2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

기포발생에 따른 초전도 한류기용 YBCO 박막 퀜치특성 연구

강종성*, 박권배*, 이방욱*, 오일성*, 김혜림**
*LG산전 전력연구소, **한국전력공사 전력연구원

A Study of Quench Behaviors in YBCO Flims for Superconducting Fault Current Limiter

J.S. Kang*, K.B. Park*, B.W. Lee*, I.S. Oh*, H.R. Kim**
*Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems, **KEPRI

Abstract - In these days, the interruption capability of some circuit breakers, which are installed in the transmission systems, is getting lower than the magnitude of the fault current because of continuous increase of power demand and relatively short power line which was installed in forms of mesh network

As a result of these situations, fault current limiters (FCLs) are strongly necessary. There are various types which is investigated around the world, and new power apparatuses that have been newly considered and developed by many manufactures. In this paper, we considered resistive superconducting fault current limiters with YBCO thin films.

The resistive limiters utilize a transition of YBCO films from superconducting to normal state caused by exceeding the critical current. By means of newly occurred impedance, the fault current will be limited effectively.

Generally, a few current path patterns are available for YBCO films to enhance the current limiting performance of YBCO films. In this paper, the meander-type and the bi-spiral-type were used for current paths of YBCO flims. When YBCO films are quenched into the normal state, bubbles could be observed on the surface of YBCO films. Using our high-speed camera, the number of bubbles and the size of bubbles could be visualized and the relation between bubbles and current density was analyzed.

By means of moving pictures of bubbles, we observed how the quench extended or how the heat was conducted in films.

1. 서 론

현재 국내의 전력계통은 매년 지속적인 전력수요의 증가로 인해 고장전류가 계속해서 증대되고 있으며 또한, 상대적으로 짧은 국내 송전선로와, 전력공급의 신뢰도를 향상시키고 계통운영의 유연성을 확보하기 위한 선로의 망상화(mesh network)로 인해 늘어나는 고장전류는 계통의 불안 요소이다. 이를 해결하기 위해서 여러 가지 방법 및 전력기기들이 고려되고 있는데, 그중에서 초전도체의 퀜치특성을 이용한 저항형 초전도 한류기가 고려되고 있다.

저항형 초전도 한류기는 평상시 초전도 특성을 유지하므로 계통에 거의 영향을 주지 않다가, 초전도 소자의 임계전류 이상의 사고전류가 발생하면 빠르게 초전도 상태에서 상전도 상태로 전환하고 이때 소자에 큰 저항값이 발생하게 되어 사고전류를 제한하는 새로운 개념의 전력기기이다[1].

현재 저항형 초전도 한류기에 사용되는 YBCO 박막소자는 전압용량 증대를 위해 특별한 패턴으로 식각되어 사용되며, 식각된 YBCO 박막소자는 약 77K 정도까지 냉각하기 위해 액체질소내에 넣어 운전된다. 액체질소내에 담긴 박막소자는 외부의 열침입과 정상운전시 전기적 접촉부분의 접촉저항으로 인해 약간의 기포가 박막주변에 발생한다.

일반적으로 발생된 기포는 절연에 악영향을 미치게 되므로 액체질소 내부의 기포발생은 한류기 절연설계에 중요한 기준이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 패턴별 정자계해석을 통해 국부적인 자속밀도의 분포를 살펴보아 초전도 상태에서 발생하는 기포와의 상관관계를 살펴보았고 또한 접촉저항에 의한 줄열에 따른 기포발생을 고려해 보았다.

또한 YBCO 박막소자에 임계전류 이상의 전류가 흐르면 퀜치현상이 발생하여 박막소자내부에 줄열에 의해 기포가 발생하게 된다. 이 퀜치현상은 하나의 동일 박막소자에도 국부적으로 발생하게 되므로 재빨리 주위의 영역으로 전파시키지 못하면 박막소자가 손상될 수도 있다. 이 퀜치전파는 기포의 발생으로 관찰할 수 있으므로 박막소자내부에 발생한 기포를 고속카메라로 촬영하여 그 기포의 최초발생 영역 및 기포가 전파되는 과정을 촬영하였다.

2. 본 론

2.1 샘플 및 실험방법

현재 사용되고 있는 2인치 저항형 초전도 한류기용 YBCO 박막소자의 구조는 약 0.5㎜ 합성 사파이어(Al_2O_3) 기판 위에 고온 초전도 물질인 $Y_1Ba_2Cu_3O_7$가 300 nm의 두께로 성장되어 있으며, 그 위에 열전파 및 YBCO 초전도체를 습도 등 외부환경으로부터 보호할 목적으로 200㎚ 두께의 금이 증착되어 있다.

