

3상 6.6kV/200A급 유도형 초전도 한류기 개발

고 태 국

연세대학교 전기전자공학과

1. 서 론

전 세계적으로 대규모 정전사태가 발생하고, 국내 전력계통의 경우에도 전력수요가 폭발적으로 증가하여 단락, 지락, 낙뢰 등의 전력사고(고장) 발생 시 기존 차단기의 용량으로는 차단할 수 없는 대형 사고가 발생하고 있다. 이렇게 대규모의 정전 사태의 원인은 병렬 network이다. 우리나라 역시 전기공급을 병렬 network로 운전하고 있어 대규모 정전 사태에 직면할 가능성이 있다. 현재 전력계통은 사고전류에 대한 대책으로 차단기를 설치하고 있으나 차단기는 사고 감지 후 차단까지 0.1초 이상의 긴 시간이 소요되어 전력기기의 수명단축 및 고장 등이 발생하기에 차단기 동작이전에 사고전류를 제한할 수 있는 초전도한류기(SFCL: Superconducting Fault Current Limiter)의 도입이 필수적이다. 초전도한류기의 경우 기존 회로의 변경 없이 차단기의 용량을 3~5배 이상 증대시키는 효과를 내는 등 그 파급 효과가 클 것으로 예상되어 미국, 일본, 유럽 등지에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

우리나라에서는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 “차세대초전도

표 1. DAPAS 사업의 유도형 초전도한류기 개발 1단계 연구계획

기간	개발 목표
1차년도 2001.9~2002.7	1.2kV/80A
2차년도 2002.8~2003.7	6.6kV/200A 단시간 운전
3차년도 2003.8~2004.6	6.6kV/200A 장시간 운전

응용기술개발사업(DAPAS program)의 과제 중 상용화 모델을 축소한 6.6kV/200A 유도형 초전도한류기를 연세대 고태국 교수팀이 프리컴시스템(주)과 진광이앤씨(주)의 협동 연구로 2001년부터 시작하여 2004년에 개발하였다.

이 글에서는 연세대학교에서 연구한 6.6kV/200A 3상 유도형 초전도한류기의 연구 개발 과정과 성과에 대해 설명하고자 한다.

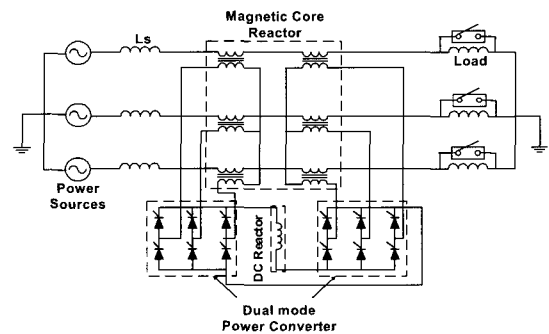


그림 1. 삼상 DC reactor형 초전도한류기의 등가회로

2. 유도형 초전도한류기 개발 과정

유도형 초전도한류기는 그림 1처럼 크게 MCR(magnetic Core Reactor)과 전력변환기(Power converter)와 DC reactor의 3개의 시스템으로 이루어져 있다. 저항형 한류기와는 다르게 계통에 직렬로 연결되지 않고 MCR을 통해 계통과 연결된다. 정상 상태에서는 DC reactor의 저항이 0이기 때문에 DC reactor에 걸리는 전압은 0이 되어 손실이 없다. 사고가 발생하여 전류가 급격히 증가하면 DC reactor의 인덕턴스에 의하여 사고 전류가 제한된다.

