

6.6 kV 저항형 초전도 한류기 개발

현 옥 배
한전 전력연구원 책임연구원

1. 서 론

초전도 한류기는 전기 회로에 사고 발생시 대단히 빠르게 임피던스를 발생시켜 고장전류를 제한한다. 여러 종류의 고온초전도체가 한류기용 도체로 활용되고 있는데, 도체의 종류에 따라 다양한 종류의 초전도 한류기가 제안 및 개발되고 있다. 그 중 저항 스위치형 한류기는 다른 형식에 비해 작고, 간단하고, 필경 값이 싸다. 저항 스위치형 한류기는 통전 전류가 임계전류(Ic) 초과시 초전도체가 상전도체로 전이(quench)할 때 대단히 빨리 저항이 발생함을 이용하는 수동소자이다. 저항발생은 대단히 빨리 일어나는데, 이는 초전도체의 허용 전류밀도가 대단히 높아 상전이시 입력되는 에너지가 높은 (열용량이 적은) 이유로 온도상승이 대단히 빠른 것과 관계있다. 여러 가지 고온초전도체, 예로서 YBCO 박막 및 박막, BSCCO tube 혹은 plate, 게다가 최근 개발되고 있는 coated conductor (CC)가 저항스위치 한류소자 제작에 쓰인다. 현재 ABB 및 독일 Nexans 등에서 10 kV 급까지 개발 및 시험되어 있고, 미국 IGCSP에 의한 138 kV급 개발이 진행중이다. 특히 독일의 10 kV급 저항형 한류기는 변전소 실계통의 모선연계용으로 설치되어 2004년 4월1일부터 1년간의 실증 시험을 시작하였다.

고온초전도체는 산화구리 계열의 세라믹으로 제조공정의 어려움 때문에 특성이 불균일하거나 크기에 제한이 있는 등 불가피하게 결함을 갖는 것이 현실이다. 우선, 임계전류밀도(Jc)의 불균일 때문에 국부적 켄치에 의해 hot spot이 생기고, 도체 일부분이 전체 전압을 감당해야 하는 위험에 처한다. 그러므로 한류소자로 사용되기 위해서는 도체에 안정화재로 금속을 덧씌워 hot spot 발생시 전류를 우회하도록 한다. 이 금속 셉트는 단위소자 제작시 대단히 중요한 기술의 하나이다. 더하여, 도체 크기의 제한 때문에 전류 및 전압

용량에 한계가 있다. 그러므로 고전압에서 사용하기 위해서는 다수의 소자를 직렬 연결하는 기술이, 대용량 전류 통전을 위해서는 다수의 소자를 병렬하는 기술이 필요하다. 여러 소자를 직렬연결하면, 전류가 Ic를 초과할 때 소자의 켄치가 대단히 빨라 일부의 소자가 먼저 켄치되고, 따라서 일부 소자에 전체전압이 인가된다. 이는 전류가 필요이상으로 상승되는 것을 피할 수 없어 소자 손상의 원인이 된다. 그러므로 전체소자가 동시에 켄치되도록 조절하는 기술이 필요하다. 본 개발에서는 동일 셉트저항 방식으로 해결하였다. 한편, 병렬연결 회로에서 과전류에 의해 소자 켄치시는 한 소자가 켄치되면 전류가 다른 소자로 즉시 이전되므로 동시 켄치에는 문제가 없다. 그러나, 상시 운전시 혹 병렬회로에 전류가 등분배되지 않으면 일부 병렬가지에 전류가 집중되어 소자를 켄치로 유도할 수도 있다. 그러므로 병렬회로의 전류등분배 기술은 대단히 중요하다. 본 개발에서는 초전도 직렬변압기(superconducting inter-phase transformer; SIPT)를 사용하여 문제를 해결하였다. 이 두 기술은 국내 고유 기술에 속한다.

본 개발은 6.6 kV/200 A급 저항형 한류기 개발에 관한 것이다. 본 연구에서는 초전도체로서 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 박막을 사용하고 있다. 이는 YBCO 박막이 특성면에서 우수하고, 소형 한류기에 적합한 이유도 있지만, 도체 부분이 없는 과제의 환경하에서 무엇보다 구입 가능한 도체이기 때문이다. 다른 도체가 가능하면 그에 맞는 한류기 디자인, 제작 방식이 개발될 것이다. 여기서는 상기 도체를 사용한 6.6 kV급 한류기 개발 과정에서 개발된 기술을 중심으로 기술할 것이다.