그림 1 초전도 한류기용 YBCO 박막소자 단면구조

일반적으로 저항형 초전도 한류기에 사용되는 YBCO 박막소자는 전압용량 증대 및 필요 상전도 저항을 얻기 위해 특별한 패턴으로 제작되어 이용되고 있는데, 패턴의 형상에 따라, meander 형태 혹은 spiral 형태, bi-spiral 형태 등으로 제작된다. 본 연구에서는 기포발생과 퀜치현상을 관찰하기 위해 meander 및 bi-spiral 형태의 박막소자를 이용하였다. 아래 그림 2는 각 패턴을 식각할 때 사용되는 마스크이다.

그림 2의 meander 패턴의 경우 여러개의 stripe으로 구성되어 있고 각 stripe의 양끝에 전압탭(voltage tap)이 연결되어 있다. 일반적으로 복수 개의 YBCO 박막소자는 물론 단일소자내에서 stripe 사이에도 시간적 퀜치 지연이 존재하여 임의의 stripe에서 시작된 퀜치현상은 그 열이 전파되는 방향으로 주변의 stripe으로 전파된다. 만일 박막소자내에서 퀜치전파가 용이하지 않으면 임의의 stripe에서만 퀜치가 일어나게 되어 해당 stripe은 과도한 열로 인해서 손상된다. 따라서 maender 패턴에서 퀜치전파를 측정하기 위해 각 stripe별로 전압탭을 내어 각 stripe에 voltage probe를 연결하여 퀜치전파현상을 전기적 신호로 측정할 수 있다. 또한 본 논문에서는 고속카메라를 이용하여 실제로 퀜치가 박막소자 내에서 전파되는 과정을 시각화하여 측정한 데이터와 비교 분석하였다.

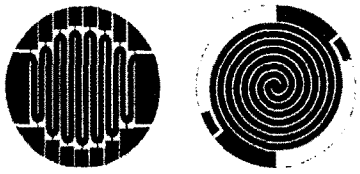


그림 2 meander 패턴 및 bi-spiral 패턴

bi-spiral 패턴의 경우, 박막소자의 무유도 패턴인 spiral 패턴의 단점인 인덕턴스 발생을 억제하고 자속밀도의 최적화를 이루고자 구상하여 무유도성으로 식각된 패턴이다. 이 패턴은 전류인입과 인출부의 거리 확보 및 자속이 서로 상쇄할 수 있도록 패턴을 구성함으로써 자속이 공각적으로 균일하게 분포한다. 또한 전위 및 전계 분포가 다른 패턴에 비해 장점을 가지고 있다[2].

그림 3은 한류특성 실험을 하기 위한 전체적인 시험 회로를 나타낸 것이다.

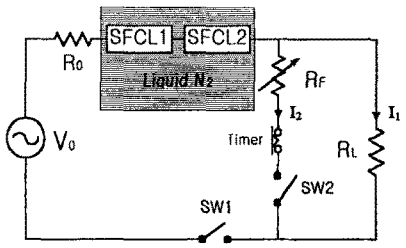


그림 3 퀜치특성 실험 회로도

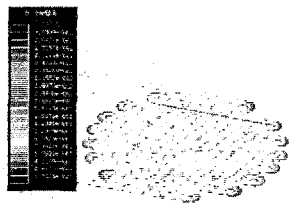
액체질소내에 담긴 박막소자에 평상시 통전전류를 모의하기 위해 SW1이 닫힘으로써 저항 R1(100Ω) 쪽으로 도통이 되어 전류 I_1이 흐른다. 이 I_1 전류는 박막소자의 임계전류보다 낮은 값으로 이 전류에는 박막소자는 퀜치되지 않는다. 특정시간에 선로사고를 모의하기 위해 SW2가 닫히면 R1 보다 상대적으로 적은 값을 가지는 저항 Rf(1Ω) 쪽으로 대부분의 사고전류 I_2가 흐르게 된다. I_2는 박막소자의 임계전류를 넘어서게 되어 박막소자내 특정 stripe에서 퀜치가 시작되어 주변으로 퀜치가 전파된다.

YBCO 박막소자 전류리드로 카본(Carbon)에 구리(Copper)가 합금된 소재를 이용하여 기존의 160℃ 저온 땜납재료를 대신하여, 무 땜납방식을 이용하였다. 카본은 열전도 및 전기전도 특성이 우수하며, 열에 의한 변형이 적은 특성 및 화학적 안정도 높으며 정밀가공이 가능하므로 두께가 매우 얇은 박막의 전류 접속리드로서 사용하였다[3]. 그러나 박막소자와 CuC 전류리드 사이에 접촉저항이 존재하므로 이 접촉저항으로 인해 박막소자가 액체질소내에서 초전도 상태로 유지할 때 기포가 발생할 수 있는데, 이는 한류기의 절연을 취약하게 하는 요인이므로 고속카메라를 이용하여 초전도상태 및 상전도 상태에서 전류리드 부분의 기포발생 유무를 관찰하였다.

