

유도형 고온초전도 한류기의 개발 현황 및 전망

고 태 국
연세대학교 전기전자공학과

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가로 인해 전원설비가 증대되고 전력계통이 확충되면서 계통 임피던스가 낮아져 계통의 단락용량은 꾸준히 증가하고 있다. 계통의 단락 용량 증가는 곧 전력 계통의 안정성을 떨어뜨려 심각한 전압 강하를 발생시키게 될 것이다. 이를 막기 위해서 대용량의 차단기를 추가로 설치해야 한다. 그 수는 약 매년 350여대가 되며, 용량도 정격의 수백 배에 달하는 대용량으로 대체되어야 한다. 이러한 문제점들은 전력계통의 심각한 사고를 유발시킬 수 있으며, 차단기를 새로 설치함으로써 차단기 입지가 문제가 될 수 있으며, 절연유 또는 절연가스의 사용으로 인한 환경오염이 문제가 된다. 또한, 막대한 전력 설비비용이 필요할 것으로 예측된다. 이러한 단점들을 보완하며 안정적인 전력 계통의 용량 증가를 피하기 위해서는 초전도한류기(SFCL; Superconducting Fault Current Limiter)의 설치가 불가피하다 [1]. 초전도한류기는 사고발생 후 차단기가 동작하기까지의 5~7주기 동안의 높은 사고 전류를 효과적으로 제한시켜주는 특징을 갖는다. 이러한 이유로, 많은 나라에서 고온초전도 한류기의 상용화를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 초전도전력기기 중 가장 상용화에 근접해 있다는 평가를 받고 있다.

고온초전도 한류기는 전류제한 방식에 따라 크게 유도형 한류기와 저항형 한류기의 2가지로 분류된다. 저항형 한류기는 초전도 소자를 계통에 직렬로 삽입하여 단락사고가 발생하면 초전도체의 상전이(quench)시의 저항변화를 이용하여 사고전류를 제한하는 장치이며, 유도형 한류기는 사고전류를 유도성분에 의해서 제한하는 방식이다. 현재 세계적으로 두 가지 형태 모두가 연구 중이며, 국내에서는 21C 프론티어 사업의 일환으로

연세대학교가 유도형 고온초전도 한류기를, 한국전력연구원이 저항형 고온초전도 한류기를 개발하고 있다.

본 특집에서는 유도형 고온초전도 한류기의 국내외 연구 개발 현황을 알아보고, 향후 전망에 대하여 알아보하고자 한다.

2. 국내외 기술 개발 현황

2.1 국외 개발 현황

유도형 고온초전도 한류기는 다양한 형태의 모델이 개발되고 있으며, 그 중 대표적인 것으로 자기차폐형 한류기와 DC reactor형 한류기를 들 수 있다. 자기차폐형 한류기는 가장 구조가 간단하며 기술적 접근이 쉬워 고온초전도 응용기술의 초기부터 꾸준히 연구되어 오고 있다. 대표적인 개발 사례로는 1997년 스위스의 ABB社에서 10.5kV급(1.2MVA)을 개발하여 자체 보유중인 수력발전소와 연계하여 그 성능을 테스트하여 상용화 가능성을 입증한 것이 있다. 그림 1은 이 한류기의 사진이다.

