

6.6kV급 초전도 저항형 한류기 개발에 관한 연구

이방욱¹, 박권배¹, 강종성¹, 김호민¹, 오일성¹, 현옥배²

¹LG산전 전력연구소, ²한전 전력연구원

Development of 6.6kV Resistive Superconducting Fault Current Limiters

B.W. Lee¹, K.B. Park¹, J.S. Kang¹, H.M. Kim¹, I.S. Oh¹, O.B. Hyun²

¹ELECTROTECHNOLOGY R&D CENTER, LG Industrial Systems, ²KERPI, KEPCO

Abstract - In order to anticipate gradual increase of fault current in electric power systems, current limiting technology and current limiting device has been investigated for a long time. But the commercial use of current limiting device was delayed due to the lack of effective method to insert impedance to the electric power systems without loss and surplus defects.

However, novel current limiting device, which use superconducting materials, was considered as a dream technology to be applied in a distribution and transmission lines.

LG Industrial systems and KERPI started to investigate resistive type superconducting fault current limiters in order to develop 154kV fault current limiters and this year, we succeed to test 3 phase 6.6kV/200A fault current limiters. Based on these achievements, 24kV superconducting fault current limiters will be realized withing 3 years which could be tested in a real fields.

In this paper, the developments of fault current limiting module which use YBCO thin films, cryogenic systems, the structure and construction of 3 phase fault current limiters and finally the test results of 6.6kV superconducting fault current limiters will be introduced.

1. 서 론

최근 전력수요의 폭발적인 증가에 따라 전원설비와 송변전계통의 지속적인 증설이 이루어져 전력계통의 등가임피던스는 점점 작아지고 있다. 이로 인하여 전력계통 사고 발생시 고장전류의 크기는 계속 커지고 있는 실정이다.

특히 우리나라의 경우 외국에 비하여 송전선로가 상대적으로 짧고, 변전소간을 연결하는 연계 송전선로가 망상형태(Mesh Network)로 되어 있어 송전계통의 고장전류가 기존 차단기의 차단내력을 상회하는 변전소가 많이 나타나고 있다. 고장전류가 차단기의 차단내력을 상회하게 되면 고장발생시 고장전류를 안정적으로 차단할 수 없게 되어 차단기는 물론 인접 전력설비까지 사고가 파급될 수 있다.

전력계통에서의 한류기(Fault Current Limiters)의 역할은 계통사고로 인한 고장전류 발생시 부스바(busbar), 애자, 차단기 등에 가해지는 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 제한시키는 것이다. 하지만 실제적으로 계통에 적용 가능한 한류기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 지연되어 왔다

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.

세계 유수 전력기 메이커에서도 경쟁적으로 초전도 한류기 개발에 뛰어들고 있으며, 향후 10년 내에 전력계통에 실적용 가능한 한류기 개발이 이루어지리라 예상하고 있다[1,2,3]. 이에 부응하여 국내에서도 초전도 한류기 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[4,5,6].

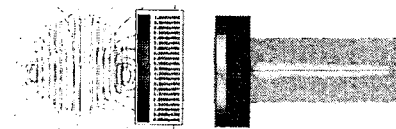
LG산전과 한전전력연구원에서도 2001년 154kV 송전급 초전도 한류기 개발을 목표로 공동 프로젝트를 시작하였으며, 현재 1단계 목표인 6.6kV/200A급 삼상 초전도 한류기를 성공적으로 개발완료하였다.

본 논문에서는 6.6kV급 초전도 저항형 한류기 개발에 있어서 이루어진 연구활동 중 초전도 한류소자 연구 및 개발, 냉각시스템 및 삼상 초전도 한류모듈 설계에 관하여 다루고, 최종적으로 본 개발 한류기에 대한 시험결과에 관해 소개하고자 한다.