2. 단위소자 제작

YBCO 박막은 4인치 sapphire 기판에

YBCO를 300 nm 증착하고 전류 bypass 및 보호용으로 140 nm의 Au를 입힌 것이다. 이러한 도체는 국내 생산이 없어 독일 THEVA사로부터 구입하였다. 이것을 PCB 기술과 photolithography를 혼합한 식각을 통해 meander, bi-spiral 혹은 spiral 형태의 한류소자를 만든다. 각종 전자장 해석과 켈치전파, 고속촬영에 의한 열전파 분석 등을 통해 최종적으로 bi-spiral 형태를 선택하였다. 이 소자는 켈치시 열발생으로 온도가 상승하는데, 소자의 안전을 위해 5주기 사고실험 전기간 250 K를 넘지 않도록 허용전압을 조정한다. 이 범위에서 1개 소자의 허용전압은 600 Vrms이다. 소자 손상에 대한 내구성을 보기위해 1.2 kVrms에서 50회 이상의 한류동작에도 전체 소자에 대해 소자성능에 이상이 없음을 확인하였다. 전극은 In soldering 등이 있지만, 본 연구에서는 기계적 접촉을 사용하였다. 복수의 나사를 사용한 전극으로 평균

접촉저항을 6 $\mu\Omega$ 이하로 유지하는데 성공하였다. 이런 조건에서 3상 한류기의 총 열손실은 5 W 이하이다. 한편, YBCO는 습도 등에 취약한 면이 있어 테프론 보호막을 입혔다. 이 보호막은 습기를 차단할 뿐만 아니라, 초전도 선간 절연성능을 크게 높일 뿐만 아니라, 굽힘 등 기계적 손상을 방지한다.

3. 직렬연결

6.6 kV급 3상 한류기는 3.8 kV급 단상 한류기 3대로 이루어진다. 1개 소자의 허용전압이 600 V이므로 3.8 kV급을 제작하기 위해서는 6매 직렬로 충분할 듯하다. 그러나 3상 연결시 상간 불균형에 대비하여 각 상의 전압등급을 강화할 필요가 제기되었다. 이 문제는 8매 직렬(4.8 kV급)함으로써 해결하였다. 그런데, 단순직렬 연결 상태에서 고장 실험을 하면 일부 소자가 먼저 켈치되며 저항이 발생하고 다른 소자는 켈치를 멈추게 되어 켈치된 소자에 전체 전압이 걸리게 되는 비효율적 상황이 발생한다. 이는 YBCO 박막 소자의 켈치가 대단히 빠르기 때문에 동시화가 안되는 것으로, 초기 켈치되는 소자의 스위칭을 지연시키거나 켈치가 늦은 소자의 스위칭을 촉진시켜야 한다. 알려진 동시켈치 방법으로는, (1) 선트저항을 소자 각각에 연결하되 소자에 유입되는 에너지가 같도록 저항을 적절히 조정 (KEPRI), (2) 소자 겉면에 In wire를 부착하여 전류 bypass를 만들어주는 방안 (Toshiba), (3) 병렬연결을 먼저 하여 병렬 Ic의 합이 직렬연결 전체에서 동일하게 만드는 방법 (Siemens), (4) 자기장을 직렬로 연결하여 고장전류가 만드는 자기장으로 소자의 켈치를 촉진시키는 방안 (EA Tech.) 등이 있다. (1)은 기술적으로 가능하나 작업이 방대하여 실용성이 없고, (2)는 소자 종류에 의존하는 한계가 있어 YBCO 박막에 부적절하고, (3)은 소자 개개의 Ic를 조사하여야 하는데다 소자 교체시 특정 Ic의 것을 사용해야 하는 문제가 있고, (4)는 회로에 추가 리액턴스를 남긴다.

여기에 본 연구에서는 동일 선트저항 방식을 채용함으로써 동시켈치를 유도할 수 있게 되었는데, 박막이 일정 품질관리하에 생산된다는 가정하에 소자를 추가적인 열발생으로부터 보호하면서 소자 개개의 특성을 조

