

YBCO 박막형 저항형 한류기에 적용 가능한 Meander Line 해석 연구

이 방 욱*, 강 종 성*, 박 권 배*, 오 일 성*, 현 옥 배**

*LG산전 전력연구소, **한전 전력연구원

Analytical Investigations on the Figures of Meander Lines on the YBCO Thin Film for Resistive Fault Current Limiters

B. W. LEE*, J. S. KANG*, K. B. PARK*, I. S. OH*, O. B. HYUN**

*R&D Research Center, LG Industrial System

**Korea Electric Power Research Institute

bwlee@lgis.com

Abstract - Superconducting electrical devices are under development in a national project in Korea. And KEPCO and LGIS are in charge of development of a resistive type fault current limiters(FCLs) with YBCO thin films.

In order to realize FCLs, the rated power of FCLs must be increased. For this purpose, it is of great interest to increase of allowed voltage of unit component without electrical and thermal damages. So, meander lines were widely used for the conducting path to increase maximum electric field.

In this research, numerical simulations on the electromagnetic behaviors of the device were carried out, especially focusing on the effect of meander line structures on the YBCO thin films. To evaluate the structures of meander lines, three types of meander lines were considered for numerical analysis using finite element method (FEM).

In this simulation, both normal state and fault conditions were considered for calculation of electric field, current density, magnetic field density. And the simulation resulted are compared to find the optimum design of meander lines for resistive FCLs.

1. 서 론

전력계통에서의 한류기(Fault Current Limiters:FCLs)의 역할은 계통사고로 인한 고장전류 발생시 busbar, 애자, 차단기 등에 가해지는 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 제한시키는 것이다. 계통고장전류의 지속적인 상승과 이에 부응하는 전력기기 개발의 난이함으로 인해 위와같은 한류소자에 대한 요구가 급증하고 있

다. 하지만 실제적으로 계통에 적용가능한 한류 기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 지연되어왔다.

그러나 고온 초전도체가 발견되면서, 이 새로운 소자의 비선형적인 전압-전류 특성을 적용한 한류기의 개발가능성이 대두되었으며, 1986년부터 액체질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 한류기 개발이 본격적으로 시작되었다.

고온초전도 한류기는 계통상에서 사고를 감지하면 빠른시간내에 퓨즈 역할을 수행하여 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 또한 고장전류 저감 후에는 다시 초전도상태로 전이하는 특성을 가지고 있다. 상기 특성을 갖는 초전도 한류기에 대하여, 대표적으로는 저항형, 유도형, 하이브리드형 등의 여러 가지 다양한 형태의 한류기가 제안되어 연구개발 중에 있다[1,2,3].

본 연구에서 다루고 있는 저항형 한류기는 고장 전류 발생으로 인하여 초전도 소자가 감당할 수 있는 임계전류를 넘게되면 초전도에서 상전도로 급격하게 전이하는 켄치특성을 이용하는 기기로서, 사고전류가 흐르는 경우 주울 발열로 인하여 초전도 소자가 켄치되어, 선로에 수 ms 이내에 수십 Ω 의 저항을 발생하여 신속하고 효과적으로 사고전류를 제한하는 역할을 수행한다. 또한 정상상태에 임피던스는 0이므로 손실이 없으며, 사고종료 후 초전도 상태로 전환하는 우수한 특징을 가지고 있다.

하지만 한류소자에 열발생시 적절한 열 분산 방안, 용량 증대를 위한 직병렬 방안, 필요 저항 발생방안, 단위 한류소자의 최적 설계, 한류소자간의 연결 방안 등이 실제품 제작시 문제점으로 지적되고 있다.

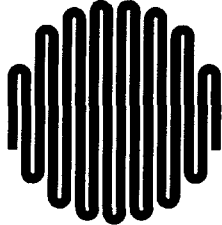
이러한 문제점을 해결하기 위해 우선적으로는 저항형 한류기에서 초전도 소자의 통전로로 사용되며 켄치시 저항역할을 수행하는 meander line에 대한 검토가 필요하다.