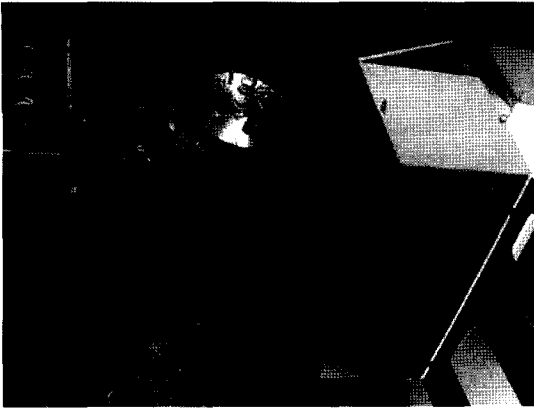


그림 2. 1.2kV/80A DC reactor SFCL (2002년 6월 단락시험 장면)

① 1차년도: 1.2kV/80A

2001년 9월부터 1.2kV/80A의 용량을 목표로 초전도한류기 연구를 시작했다. DC reactor의 냉각 방식은 임계 전류의 이득을 얻을 수 있는 전도 냉각 방식으로 20K까지 냉각하였고 마그네트는 더블 팬 케이크 형태로 제작하였다. 3상 정류를 위한 전력변환기는 6개의 싸이리스터로 구성되었고 각각의 싸이리스터는 사고 감지 후 전기적 신호로 트리거 오프시켜 차단기가 작동하기 이전에 사고 전류를 제한할 수 있도록 설계하였다. 그림 2는 완성된 1.2kV/80A급 한류기의 모습이다. 단락 시험에서는 성공적으로 전류를 제한하여 대용량 DC reactor형 한류기의 개발 가능성을 제시하였으나 전도 냉각의 열적 안정성이 떨어지는 문제점이 있어 새로운 냉각 방식의 개발의 필요성이 부각되었다.

② 2차년도 : 단시간운전용 6.6kV/200A

2차년도 목표인 6.6kV/200A 급 한류기를 제작하기 위해서 1차년도에 비해 많은 변화가 있었다. 가장 큰 변화는 열적 안정성을 확보하기 위하여 전도 냉각 대신 과냉질소를 이용한 냉각방식을 선택하였고, 마그네트 역시 더블 팬케이크 형태에서 보빈을 이용한 솔레노이드 타입으로 바뀌었다. 과냉질소를 이용한 냉각 방식은 사고 후 선재 보호 등의 열적 안정성을 갖게 하는데 이점이 있었고 전기적 절연 측면에서 액체질소는 상당히 좋은 장점을 갖고 있다. 하지만 과냉질소를 사용하면 냉각 온도가 65K으로 1차년도에 비해 상당히 많이 동작 온도가 올라갔기 때

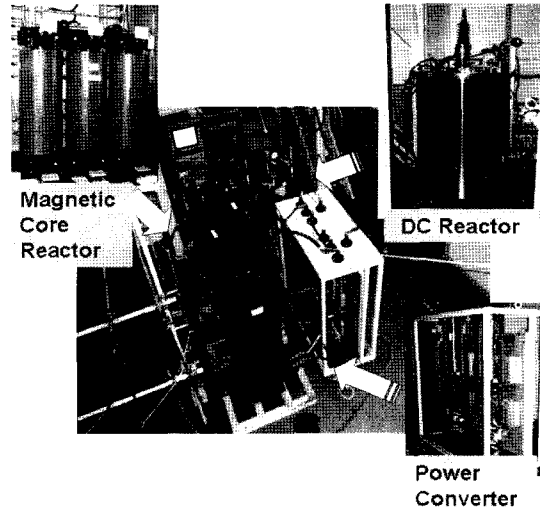


그림 3. 6.6kV/200A DC reactor 한류기

문에 DC reactor의 임계전류를 향상시키기 위한 방법이 필요하였다. 그래서 선재 4개를 적층하여 솔레노이드를 만들었고, 사고 제한에 충분한 임피던스를 주기위하여 보빈 5개를 직렬로 연결한 DC reactor를 설계하였다. 이런 변화가 2차년도 목표를 성공적으로 달성할 수 있었던 중요한 요인이었다. 전력변환기는 1차년도에서는 6개의 싸이리스터를 이용한 single mode이었는데, 2차년도에서는 12개의 광 트리거 싸이리스터를 이용한 dual mode로 제작하였다. 그림 3은 2차년도에 제작한 유도형 초전도한류기의 모습이다. 단락 시험에서는 5.6kA의 사고 전류를 2 cycle 동안 1.7kA로 제한하는 성공적인 전류제한 효과를 보여줬다. 그림 8은 이러한 한류기의 성능시험 결과를 보여준다.