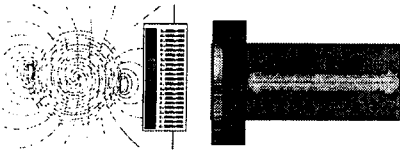
2. 본 론

2.1. 초전도 한류소자 개발

LG산전과 한전전력연구원에서는 YBCO 박막 소자를 한류소자로 이용하는 저항형 한류기 개발 연구를 수행하고 있다. YBCO 초전도 박막소자 개발시 고려해야 될 점은, 단위소자 용량 증대 방안, hot spot 발생에 의한 열적손상 방지, 단위 한류소자 최적 설계 등이 이루어져야 한다. 단위 한류소자 설계시 우선 고려해야 될 것은 저항형 한류기에서 초전도 소자의 통전로로 사용되며 퀴치시 저항역할을 수행하는 전류 통전로 형상 결정이다. 본 연구에서는 일반적으로 박막형 초전도 한류소자 패턴으로 사용되는 meander line과 새롭게 구상설계한 bi-spiral line에 대한 전자계해석과 고속카메라를 이용한 동시퀵치 현상 분석, 단위 한류소자에 대한 극한 실험 등을 통해 YBCO 박막의 최적 패턴을 결정하였다.



(a) meander

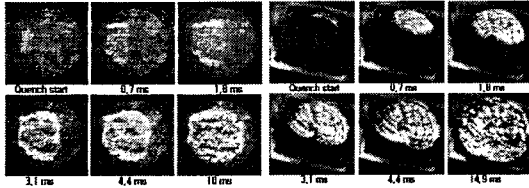


(c) bi-spiral

그림 1. YBCO 박막 패턴별 전위 및 자속밀도 분포

그림 1은 YBCO 박막 패턴별 전위분포 및 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 전자계해석을 통한 결과로는 전계 측면에서는 meander line의 경우 외곽 굴곡 path 부근에 전계가 상대적으로 집중하였으나, bi-spiral 패턴의 경우 전계분포가 완만하였으며, 자계해석 측면에서도 meander line보다 bi-spiral line의 경우가 자속밀도가 더 균일하게 분포하는 것을 확인하였다.

다음으로, 두가지 패턴에 대해 고속카메라를 이용하여 켄치시 발생하는 버블을 관측하여 동시켄치 및 켄치 전파 측면에서 어떤 패턴이 두 유리한지 비교분석하였다.



(a) meander pattern

(b) bi-spiral pattern

그림 2. 켄치시 버블 발생 및 진행 관측

켄치 전파 특성을 보면 meander line의 경우 주로 외곽 굴곡부분 및 입계전류밀도가 낮은 부분에서 켄치가 시작되어 금박막 및 사파이어 기판을 통해 켄치가 전파되고, bi-spiral 패턴의 경우에도 양상은 유사하지만 meander line보다 weak point가 덜 존재하므로 인해 국부적인 켄치 집중 현상은 나타나지 않았다.

단위 박막의 고압에 대한 절연특성 향상 및 극한 내력 향상을 위해 상기 패턴에 관한 3차원 전자계해석, 내압시험 및 켄치 시험을 수회 실시하여, 6.6kV 한류소자로 개선된 bi-spiral 형상을 최종 결정하여 한류 특성을 시험한 결과 매우 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

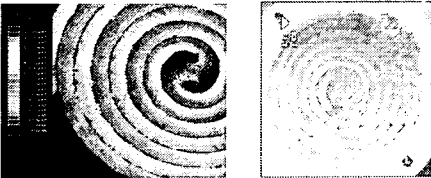


그림 3. 최종 박막패턴 결정을 위한 해석 및 실험

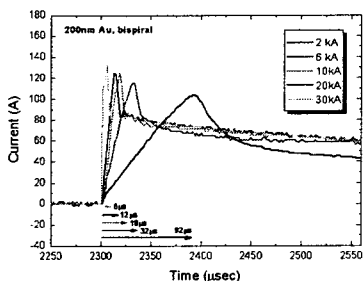


그림 4. 한류소자 특성 실험(max : 30kA)