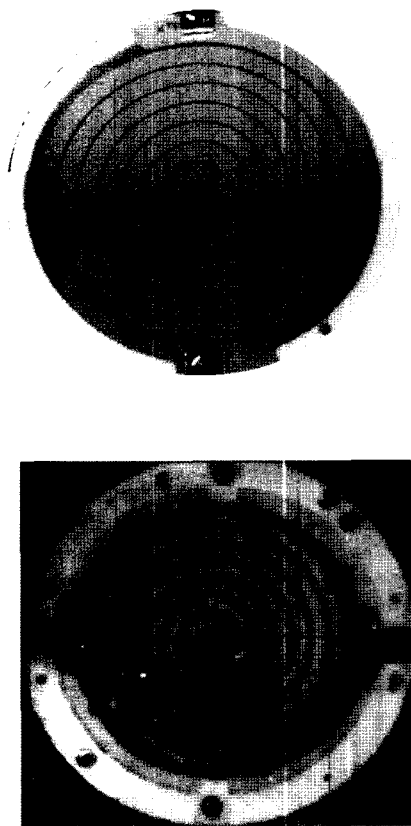


그림 1. Bi-spiral로 식각한 한류소자 (600V/35A급)(위), 한류소자의 켈치시 기포발생을 고속촬영한 이미지. 켈치전파를 보여줌 (아래)

사하지 않고도 조립할 수 있게 되었다. 이는 박막 100매 이상이 소요되는 한류기 제작에 있어 공정상 작업을 크게 단순화 시키므로 현실적 방안으로 평가된다.

병렬연결시 사고전류에 대한 동시퀀치는 문제되지 않는다. 전류가 커지면 병렬연결 소자중 1개가 먼저 퀀치되겠지만, 그 즉시 전류는 다른 병렬가지로 이전되므로 연쇄적으로 전체 소자가 퀀치된다. 그런데, 상시 운전시는 상황이 달라진다. 초전도 회로는 제작상 불가피하게 상전도 부분을 갖게 되는데, 그 크기가 대단히 작아서 $m\Omega$ 이하이다. 이런 저항에서는 모든 병렬가지의 저항치를 같게 만들기 쉽지 않다는 것이 문제의 발단이다. 병렬가지의 저항이 심각하게 다르면, 전류가 불균일하게 초전도 소자에 인가되고, 상시운전시 통전전류가 병렬소자 I_c 합보다 작음에도 소자 퀀치를 유발할 수 있다. 적절한 디자인 및 조립을 통해 해결할 수 있으면 다행이고, 실제 추가적인 device를 장착하지 않고도 적절한 설계를 통해 각 병렬가지의 저항을 균등하게 함으로써 병렬문제를 해결하였다. 그러나 그렇지 못할 경우에 대비한 대책도 마련하였다.

이 문제에 대해 일본 Mitsubishi가 병렬 각 가지에 리액터를 부착하여 전류를 등분배하는 방안을 선점하였다. 이에 대응하여 본 연구는 Superconducting Inter-Phase Transformer (SIPT)를 제시하였다. 리액터 방식이 리액터를 회로에 남긴다는 단점이 있는 반면, SIPT는 병렬 가지의 임피던스 보완 방식이므로 추가 임피던스를 남기지 않으면서 전류등분배를 실현한다. 공심 SIPT의 2차권선을 환상(loop)으로 결합하는 방안(second loop configuration), 사다리형 철심 가지에 권선하여 SIPT를 만드는 방안 등을 증명하였다. 분석결과 second loop configuration이 가장 적절한 방안으로 사료된다.

4. 6.6 kV급 3상 한류기 설계, 제작 및 시험

3상 6.6 kV/200 A급 단상 한류기는 단상 3.8 kV/200 A급 3기로 이루어지는데, 단상은 3.8 kV/35 A급 한류모듈을 우선 제작하고, 그 모듈을 6개 병렬 연결함으로써 이루어진

다. 3.8 kV급 한류기 제작은 단위소자를 8직렬하여 모듈을 만들고, 6개의 모듈을 병렬하여 이루어진다. 여기서는 우선 23 Ω 의 동일 선트저항을 부착한 모듈을 제작 시험하였다. 그림 1은 단상 한류기 회로도 및 조립된 모습을 보여준다.

