간이 흐르면서 완전한 퀘칭으로 진행되기 때문으로 보여지며 이 시간 동안 사고 전력이 증가하는 것으로서 추정이 가능하다. 또한 선로 고장에 따른 사고가 발생한 후 나선형 한류기의 병렬 저항으로 작용하는 금층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력 증가가 발생하는 것으로 생각된다. 금층의 저항증가는 냉매로 사용되는 액체 질소의 냉각이 발생하는 열을 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 여겨지며 약 3 주기가 지나가면 일정한 값으로 포화되어 발진함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강환, "전력계통 고장전류 증대와 대처 방안", 전기 저널, 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] 임성훈 외, "용융성장시 서냉시간과 후열처리시간에 따른 임계특성", 전기전자재료학회논문지 Vol. 11, No. 8, pp.327-333, 1998.
- [4] 최효상 외, "SrCaCuO와 BiPbCuO 이중층 상호 확산에 의해서 제조된 Bi(Pb)SrCaCuO 초전도체", 전기전자재료학회논문지 Vol. 9, No. 7,

pp.680-689, 1996.

- [5] 정동철 외, "고온초전도마이크로스트립 패치 안테나의 근거리 전자장 해석", 전기전자재료학회 논문지 Vol. 9, No. 8, pp.783-788, 1996.
- [6] 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.
- [7] 최효상 외, "분로저항이 초전도 한류기에 전류제한효과에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회 논문지, 1권 2호, pp. 49-53, 1999.
- [8] 최효상 외, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 전기학회논문지, 48B권, 10호, pp. 537-543, 1999.