

## 하이브리드 초전도 한류기 개발과 활용 전망

현 옥 배  
한전 전력연구원

### 1. 머리말

국내 전력계통은 송전선로가 짧고 망상(network)으로 구성되어 있는 병렬 구조에 더하여 경제 발전에 따르는 전력수요 급증으로 설비증설이 진행되어 고장발생시 고장전류의 크기가 지속적으로 증대되어왔다. 이러한 고장전류를 처리하기 위해 차단기, 리액터 등이 설치되어 있거니와, 지속적인 고장전류 증대로 인해 적지않은 변전소에서 차단기 용량을 초과하게 되었다. 이렇게 고장전류 증대로 인해 특히 송전선로 계통이 많은 변화를 겪고 있는 바, 차단기가 대용량 기기로 교체되고, network를 포기하고 모선이 분리가 되어 공급신뢰도 저하를 감수하면서 방사상 운전을 하고 있다. 345 kV 계통의 경우 또한 같은 문제로 차단기 교체, 모선분리 및 리액터 도입이 시행되고 있다.

초전도 한류기는 이러한 고장전류 증대 문제에 대해 근본적인 해법을 제시한다. 초전도 한류기는 형식에 따라 약간의 차이가 있으나, 근본적으로는 고장 발생시 일정 임피던스를 초고속으로 선로에 투입하여 고장전류를 제한하는 수동소자이다. 이러한 임피던스 투입은 고장발생 후 1 ~ 2 밀리초 이내에 이루어지므로 고장 후 50 밀리초 이상이 걸리는 차단기 동작 이전에 과전류에 의한 변압기 등의 기계적 및 전기적 손상을 원천적으로 방지한다. 일정 임피던스 투입 방식이므로 해당 선로의 잠재적 고장 크기에 무관하여 추후 고장전류 증대시에도 한류기를 교체할 필요가 없으며, 고전압은 물론 대전류 전력선 모두에 적용이 가능한 기기이다.

초전도 한류기는 세계적으로 초전도 전력기기 중 가장 많이 연구되고 있으며, 또한 가장 조기에 활용될 것으로 기대되고 있다. 현재 선진국에서는 배전전압까지 개발하고 실증시험을 마치고 송전급을 개발하고 있는 단계이다. 특히 독일의 CURL10 project는

가장 성공적으로 평가되고 있는데 10 kV급 저항형 한류기를 개발하고 2004년부터 실선로에서 1년간 성공적으로 시험을 마쳤다. 중국 또한 10.5 kV급을 실선로에서 시험 중이다. 여기서 최근의 송전급 개발 추이에 주목할 필요가 있다. 유럽의 EC는 3상 110 kV급 개발을 지원하는 INES110 project를 진행 중이다. 또한 미국 DOE는 송전급 초전도 한류기 개발 및 활용을 위해 3개의 project에 지원한다고 발표하였는 바, 115 kV 혹은 138 kV급 개발이며, 완료 후 남가주전력 등의 계통에 시범적용한다는 내용을 담고 있다. 비록 정부지원을 바탕으로 하고 있기는 하나, 이상 과제 모두 기업주도로 대규모 민간 투자를 필요로 하는 바, 이는 초전도 한류기의 기술적 가능성 검증은 지나 실제 활용을 위한 투자에 나서고 있음을 보여주고 있다.

본 논문은 국내의 21C프론티어사업(차세대초전도응용기술개발사업)의 일환으로 22.9 kV급 초전도 한류기 개발에 관한 것이다. 한전 전력연구원과 LS산전(주)는 공동으로 동사업의 지원하에 6.6 kV급을 성공적으로 개발한 바 있거니와, 이어서 상기 2단계 사업으로 정격 22.9 kV/630 A (25 MVA)급을 개발에 성공하였으며, 이는 현재 완성된 기기 중 최대 용량이다. 이 개발에서 하이브리드 방식이라는 독창적인 디자인을 통해 초전도체의 사용을 극소화하는 경제성과 계통상에서 재폐로 기능을 선진국에 앞서 개발하였다.