소자와 소자 사이는 23 Ω 선트저항인데 약간의 열절연으로 액체질소 내에서 냉각을 지연시켰다. 이것은 초전도체 quench시 박막이 급격하게 기포를 발생시키고 나서 시차를 두고 선트저항에 의한 기포발생을 유도하여 냉각장치에 부담을 덜기 위함이다. 초전도 기기에서 불가피한 교류손실은 한류기에서는 대단히 작아서 문제되지 않는다. 다만, 조립 과정에서 상전도 전선 도입이 많으므로 그

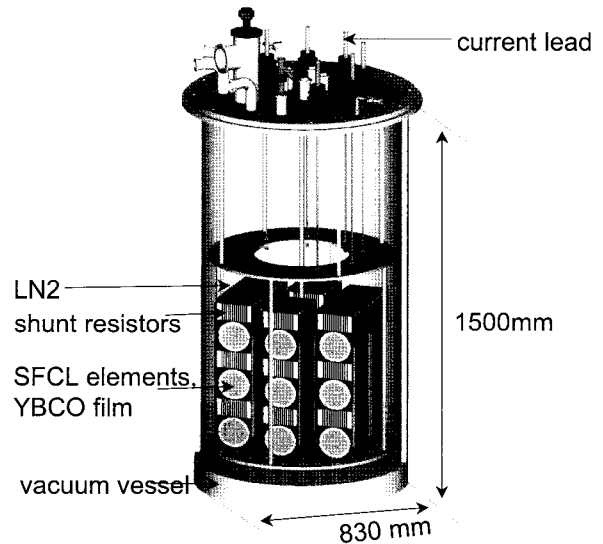


그림 2. 3.8 kV/200 A 단상 한류기 모듈 회로도 및 조립된 모습. 3상 한류기는 단상 3개로 조립

부분에서 손실이 있는 바, 본 연구에서는 조립후 3상 손실을 5 W이하로 낮추었다. 이 정도의 손실은 실제 전류인입선 35 W, 기타 열침입 20 W에 비해 대단히 작다.

3상 한류기 조립은 단상 3기를 조립하여 이루어진다. 가장 중요한 주변장치로서 저온장치는 6개의 전류인입선을 부착한 77 K용이다. 77 K 운용이 저온장치 설치 및 운용 경비면에서 가장 경제적이므로 추후 한류기 개발시에도 가급적 77 K 운용을 지향함이 타당하다. 단락시험은 공인기관인 LG산전의

시험연구소(Power Testing & Technology Institute)에서 이루어졌다.



그림 3. 한류기 시험 장면. 분출되는 하얀 기체는 증발한 질소가스

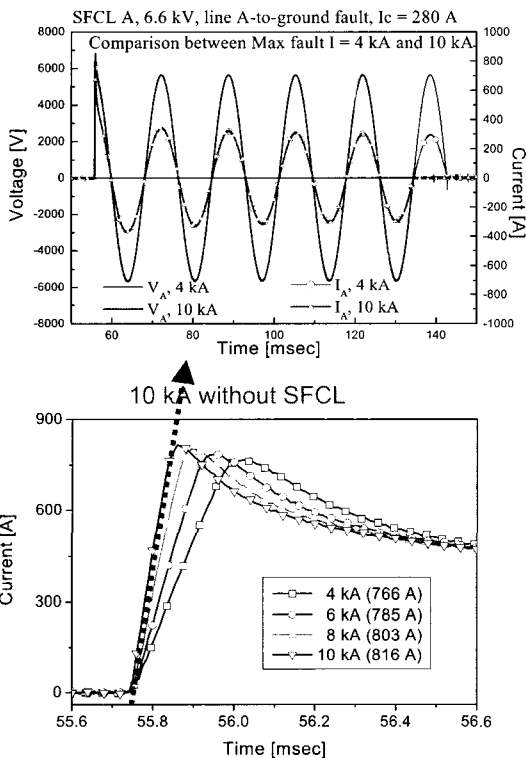


그림 4. 1선 지락에 대한 한류기 단락시험 결과. 한류개시 후 1 밀리초 이내에 한류동작 완료. 최대 고장전류를 정격전류의 33배인 10 kA까지 인가. 한류동작이 고장전류 크기에 무관함을 증명

1선지락, 선간단락 및 3상단락에 대해 정격 전류의 33배인 최고 10 kA의 고장전류를 인가한 바, 동 시험에서 모두 기대 이상의 한류결과를 보여 주었다. 어느 경우에도 최종 고장전류는 설계값인 300 Apeak를 보였고, 저항형 한류기의 특징인 초기 전류상승도 최고 800 Apeak 이하, 지속시간 1밀리초 이하로 유지하는데 성공하였다. 특히 그림 3에서 보는 바와 같이, 4 kA ~ 10 kA의 고장전류에 대해 한류과형이 동일함으로부터 초전도 한류기가 고장전류크기에 무관함을 증명할 수 있었음이 자랑이다.