2.2 삼상 초전도 한류모듈 및 냉동기 제작

6.6kV/200A급 초전도 한류기 개발을 위해서는 초전도 한류모듈의 직,병렬 연결이 반드시 이루어져야 하며, 이때 직렬 연결 모듈에서의 동시켄치 및 전압배분 문제, 병렬 연결 모듈에서의 전류배분 문제가 원활히 이루어져야 한다. 상기 초전도 한류기의 단상모듈 구성은 YBCO 박막소자를 8직렬, 6병렬로 구성하였으며, 총 48개의 소자가 사용되었다. 또한 직렬연결모듈의 동시켄치를 원활히 하기 위해 각 소자에 병렬로 선트 저항을 취부하여 제작하였다.(그림 5) 그림 6은 단상모듈의 한류특성을 보여주고 있으며, 사고전류를 1/4주기 이내에 양호하게 한류하는 것을 볼 수 있다.

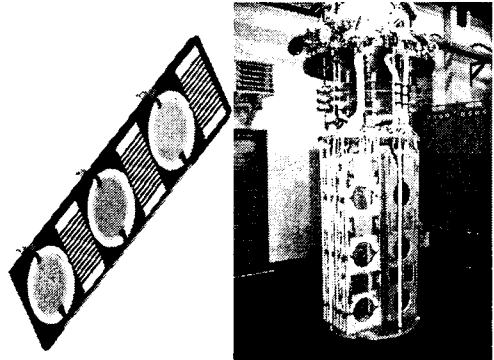


그림 5. YBCO 단상 한류모듈 구성

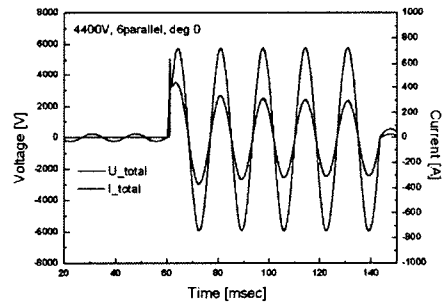


그림 6. YBCO 단상 한류모듈 특성 파형

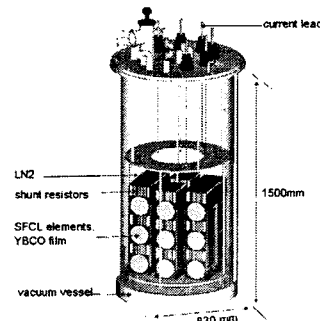


그림 7. 6.6kV 초전도 한류기 냉동기 구성도

그림 7은 최종적으로 결정된 6.6kV 삼상 초전도 한류기용 cryostat 및 삼상 한류기 구성도를 나타내고 있다.

2.3 삼상 초전도 한류기 성능 시험

최종 설계 및 제작 완료된 6.6kV/200A급 초전도 한류기를 대상으로 LG산전 PT&T에서 성능시험을 실시하였다. 시험은 계통에서 발생할 수 있는 모든 단락상황을 가정하여, 1선 지락, 선간 단락, 삼상 단락사고를 모의하여 실시하였다. 단락전류는 1kA부터 시작하여 10kA까지 인가하였으며, 시험결과 모든 단락상황에 대하여 제작된 초전도 한류기는 양호한 한류성능을 나타내었다. 사고전류는 0.5ms 이내에 한류되었으며 최대 사고전류치에 비해 약 1/5 수준 미만으로 사고전류를 제한할 수 있었다. 또한 반복 실험에도 초전도 한류모듈의 열화는 전혀 없었으며 한류특성의 재연성 또한 우수하였다. 초전도 한류기의 특징인 사고전류가 커질수록 동작 시간이 단축되어 실제 10kA 이상의 단락전류에 대해서도 양호한 한류특성을 보일 것으로 예상된다. 이러한 초전도 한류기가 향후 배전급, 송전급까지 개발되어 계통에 투입된다면 전력계통의 단락전류가 확실하게 제어가 가능하므로 신계통의 구성 또는 기존 계통에 적용시 많은 장점을 제공할 것으로 예상된다.