### 2. 초전도 한류기 활용시 요구와 디자인의 진화

전력기기 중 변압기 혹은 케이블이 거의 같은 형태이나 차단기는 다양한 형태로 개발되어왔다. 두 접점을 분리하는 기술이라는 점에서는 같으나, 기계식 분리, 자기장 방식, 전력전자 사용 등에 따라 이를 구성하는

방식에 다양성이 있는 것이다. 이와 유사하게 초전도 한류기도 고장전류의 초고속 제한이라는 목적을 이루기 위해 다양한 방식이 제안되었고, 그에 따라 기술과 기기의 디자인이 변화를 거듭하였다. 초기에는 초전도 벌크 튜브를 사용한 자기차폐형이 성공하였고, 이어 전력전자와 초전도 코일을 결합한 정류형 방식이 부각되었다. 이들을 대체하여 현재 가장 많이 개발되고 있는 방식이 저항형이다. 이 방식에서는 초전도체의 퀀치를 이용하되, 초전도 한류소자만으로 한류작용을 모두 담당하게 한다.

이러한 초전도 한류기 디자인의 진화는 활용시의 요구가 무엇이며, 그 요구에 얼마나 잘 부응했는가 등에 기인한다. 활용시의 요구를 보면, 초전도 한류기는 상시 손실이 없고, 송전급으로의 개발로 확장될 수 있어야 하며, 크기가 커서도 안되고, 냉동기 열부하를 최소화해야 하고, 반복 고장에 대한 대처하면서도 경제성과 신뢰성을 확보되어야 하는 등이다.

자기차폐형은 크기가 너무 크고, 송전급으로의 확대에 곤란하며, 정류형은 성능은 좋으나 크기 및 상시손실 문제와 전력전자 등의 문제를 해소하지 못하였다. 이에 대안으로 저항형이 제시되었거니와, 그렇다고 저항형이 이상적인 것도 아니다. 손실 최소 및 송전급으로의 확대, 크기 축소 등은 좋으나 초전도체의 퀀치로 인해 근본적으로 재폐로 기능은 불가하다. 또한 퀀치시 냉동기에서의 열부하 문제와 도체의 가격 인하를 추가로 해결해야 한다.

비록 저항형이 현재 세계적 추세라 할지라도, 미국 DOE 지원의 하나인 SC Power 사의 project는 포화리액터형 초전도 한류기 방식을 채택하고 있음에 주목해야 한다. 이 포화리액터형은 역사가 오랜 방식으로, 직류 전류를 써서 변압기의 철심을 포화시키고, 고장전류가 생겼을 때 반대 방향의 전류로 인해 포화가 풀리게하여 코일에 큰 임피던스를 발생시켜 한류한다. 이 방식에서는 초전도체가 퀀치되지 않으므로 냉동기 열부하가 작고, 특히 재폐로 문제에서 자유롭다. 대신 상당 2개의 철심을 사용하기 때문에 크기가 크고, 그리고 상시 일정 손실을 감수해야 할 것이다.

어느 경우든 해당 소요처의 활용 요구에 맞추어 개발되어야 한다. 예로서, 활용처 요구가 재폐로에 있다면 다른 부작용을 감수하고 정류형 혹은 포화리액터 방식을 채택해야 할 것이다.

그러면 국내의 경우는 어떠한가. 미국 등과는 달리 국내의 변전소 공간은 지극히 제한되어 있다. 즉, 한류기의 크기는 중요한 문제가 된다. 또한 재폐로를 채택하고 있어 이 부분에 대한 답을 제시해야 한다. 손실을 줄이고 열부하를 최소화하며, 경제성 또한 맞추어야 한다. 이 부분은 초전도 한류기 개발 초기부터 고민해온 이슈이다.

수요자의 모든 요구를 일거에 만족시키는 디자인은 아직 없다. 그러나 필요조건을 최대한으로 만족시키는 디자인을 개발하도록 해야 한다. 이를 위해 본 사업은 선로변경식 하이브리드 초전도 한류기 (Superconductor Triggered Fault Current Limiter, STFCL)의 디자인을 제시하였다.