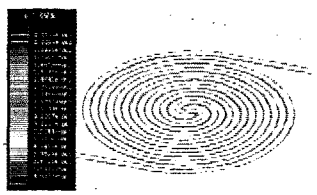
2.2 패턴별 정자계해석

초전도체를 교류 통전시킬 때는 필연적으로 교류손실이 발생한다. 이러한 손실은 발열로 이어져 박막이 초전도상태에 있을 때 기포발생을 유발할 수 있다. 이는 퀜치시 소자의 소손을 야기할 뿐만 아니라 발생된 기포가 박막에 누적되면 절연에 상당한 악영향을 미치게 된다.

본 연구에서 meander 및 bi-spiral 등 두가지 패턴에 대한 정자계해석을 통해 각 패턴별 자속밀도 분포를 살펴보았다. 그림 4는 두가지 박막소자 패턴에 대하여 20A 전류를 흘렸을 때, 자속밀도 분포를 구한 것이다. meander 패턴의 경우, 굴곡 부분의 외경 및 내경 전체에 걸쳐서 자속이 집중됨을 알 수 있고, 외경보다는 내경쪽이 자속밀도가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. bi-spiral 패턴의 경우, 자속밀도의 크기는 meander 패턴과 유사하였으나, 자속밀도의 분포는 패턴 전체에 걸쳐 균일하게 나타남을 확인할 수 있었다.



(a) meander 패턴 자속밀도 분포



(b) bi-spiral 패턴 자속밀도 분포

그림 4 YBCO 박막소자 자속밀도 분포

2.3 초전도상태시의 기포발생

액체질소내에 담긴 YBCO 초전도 박막소자는 보통 77K 정도의 온도에서 운전된다. 대부분 용기는 진공을 이용하므로 측면으로부터의 열침입은 적은 편이나 상부로부터의 열유입과 각종 전원리드선 및 측정신호선으로부터 열침입은 박막소자가 초전도상태에 있을 때에도 기포를 발생시킨다. 또한 본 연구에 새로이 적용된 CuC 전류리드와 박막소자 사이의 접촉저항이 만일 크다면 박막소자에 정상전류가 흐르는 동안에도 그 접촉부위에 발열로 인해 기포가 발생할 것으로 예상되며, 또 정자계해석을 통해 단일 박막소자 내에서 자속밀도가 상대적으로 밀한 것으로 밝혀진 영역의 국부적인 발열로 인한 기포발생을 예상할 수 있다.

그림 5는 실제 초전도 한류기용 박막소자 내에서 기포발생을 촬영한 그림이다. 고속카메라를 이용해 meander 및 bi-spiral 패턴의 박막소자가 초전도상태에 있을 때 기포발생의 유무 및 그 위치를 촬영하였다. 그 결과 상부 및 각종 전선을 통한 열유입으로 소량의 기포가 발생하였으나, 새로이 고안된 전류리드 접촉부위

및 정자계해석을 통해 전류밀도가 밀한 것으로 밝혀진 영역에서는 거의 기포가 발생하지 않았다.
즉, 새로이 고안된 전류리드는 77K의 저온에서 접촉저항이 양호하여 기존의 저온땜납을 대체할 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 초전도 박막소자가 초전도상태에 있을 때에는 전류밀도가 밀한 영역은 발열과 거리가 먼 것을 확인할 수 있었다.

그림 5 고속카메라를 이용한 기포발생 촬영

2.4 퀜치현상과 기포발생

앞에서 말한 바와 같이 YBCO 박막소자에 임계전류 이상의 전류가 흐르면 박막소자는 초전도상태에서 상전도상태로 전이되는 퀜치현상이 발생하여 퀜치된 박막소자내 저항값이 급격히 증가하게 되므로 전류는 제한되고 박막소자내부에 줄열에 의해 기포가 발생하게 된다. 퀜치현상은 일반적으로 단일소자내의 한 영역에서 시작되어 열이 전달되는 방향으로 퀜치도 전파되게 되는데, 본 연구에서는 고속카메라를 이용해 두가지 패턴의 박막소자내 최초로 퀜치가 발생하는 영역 및 퀜치가 전파되는 현상을 촬영하였다. 그림 6은 meander 패턴으로 제작된 두 개의 다른 박막소자에서 최초로 퀜치될 때를 고속카메라로 촬영한 그림이다.