③ 3차년도 : 장시간운전용 6.6kV/200A

3차년도 초전도한류기는 시스템은 2차년도에 성공적으로 개발한 초전도한류기의 성능을 유지하면서 장시간 운전을 위하여 DC reactor의 열 부하를 줄이는 연구를 중점적으로 수행하였다. 그림 4는 바뀐 DC reactor의 개념도이다. DC reactor내의 일반 도체에서 나오는 열을 줄이기 위하여 보조 전류 리드와 보빈 연결 부위에 초전도 선재를 접합하여 열 부하를 줄였고, 가장 큰 변화는 cryostat의 구조를 과냉질소 순환 방식에서 vacuum type으로 변환하였다. 그림 5는 완성된 DC reactor의 모습이다.

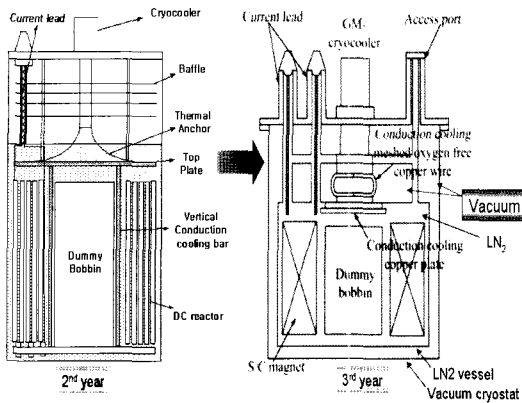


그림 4. 3차년도 냉각시스템의 변화

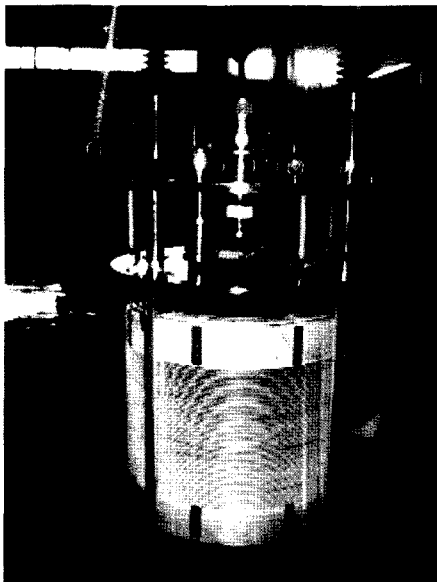


그림 5. 완성된 DC reactor

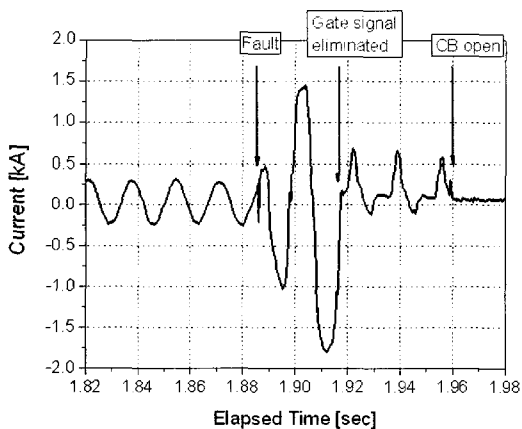


그림 6. 6.6kV/200A급 초전도한류기 단락시험 결과

전체적인 열 부하는 2차년도의 87W에 비하여 거의 절반인 47W로 줄일 수 있었다. 그림 6은 3상 단락시험 시의 한상에서의 선전류 결과이다. 처음 사고 제한 후 2 cycle 만에 전력 변환기에서 사고를 감지하고 싸이리스터의 게이트 신호를 없애서 더 이상 사고 전류가 커지지 않게 해준다. 기존의 DC reactor형 초전도한류기는 사고시간이 지속됨에 따라 점차적으로 전류가 증가하면서 전류를 제한하는 것이 일반적이었다. 따라서 사고시간이 지속되는 경우에는 초전도 DC reactor에 높은 전류가 계속 흐르게 되어 초전도한류기의 안정성을 보장하기에는 무리가 있었다. 그러나 전력변환기의 제어를 이용한 본 실험 결과의 경우 사고 발생을 감지하여 1-2주기 이후로는 사고전류가 증가하지 않고 점차적으로 감소하기 때문에 기존의 어떠한 계통에 삽입하여도 무리 없이 운전할 수 있다는 매우 중요한 의미를 갖는다.