DC reactor형 한류기는 사고시에도 초전도체에 quench가 발생하지 않을 수 있고, 초전도체에 직류전류만이 흐르기 때문에



그림 1. 스위스 ABB에서 개발한 10.5 kV급 자기차폐형 고온초전도 한류기

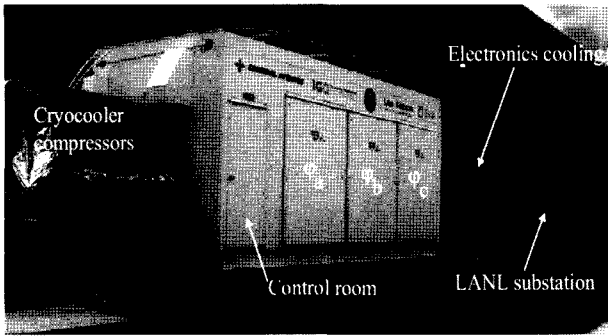


그림 2. 미국 GA와 LANL에서 개발한 12.5 kV/2 kA급의 DC reactor형 고온초전도 한류기

교류손실이 없는 등의 장점을 갖는다. 뿐만 아니라, 송배전급의 실계통에 직접 투입할 수 있는 대용량급 한류기의 개발가능성이 높아져 현재 세계적으로 가장 많이 연구되고 있다. 미국의 General Atomics와 LANL은 에너지성(DOE)의 지원 하에 SPI 프로젝트의 일환으로 이러한 한류기를 개발하였으며, 1993년부터 1999년까지 1단계 연구가 끝난 상태이다. 그 결과로 1999년 3상 12.5kV/1200A급 한류기를 제작하여 단상에서의 field test를 성공적으로 마친 바 있다. 현재 3상 전체 시스템의 시험을 준비 중이다. 특히 이 한류기는 임계전류가 2kA 이상의 대형 고온초전도 솔레노이드 마그넷을 DC reactor로 이용하고 있으며 냉각시스템은 전도냉각 방식이고 운전온도는 40K이다. 그림 2는 미국에서 개발된 12.5 kV급 한류기의 모습이다[2].

일본의 경우 동경전력회사(TEPCO)와 도시바(Toshiba)가 현재 DC reactor형 고온초전도 한류기를 개발 중이며 2000년에 단상 6.6kV급 초전도한류기의 실험을 완료하였다. 현재는 Super-conductive AC Equipment (Super-ACE) 프로젝트로서 2004년까지 66kV/750A급 3상 초전도한류기를 개발 중이다. 일본에서 개발되고 있는 DC reactor형 한류기의 특징은 3상의 경우 각 상에 초전도 코일을 각각 설치하여 3개를 설치하는 것이 아니라, 3상 변압기를 이용하여 DC reactor 초전도 코일을 한 개만 사용한다는 것이다. 그림 3은 도시바와 동경전력이 개발하는 고온초전도 한류기용 dc reactor이며 과냉질소 65K에서 운전되며, 역시 솔레노이드 권선이 사용되었다[3].

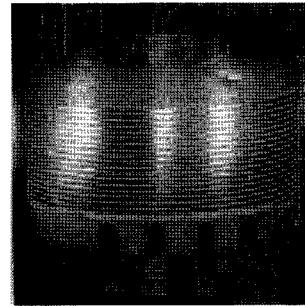


그림 3. 일본 도시바와 동경전력에서 개발 중인 66kV급 DC reactor형 고온초전도 한류기용 DC reactor

2.2 국내 개발 현황

현재 국내에서의 고온초전도 한류기 개발은 1993년 연세대학교에서 처음 시작한 이래 여러 가지 형태의 고온초전도 한류기에 관한 연구가 진행 중에 있다. 초기에는 자기 차폐형의 고온초전도 한류기를 주로 연구하였으며, 1997년에는 그 모델을 개량하여 세계 최초로 air gap이 도입된 고온초전도 한류기를 개발하여 실험에 성공하였다. 이후로는 기존의 자기차폐형 고온초전도 한류기를 개량한 rod-type 고온초전도 한류기를 개발하여 1kV까지 실험에 성공하였다. 그림 4는 연세대학교가 2001년에 개발한 1kV급 자기차폐형 고온초전도 한류기이다[1].