5. 전망 및 요약

초전도 한류기는 다른 초전도 전력기기에 비해 값이 저렴하고, 구조가 간단하며, 더욱이 현재의 계통에 스스로 적응하여 투입되는 등 특징으로 조기 활용될 것으로 보인다. 그러나 초전도 전체가 그렇듯 초전도 기기의 장점을 살려야 하는 바, 여기에도 여러 가지 활용현장과의 조화를 고려해야 한다. 가장 중요한 것은 한류기의 경제성 및 장기운용에 대한 신뢰성인 바, 이는 초전도 전력기기 전체에 공통적 문제이다. 더하여 한류기 특유의 문제로서 보호협조에 있어 조화를 들 수 있다. 여기서는 신뢰성을 접어두고 경제성과 보호협조 문제, 특히 초전도 한류기의 회복 문제를 중심으로 간단히 언급할 것이다.

저항스위치 방식 한류기의 경제성은 주로 한류소자용 도체가격에 의존한다. 현재 YBCO박막, BSCCO tube 및 plate 등이 가능한 도체이고, 추후 CC가 주요 도체로 등장할 전망이다. 그런데, YBCO 박막은 공정 및 기관의 제한 등으로 경제성에 회의적이고, CC는 현재 존재하지 않으니 분석하기 어렵다. BSCCO 벌크(tube 및 plate)는 현재 한류소자로 활용되고 있어 분석이 상당히 가능하다. Nexans 등이 제시하고 있는 BSCCO tube를 사용한 방식에 의하면, 추후 기술개발을 가정한 “낙관적 전망”이란 전제하에 170 kV/5 kA급 3상 한류기의 소자 원가를 7 ~ 8억원 정도로 할 수 있다고 보인다. 현실적으로 동급 한류기 가격을 10억원 이하로 하는 구도에서는 여전히 높지만, 그래도 상당히 근접했다고 보인다. 더욱 도체의 성능을 향상시키고 제조 공정단가를 낮추어야 한

다.

한편, 한류기 관련 보호협조 관련 부분은 대단히 복잡하면서도 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 분야이다. 계통의 고장전류를 제어하는 기기가 한류기만이 아니므로 다른 차단기 등과 유기적 협조체계 속에서 운용되어야 한다. 그 중 가장 우선적으로 해결해야 하는 것이 초전도 한류기의 회복 문제이다. 초전도 한류기는 과전류시 자동적으로 저항이 발생하는 수동소자로서 인위적으로 ON-OFF를 조절하지 않는다. 그러나 전력계통은 고장시 1차 차단 후 일정시간이 경과하면 재투입하는 구도로 운영되고 있다. 송전 및 배전성에 따라 재투입 회수 및 시간이 다르지만 운영 구도는 유사하다. 그런데 재투입 시간이 1초 미만인 반면, 지금까지의 개발 및 전망에 의하면 초전도 한류기의 회복 시간은 선로가 개방된 후 짧게는 2초(YBCO 박막의 경우)에서 길게는 30초(BSCCO plate의 경우)로 어느 것도 재투입 시간에 맞추지 못한다. 한류기를 재투입 없는 장소에서 활용할 수는 있으나, 그 경우 한류기의 활용영역은 크게 줄어들 것이다. 현재로서는 병렬 연결된 2대의 한류기를 개폐기와 조합하여 사용하되, 과전류에 의해 1대가 동작하면 그 한류기를 선로로부터 분리하고, 재투입 이전에 다른 1대를 선로에 접속하는 구도가 가능하나, 이는 2대의 한류기라는 가격 문제를 극복해야 한다.

초전도 한류기의 가격이 적정 수준 이하로 낮추어질 때, 그리고 여타 기기와 협조하여 활용될 수 있을 때 한류기의 활용은 시작될 것이다. 현재 차단기 가격과 한류기가 복수의 차단기에 고장용량을 낮출 수 있음을 고려하면 154 kV 계통의 한류기 1대당 가격을 초기는 10억원 이하로 하는 것이 바람직하다고 사료된다. 그러면서도 장기신뢰성 확보 및 보호협조 분야의 조화를 보장할 수 있어야 한다. 현재 전 세계적으로 기술개발이 진행되고 있거니와, IGC 등에서 송전급(138 kV급) 한류기 개발이 시작된 것처럼, 멀지 않은 미래에 한류기가 설치된 변전소를 볼 수 있을 것이다.

저자이력



현옥배(玄鉦培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대학교 물리학과 졸업, 1987년 Iowa 주립대 대학원 졸업(Ph. D), Ames 연구소, NIST, ISTEK 연구원을 거쳐 현재 한전 전력연구원 책임연구원