3. 개발 현황 및 시험 결과

이번에 개발한 유도형 초전도한류기는 전력계통의 사고발생 시 고장전류를 초전도코일의 인덕턴스에 흐르게 하여 순간적으로 고장전류 상승을 억제하는 기능이 있다. 초전도한류기의 정격용량은 3상 6.6kV/200A이며, 연세대 연구팀은 한류기 개발과 더불어 세계 수준의 기술력을 확보하게 되었다.

- ① 비전치식 보조권선법에 의한 대용량 초전도 DC reactor 개발(그림 7)
- ② 과냉질소를 이용한 특수냉각시스템 개발에 의한 최초 실험 성공
- ③ 고온초전도 코일용 자동권선기
- ④ 극저온 보빈 제작 기술
- ⑤ 과냉질소 냉각 장치 개발
- ⑥ 전력변환 응용 기술을 이용한 사고전류 조절 기능

또한 2001년 9월에 연구를 시작한 이래 불과 2년 6개월여 만에 최근 단락시험을 수행하였다. 그림 8은 단락시험 결과를 보여주는 그래프이다. 그래프에서 한류기가 없는 경우 사고전류는 5.6kA이상 올라가게 되며, 모의실험이 아닌 실제 단락사고라고 가정하면 정상 시 전류의 20배에 달하는 전류가 약

0.1초의시간 동안 계통에 흘러 막대한 피해를 줄 것으로 예상된다. 하지만, 그래프에서 초전도한류기가 있는 경우에는 사고가 발생하자마자 전류를 제한하기 시작하여 전류가 서서히 증가하고 있으며, 사고 발생 후 0.05초

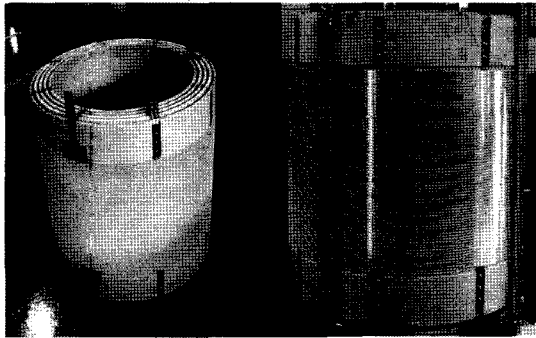


그림 7. 세계 최고 수준의 초전도 코일

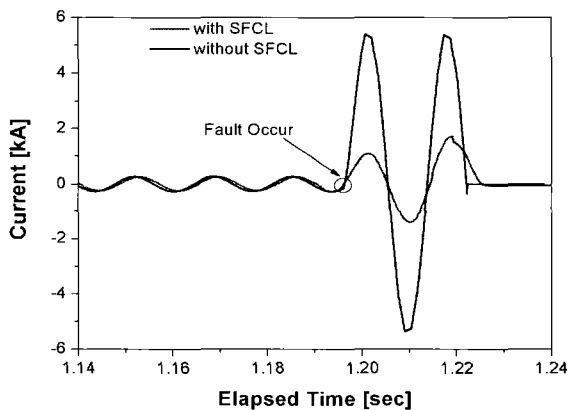


그림 8. 개발된 초전도한류기의 실제단락시험결과 (한류기 유무에 따른 사고전류 파형 비교)

이후에도 사고 전류의 약 30% 수준인 1.7kA로 사고 전류를 제한하여 주는 것을 확인하였다. 이러한 한류효과는 세계최고 수준의 결과이다.