본 논문에서는 YBaCuO 필름을 한류 소자로 사용하는 저항형 한류기에서 전류 path 및 켄치시 저항으로 사용되고 있는 line 패턴의 최적설

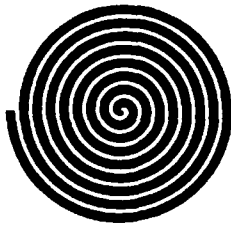
계를 위하여 우선적으로 단위소자에 대하여 여러 형태의 line 패턴을 고안하고, 유한요소법을 적용하여 전자계 해석을 실시하였다.

2. 저항형 한류기용 line 패턴 검토

초전도 YBCO 박막에서의 meander line 패턴의 영향을 분석하기 위해 그림 1과 같이 세가지 패턴을 고안하여 구성해 보았다.



(a) meander line



(b) spiral line



(c) bi-spiral line

Fig. 1. Line patterns for YBCO films

각각의 line 패턴은 50mm 직경의 YBCO 디스크 타입 박막에 제작 가능하게 구성하였으며, line의 두께는 2mm, line과 line 사이의 간격은 1mm로 하였다. 단 bi-spiral 타입의 경우, 구성의 최적성을 고려해 간격을 1.5mm로 하였다.

그림 1에서 (a) meander line은 BSCCO를 성장시킨 bulk형 고온초전도체나, YBCO박막형 소자에서 주로 사용되는 패턴이다. (b) spiral line은 단위 초전도 소자내에서 좀 더 긴 저항을 생성하는데 유리한 패턴이다. (c) bi-spiral line은 (b)의 spiral type을 응용한 것으로서, spiral line의 단점인 인덕턴스 발생 및 자속밀도의 최적화를 이루고자 구상한 방식이다. 이 패턴에서는 전류는 인입 path로 들어갔다 다시 중심에서 외부로 빠져나오는 구조를 채택하고 있다.

표 1은 50mm 기판위에 구성된 위 세가지

박막 line의 길이를 비교한 것이다.

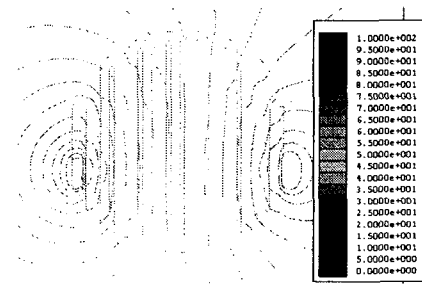
Table 1. The length of each pattern

단위[mm]	meander	spiral	bi-spiral
Length	620	689	665

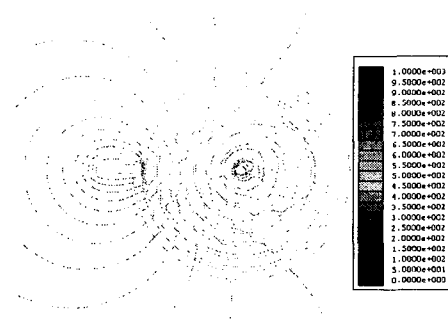
표 1에서 알 수 있는 것은 기존의 meander type보다 spiral type과 bi-spiral type의 경우에 단위 소자당 길이가 더 늘어나는 것을 알 수 있다. 물론 일반적인 meander type에 비해 전류 리드의 구성 및 접촉 등에 문제가 발생할 수도 있으나 전압용량 증대면에서는 더 유리한 구조라 할 수 있다. bi-spiral type의 경우, meander type에 비해 길이가 늘어났고, spiral type의 경우보다는 짧지만, 자속밀도 보상측면에서는 더 유리한 방식으로 사료되며, 이것에 대해서는 해석 및 실험적으로 검증할 필요가 있다.