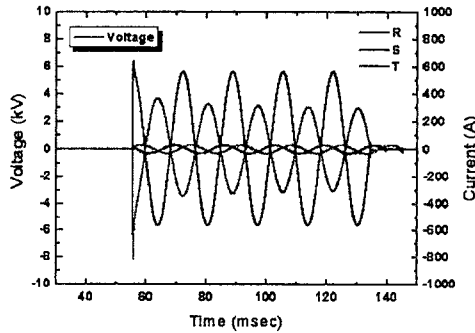


그림 8. 1선 지락 사고(10kA)

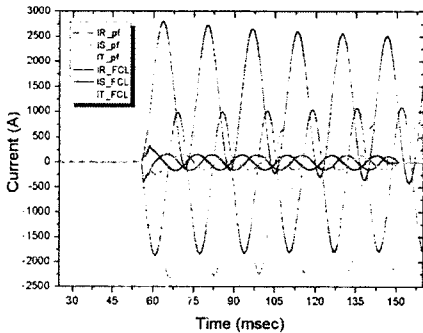


그림 9. 3상 비대칭 단락사고(1kA)

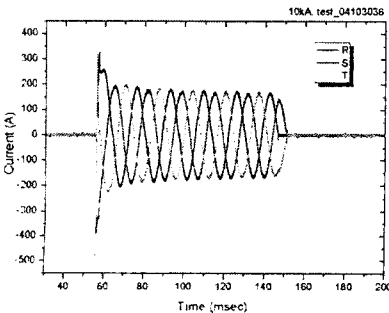


그림 10. 3상 비대칭 단락사고 파형(10kA)

3. 결 론

6.6kV/200A급 삼상 초전도 한류기 개발에 관한 연구로서, 그동안 진행된 연구활동의 일부로서 초전도 한류소자의 설계, 초전도 한류모듈 설계, 삼상 초전도 한류기의 제작 및 성능시험 결과를 제시하였다. 본 논문에서 언급한 연구 결과물 이외에도 많은 실험 및 해석, 시행오차를 거쳐 세계적으로도 뒤지지 않는 연구 결과를 얻어낼 수 있었다. 현 시점에서의 연구 결과는 향후 배전급 및 초고압급 초전도 한류기 개발에 응용될 것이며, 극저온에서의 고압화 대용량화시의 절연기술의 확보, 냉각 기술의 신뢰성 확보, 장기 운전 기술 확보등이 이루어진다면 초전도 한류기 상용화가 그리 멀지 않은 장래에 이루어질 것으로 예상된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Makan Chen et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", EUCAS 2001, Copenhagen
- [2] B. Gromoll et al., "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.7, No. 2, 1997
- [3] H. Kubota et al., "A new model of fault current limiter using YBCO thin film", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No. 2, 1999
- [4] 임대준, 고태국 et al., "DC 리액터형 고온초전도한류기의 전력계통 연계를 위한 자기철심 리액터의 설계", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.322~325
- [5] 최효상 et al., "1.2kV/70A급 초전도 한류기의 전류제한 특성", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.368~370
- [6] 박권배, 이방욱 et al., "자기장이 인가된 YBCO 박막형 한류기의 켄치 특성", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.365~367
- [7] William Chen, "Current commutation in arcless interruptions with PTC", IEEE pp. 141~147
- [8] R. Strumpler et al., "Novel medium voltage fault current limiter based on polymer PTC resistors", IEEE Trans. on PD, Vol.14, No. 2, 1999 pp.425~430
- [9] Walter Halaus et al., "Ultra fast switches", IEEE 2002, pp. 299~304