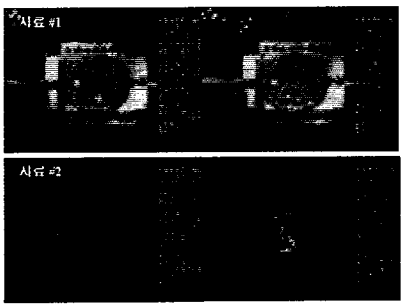


그림 6 meander 패턴에서 최초퀜치 촬영

촬영결과로 단일 박막소자내 최초 퀜치 영역은 두 개의 시료 모두에서 임계전류밀도가 가장 낮은 영역이었다. 즉 단일소자내에서 가장 임계전류밀도가 낮게 제작된 영역에서 사고전류에 의해 최초로 퀜치가 시작되었으며 같은 패턴의 경우에도 가장 낮은 임계전류밀도 영역이 최초퀜치영역임을 알 수 있었다. 또한 이러한 경향은 패턴의 종류와 사고전류의 크기와 무관함을 알 수 있었다.
그림 7은 meander 패턴의 박막소자에서 각 stripe 별로 퀜치가 전파될 때 시간적 지연을 나타낸 것으로서, 각각 인가전원이 30V 및 220V일 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이, 퀜치직후에는 주변의 stripe으로 빠르게 퀜치가 전파되다가 어느정도 시간이 지나면 전파속도가 느려짐을 알 수 있으며, 인가전원이 작을 경우, 즉 사고전류가 적을 경우에는 박막소자내의 모든 stripe이 퀜치되지 않으며, 그 지연시간도 상대적으로 늘어나는 것을 알 수 있었다.
그림 8은 bi-spiral 패턴에서 임계전류밀도가 가장 낮은 부분에서 최초로 퀜치가 발생하여 주위의 영역으로 퀜치가 전파되는 것을 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 줄열에 의해 발생한 열은 금박막은 물론 열전도 특성이 무척 좋은 사파이어 기판을 통해 빠르게 주변으로 전달되는 것을 알 수 있다.

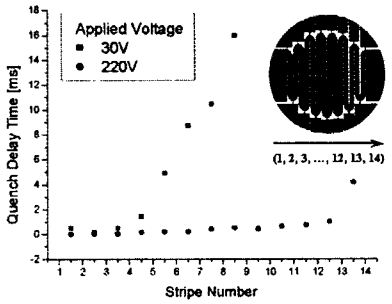


그림 7 단일소자 내에서 퀜치지연시간

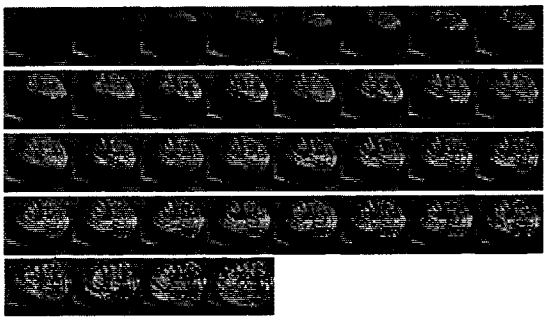


그림 8 bi-spiral 패턴에서 퀜이전파 현상

3. 결 론

YBCO 박막형 초전도 한류기에 사용되는 YBCO 박막내에서 기포발생을 고속카메라를 이용하여 촬영하여 아래와 같은 결론을 얻었다.
1. 새로이 제안된 CuC 전류리드부분에서는 박막소자가 초전도 및 상전도상태에 관계없이 기포가 발생하지 않아 제안된 전류리드의 전기적 접촉이 양호함을 알 수 있었다.
2. 박막소자의 각 패턴에서 수치해석을 통해 예측된 자속밀도가 밀한 부분에서는 기포가 전혀 발생하지 않음을 확인할 있었다.
3. 사고전류를 박막소자에 인가한 직후 최초 퀜치 혹은 최초 기포발생 영역은 박막소자의 임계전류밀도가 가장 낮은 영역에서 관찰되었으며, 이는 사고전류 크기 및 패턴과는 무관하였다.
4. 최초퀜치로 인해 발생한 줄열은 금박뿐만 아니라 열전도도가 좋은 사파이어기판을 통해 재빨리 전달됨을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] B. Gromoll et .al., "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Appl.Superconductivity, Vol. 7, N0. 2, , pp 828-831 June 1997
[2] 이방욱 외, "YBCO 박막형 저항형 한류기에 적용 가능한 meander line 해석 연구", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp 221-224, 2002년 2월
[3] 박권배 외, "YBCO 박막형 초전도 한류기에 적용 가능한 전류리드 제작방안", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp 219-220, 2002년 2월