3. 각 패턴에 대한 전계 해석

그림 2는 3개의 line 패턴에 대한 전위분포를 보여준다. 그림 2에서 전위분포는 전반적으로 meander line 양 끝단에서 집중하는 것을 볼 수 있다. 또한 전위분포의 균일성 측면에서 보면, spiral line의 경우, 전위 분포가 전압 양 끝단 사이에서 상대적으로 밀하게 분포하는 것으로 보아, 전압 상승시 절연과괴 가능성이 높다고 할 수 있으므로, 인입선과 인출선 설계시 주의를 기울일 필요가 있다. meander line과 bi-spiral line은 전위 분포가 균일하게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) meander



(b) spiral

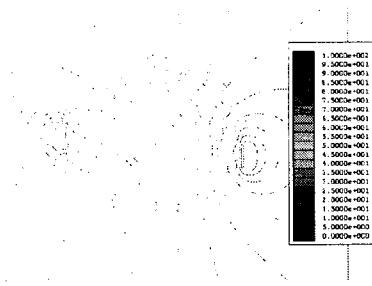
4. 각 패턴에 대한 자계 해석

초전도체를 교류 통전시킬 때는 필연적으로 교류손실이 발생한다. 이러한 손실은 발열로 이어져 냉각비용 증가로 이어지므로, 되도록 교류손실의 저감 방안이 마련되어야 한다. 이 교류손실은 주변 자계에 수직한 방향으로 놓여있는 도체 단면적 크기의 제곱에 비례한다. 따라서 이러한 관점에서 볼때는 도체 두께를 줄이는 방안이 필요하지만, 이것은 대전류 통전을 위한 두께 증가와는 상치한다. 따라서 초전도 도체의 최적 두께의 설정이 필요하며, 교류 손실의 저감이 가능한 통전구조 설계가 필요하다. 이를 위해서는 자속밀도의 최적분포 및 저감, 자속밀도 보상 등이 그 대안으로 제시된다[5].

그림 4는 세가지 line 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 있다.

spiral 패턴의 경우에는, 자속밀도가 meander 패턴의 경우보다 평균적으로는 더 낮게 나타났으며, 그 분포 또한 전류 입력, 출력 단자에 자속이 집중하는 것을 제외하고는 라인 전체에 걸쳐 균일하게 나타난 것을 볼 수 있다.

bi-spiral 패턴의 경우, 자속밀도의 크기는 meander 패턴과 유사하였으나, 자속의 분포는 line 전체에 걸쳐 균일하게 나타남을 확인할 수 있다.



(c) bi-spiral

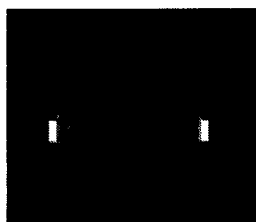
Fig. 2. Electric potential distribution

그림 3은 각각의 line에 대한 전계분포를 보여주고 있다.

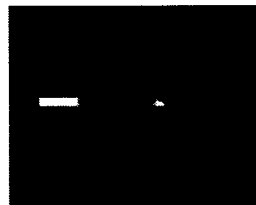
meander line의 경우, 전계가 line의 양 끝단에 가장 집중하고 있으며, 또한 line의 굴곡면에서도 상대적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 전계가 굴곡면에 집중해서 나타난다는 것이다. 따라서 실제 설계시 굴곡면의 전계완화를 위한 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

spiral line의 경우 전계분포를 보면 전극 접촉점 양단의 길이가 상대적으로 짧으므로 전계가 집중하여 분포하는 것을 알 수 있으며, 이는 전압상승을 위한 저항형 한류기 설계시 어려움이 있을 것으로 생각된다.

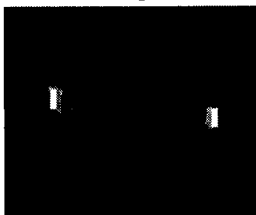
bi-spiral type의 경우, 굴곡점이 존재하지 않으므로 line을 따라서 살펴본 전계는 균일하고 안정적으로 분포하였으며, 전극 양끝단에만 전계가 집중하는 것을 알 수 있다. 따라서 전류인입 부분에 대하여 전계완화를 고려한 설계가 이루어질 필요가 있다.