현재 국내에서의 유도형 고온초전도 한류기 연구는 과학기술부 21C 프론티어 사업의 하나인 차세대초전도응용기술개발 사업의 일환으로 활발하게 진행 중이다. 프론티어 사업의 단계별 목표는 다음과 같다. 2001년 9월부터 시작하여 1단계 3년 후인 2004년 7월까지 6.6kV/200A급 한류기 개발, 2단계 3년 후인 2007년까지 22.9kV/630A급,

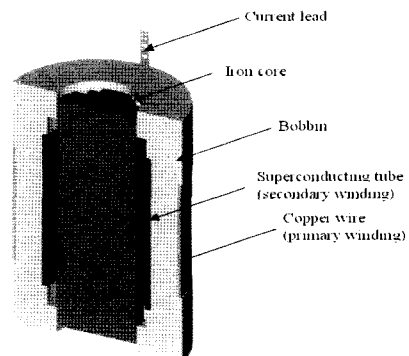


그림 4. 연세대학교가 개발한 1kV급 자기차폐형 고온초전도 한류기

154kV/2kA급 유도형 고온초전도 한류기를 그리고 마지막 3단계 4년 후인 2011년까지는 개발하는 것이다. 현재는 1단계 2차년도 연구를 진행 중에 있다. 1단계에서는 6.6kV급 한류기 개발을 목표로 하여 1차년도에 1.2kV/80A급 한류기 개발, 2차년도에 6.6kV/200A급 한류기 시험기 개발, 3차년도에 6.6kV/200A급 한류기 실용화급 제품 개발을 목표로 한다. 현재 유도형 고온초전도 한류기 개발 사업은 연세대학교가 주관하여 연구가 진행 중이며, 2002년 1.2kV/80A급 한류기를 개발하여 단락시험을 완료한 상태이다.

연세대학교에서 개발하는 유도형 고온초전도 한류기는 세계적인 연구 흐름과 마찬가지로 DC reactor형 고온초전도 한류기이다. 고온초전도 솔레노이드 코일을 DC reactor로 사용하는데, 일본과 마찬가지로 3상 계통 적용에 한 개의 coil을 사용하는 방식이다. 이러한 한류기의 개발은 크게 4개의 부분에서의 연구 개발이 진행되어야 한다. DC reactor로 사용할 고온초전도 마그네틱의 개발, 삼상 AC/DC전력변환기 개발, 자기철심리액터(3상 변압기)의 개발, 냉각시스템의 개발이 그것들이다. 1.2kV/80A급 유도형 고온초전도 한류기는 냉동기를 이용한 전도냉각 방식을 사용하여 약 20K에서의 마그네틱을 운전하였다. 그림 4는 제작된 DC reactor와 냉각시스템의 사진이며, 그림 5는 연세대학교에서 개발한 1.2kV/80A급 고온초전도 한류기의 단락시험 모습이다. 그림 6은 이 한류기의 단락시험 결과를 나타내고 있다. 그림 6.(a)는 한류기를 설치하지 않은 상태에서의 사고 시

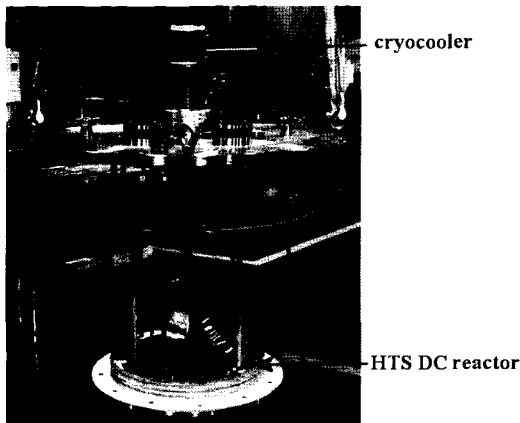
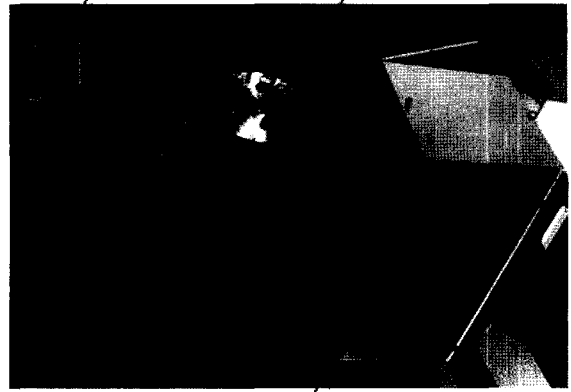