4. 개발성과 및 향후계획

① 기술적 성과

한류기의 용량 면에서는 미국 GA사와 LANL의 12.5kV/1.2kA급에 이어 세계 2번째

의 용량이다. 그러나 미국의 경우는 단상 실험에서만 성공한 상태이며, 사고 발생 직후에 순간적인 사고 전류는 제한하지 못하는 등 전류 제한 효과에서의 성능이 이번에 개발된 한류기에 비해 떨어진다. 일본의 경우도 6.6kV/36A급 한류기 개발에 성공했지만 전류용량 면에서 본 연구결과가 앞선다. 비전치식 보조권선법에 의한 대용량 초전도 코일을 개발하고 과냉질소를 이용한 특수 냉각시스템을 개발하여 장시간 안정성을 확인하는 등 세계적 수준의 핵심 기술을 개발하였다.

2년 6개월여 간의 연구개발 과정동안 국내 특허 4건 국제(미국) 특허 1건 출원을 비롯하여 IEEE등 세계적 권위의 학술지에 20편의 우수 논문을 발표하여 세계적으로 기술 수준을 인정받고 있다.

② 경제, 산업적 파급 효과

작년 미국의 정전 사태 때에 피해액은 약 50억 달러였고, 전력공급이 30시간 이상 중단되었었다. 하지만 초전도한류기가 계통에 투입되면 이런 대규모 정전 사태를 예방할 수 있고 전력 계통의 신뢰도 향상에 기여할 수 있다. 또한 용량 초과로 인해 교체해야하는 차단기를 교체 하지 않고 그대로 사용이 가능하기 때문에 교체비용을 절감할 수 있다.

③ 향후계획

앞으로 2007년까지 22.9kV의 배전급 초전도 한류기의 단락시험 모델을 개발할 계획으로, 이를 초전도한류기의 상용화 시점으로 예상하고 있으며, 실증 시험과 분석을 통하여 실제 투입할 예정이다.

5. 결 론

전력계통의 전력량 증가에 따른 단락용량의 증대와 높은 사고 전류에 대한 대책으로서 고온초전도한류기의 개발은 필수적이다. 이에 많은 연구가 세계적으로 진행 중에 있다. 미국과 일본이 수십 kV급 한류기를 1~2년 내에 개발하여 field test를 할 것으로 예상되고 있다. 우리나라 역시 프론티어 사업의 일환으로 연세대학교에서 6.6kV급 유도형 초전도한류기를 성공적으로 개발하였다. 하지만 용량이 증가할수록 부피가 커지는 단점

을 갖고 있고, 2G 선재인 YBCO Coated Conductor(CC)가 빠르게 개발됨에 따라 새로운 형태의 22.9kV의 배전급 한류기를 개발할 계획이다. CC 선재는 임계전류밀도가 높고 n value가 작으며 또한 재료비가 적게 들어 향후 개발이 완료되면 비용과 부피 측면에서의 장점이 많을 것으로 확실시 되고 있다. 따라서 2G CC 선재를 이용한 초전도한류기의 개발을 통하여 획기적으로 우수한 성능의 초전도한류기의 개발을 계획하고 있다. 갈수록 심각해지는 단락 용량의 증가와 사고전류의 증가를 효과적으로 제한하고 조절할 수 있는 초전도한류기의 상용화가 멀지 않았다. 사고전류로 인한 전력기기의 손실과 차단기 교체 비용 등 막대한 손실을 해결해 줄 수 있는 초전도한류기의 빠른 상용화를 기대해본다.

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 부회장