(a) meander

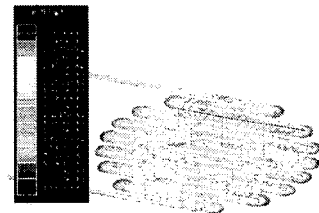


(b) spiral

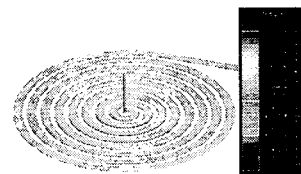


(c) bi-spiral

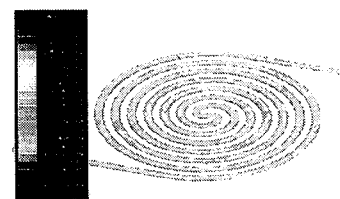
Fig. 3. Electric field distribution



(a) meander



(b) spiral



(c) bi-spiral

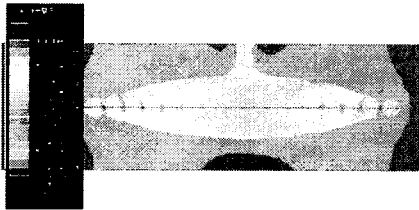
Fig. 4. Magnetic field distribution(I)

그림 5는 패턴의 중심단면에서 자속밀도 분포를 구한 것이다.

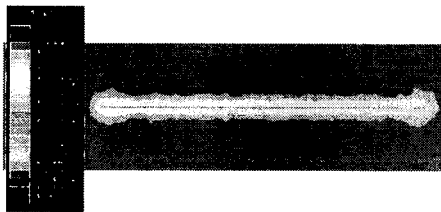
그림 5에서 보면 spiral type의 경우, 자속이 타원 형태로 공간으로 퍼지는 것을 알 수 있고, 이것은 교류 손실 측면에서는 마이너스 요인으로 작용하게 된다. 하지만 meander와 bi-spiral의 경우에는 단면 전체에 걸쳐 균일한 분포를 보여주고 있어 상당히 양호한 것을 알 수 있다. 또한 bi-spiral의 경우 전류 통전로가 바뀜으로 인해



(a) meander



(b) spiral



(c) bi-spiral

Fig. 5. Magnetic Field distribution(II)

자속의 상쇄효과가 일어나 자속밀도가 공간에 균일하게 분포하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 YBCO 필름을 한류 소자로 사용하는 저항형 한류기에서 전류 path 및 켈치시 저항으로 사용되고 있는 전류 통전 line의 최적 설계를 위하여 우선적으로 단위소자에 대하여 여러 형태의 패턴을 고안하고, 유한요소법을 적용하여 전자계 해석을 실시하였다.

그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 현재 초전도 저항형 한류기 소자의 패턴으로 주로 사용되는 meander line의 경우 굴곡부분에서 집중되는 전계영향 및 자속밀도, 전류밀도의 집중 문제를 고려하여 설계하여야만, 초고압 대응량화에 대응할 수 있다.

- spiral 패턴의 경우에는, 전극배치시 다른 패턴에 비하여 상대적 거리가 짧으므로, 전계 집중 및 왜곡의 가능성이 크다. 또한 자속 분포가 공간적으로 넓게 존재하므로, 교류손실 및 발열 가능성이 높다.

- bi-spiral 패턴은 전류 인입과 인출부의 거리 확보 및 자속이 서로 상쇄할 수 있도록 패턴을 구성함으로써, spiral에 비해 자속이 공간적으로 균일하게 분포한다. 또한 전위 및 전계분포를 통해 볼 때 향후 전압 상승에도 충분히 대응 가능하리라 사료된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Sugimoto et al., "Thyristor controlled ground fault current limitingsystem for ungrounded power distribution systems", IEEE Trans. on PD, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 940-945
- [2] B. Gromoll, G. Ries et al., "Resistive Current Limiters with YBCO Films", IEEE Trans. on appl. Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997, pp. 828-831
- [3] T. Verhaege, et.al., "Investigations of HV and EHV superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on appl. Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997, pp. 1063-1066
- [4] 현옥배, 황시돌, 김혜림, 최효상, "전력용 고온초전도 한류기 개발 및 특성 해석", 한전 연구원 과제 보고서, 2001년 9월
- [5] Makan Chen, Willi Paul et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", EUCAS 2001