그림 4. 1.2kV/80A급 고온초전도 한류기의 전도냉각 시스템을 포함한 DC reactor

magnetic core reactor HTS DC reactor

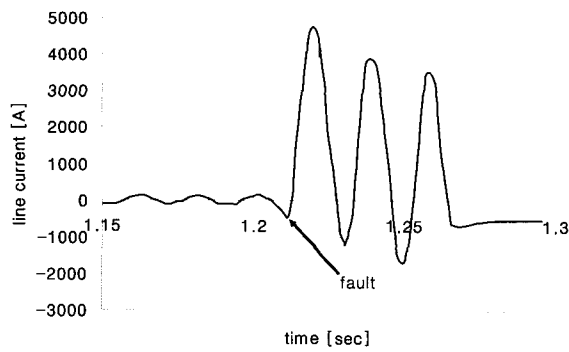


power converter

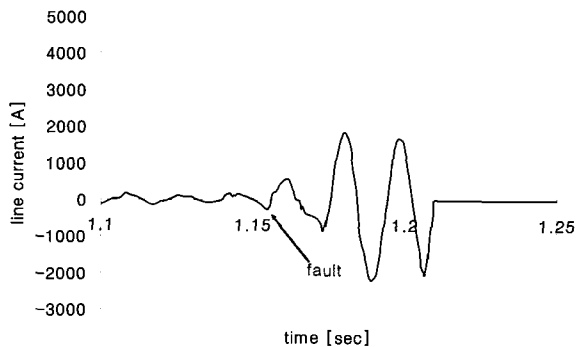
그림 5. 연세대학교에서 개발한 1.2kV/ 80A급 DC reactor형 고온초전도 한류기

전류를 보여주고 있다. 사고 발생 후 첫 번째 피크에서 한류기가 설치되지 않은 경우 사고전류는 4600A이상까지 올라간다. 그러나, 그림 (b)처럼 이 한류기가 설치되면 사고전류는 약 550A로 줄어들게 된다. DC reactor형 초전도한류기의 최대 장점은 그래프에서 보는 것처럼 사고가 발생한 후 전류가 점차 증가하는 것이다. 즉, 사고 발생 직후에 전류를 효과적으로 제한한다. 다른 형태의 대부분의 한류기는 사고가 발생하면 제한된 전류는 시간이 흐를수록 감소한다. 따라서 사고 발생 직후에는 상대적으로 높은 사고 전류가 생긴다. 차단기의 기술이 발전하여 고속차단기가 개발되고 한류기 자체의 제어를 통해 짧은 시간만에 사고전류를 한류소자로부터 분리할 수 있게 되면서 사고발생 직후의 효과적인 사고전류 제한은 매우 중요한 장점으로 부각되고 있다. 본 단락시험은 본래의 실험 계획 상 사고 발생 후 반주기(half cycle)인 약 8ms만에 전력변환기를 제어하여 사고전류를 DC reactor로부터 분리하려 하였으나 본 결과에서는 감지의 문제로 차단기가 동작한 3cycle 동안 사고가 진행되었다. 향후, 이를 보완하면 사고전류는 보다 효율적으로 제한이 가능하여 지게 된다.

2002년 7월 이후로 진행 중인 프론티어 사업 1단계 2차년도의 연구로서 현재 연세대학교에서는 6.6kV/200A급 유도형 고온초전도 한류기의 한류동작 시험기를 제작하고 있다. 1차년도의 전도냉각을 과냉질소(sub-cooled nitrogen)시스템으로 변경하고, DC



(a) 한류기 없는 경우



(b) 한류기 있는 경우

그림 6. 1.2kV/80A급 DC reactor형 고온초전도 한류기 단락시험 결과(연세대 제작, 한국전기연구원 시험)

reactor의 권선방식도 double-pancake에서 solenoid로 변경하였다. 이러한 변화는 22.9kV이상의 대용량 고온초전도 한류기 개발을 위하여 필수적인 변화라 할 수 있다. 현재 연세대학교에서는 6.6kV/200A급 한류기의 각 요소별 설계가 끝나고 제작 중에 있다.

3. 기술 전망과 파급 효과

전력계통의 전력량 증가는 높은 과전류를 발생시키며 이에 따라 심한 열적, 기계적 스트레스가 수반되어 시스템에 심한 손상을 가져올 수 있게 된다. 사고전류에 대처하는 기존의 방식으로 차단기를 설치하는 방법이 있는데, 높은 사고전류가 5~7 주기 동안 그대로 회로에 인가되어 시스템의 보호가 불안정한 실정이며, 계통 용량의 증가 시 계통의 변경이 따른다는 단점이 있는 반면 고온초전도 한류기의 설치로 그러한 단점을 극복하여 훨씬 안전하게 시스템을 보호할 수 있는

계통의 변경 없이도 용량을 증가시킬 수 있다. 또한, 고온초전도기기 중 고온초전도 한류기의 상용화 및 실용화가 제일 빠를 것으로 예측되어 다른 고온초전도응용기기에도 상당한 파급효과를 미칠 것으로 기대되고 있다[1].

유도형 고온초전도 한류기의 개발은 국내외적인 많은 연구 그룹들의 활발한 연구활동으로 인하여 수많은 새로운 결과들이 발표되고 있으며, 그 실용화가 임박하여 있음을 알 수 있다. 미국의 경우 2003년 이내에 삼상 15kV급 한류기의 field test가 완료될 것으로 보이며, 일본은 2004년까지 66kV급 3상 한류기가 제작될 것으로 예상된다. 국내의 경우는 연세대학교가 2003년 7월 이전에 6.6kV급 한류기의 전류 제한 실험을 수행하고 2004년까지 6.6kV급 시제품을 제작하게 된다. 이러한 국내외적인 연구결과들은 그 용량이 실제 전력계통에 사용가능한 scale에 근접했음을 보여주고 있다. 따라서, 유도형 고온초전도 한류기는 2004년 이후 송배전급에서 사용 가능한 수십~수백 kV급의 상용 제품의 개발이 가능할 것으로 전망할 수 있다.

4. 맺음 말

전력계통의 전력량 증가에 따른 단락용량의 증대와 높은 사고전류에 대한 대책으로서 고온초전도 한류기의 개발은 필수적이다. 이에 많은 연구가 세계적으로 진행 중에 있으며 특히 송배전급에서의 대용량급을 위하여 DC reactor type의 유도형 고온초전도 한류기에 많은 연구가 집중되고 있다. 미국과 일본이 앞 다투어 수십 kV급 한류기를 1~2년 내에 개발하여 field test할 것으로 예상되며, 우리나라의 경우에도 21C 프론티어 사업의 일환으로 연세대학교가 6.6kV급 한류기를 개발 중이다. 향후 프론티어 사업이 2단계에 접어들면 국내에서도 22.9kV의 배전급 계통에 사용할 수 있는 한류기를 개발할 계획이다.

갈수록 심각해지는 단락용량의 증가와 사고전류의 증가를 효과적으로 제한하고 조절할 수 있는 고온초전도 한류기의 실용화, 상용화가 수 년 이내로 다가왔다. 사고전류로 인한 전력기기의 손실과 단락용량 증가에 따

라 지불해야하는 막대한 양의 차단기 교체 비용 등 직면한 많은 부분의 문제점을 해결할 수 있는 고온초전도 한류기의 실용화, 상용화를 기대해본다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사 전력연구원, 초전도 사고전류 제한 기술개발(I) 최종보고서, 2002. 3
- [2] LANL, http://www.lanl.gov/orgs/mst/stc/power_FCL.shtml
- [3] T. Yazawa et al., "66kV-class High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet Model Coil Experiment", presented at ASC 2002, Houston, August, 2002

저자이력



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업(학사), 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 한국초전도·저온공학회 총무이사