### 3. 선로변경식 하이브리드 초전도 한류기

■ (선로변경식) 하이브리드 초전도 한류기 (Line Commutation Type Superconductor Triggered Fault Current Limiter, STFCL)의 개념 창안

일반적인 저항형 초전도 한류기는 초전도체로 하여금 고장 검출 및 한류작용 전체를 담당케 하는, 즉 더 기술적으로는, 한류작용시 초전도체가 전류 및 전압 스트레스를 전부 감당하는 구도로서 대량의 초전도체를 필요로 한다. 이 초전도체가 퀀치되면서 대량의 열을 냉각장치 속에서 발생시키므로 대형 냉각설비는 필수적이다. 그러므로 도체 및 냉각 경비가 매우 높아 조기 상용화를 더디게 하고 있다.

선로변경식 하이브리드 방식은 상기 전압 및 전류 스트레스를 분산시키는 것으로, 2개의 회로를 병렬로 두고, 주회로에는 초전도체를, 보조회로에는 기존 기술에 속하는 차단 소자 및 리액터를 넣고 초고속 선로변경 스위치로 두 회로를 선로변경 (commutation) 하는 것이다 (그림1 참조). 여기서 초전도체는 전류 스트레스를, 기존 차단 스위치 및 리액터는 전압 스트레스를 담당하게 된다.

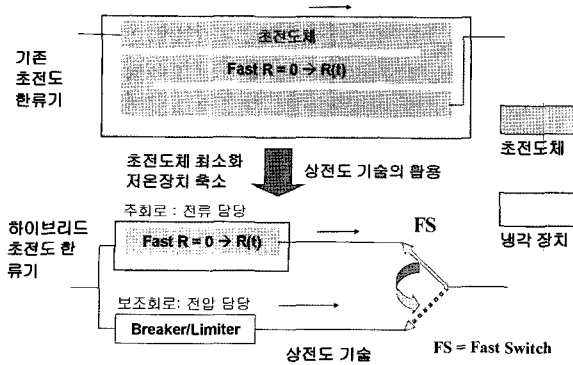


그림 1. 하이브리드 초전도 한류기의 개념도

그림으로써 초전도체의 양을 파격적으로 줄이고, 그에 따르는 냉각설비 또한 소형화시켜 경제성을 확보하게 되었다.

이상과 같이 초전도체는 고장을 감지하고 초기 한류만 담당하면서 선로변경을 유도한다. 이런 이유로 선로변경식이며, 또한 영문 이름으로 Superconductor Triggered Fault Current Limiter라는 전혀 새로운 이름을 갖게 되었다.

■ 하이브리드 초전도 한류기 (STFCL) 구성 및 동작

STFCL의 구성을 보면, 초전도체와 기존 차단 스위치가 초고속 스위치로 묶여있는 형태이다. 여기서 가장 핵심적인 부품이 바로 선로변경용 초고속 스위치(Fast Switch, FS)이다. FS는 열림용 진공차단기 (Vacuum Interrupter, VI), 전자반발판과 구동코일이 서로 기계적으로 연결된 채 조립된 구조이다. 초전도체로는 가장 빠른 스위칭을 보이는 YBCO 박막 소자를 사용한다.

고장전류가 생기면, YBCO 박막 소자가 quench되어 저항체로 변하고, 전류는 병렬가지인 보조회로로 흐르는데, 보조회로상의 구동코일에 자기장을 발생시켜 반발판 동작을 통해 VI를 열게 된다. 그러면 YBCO는 완전히 고립된다. 이후는 전력용 퓨즈와 리액터가 순차적으로 동작하여 전류를 제한한다. 전력퓨즈가 동작할 때까지 한류기 양단에는 거의 전압이 걸리지 않으므로 각 소자의 사양을 결정하기 대단히 쉽다. 이러한 일련의 동작 중에서 가장 주의해야 할 점이 VI에서의 확실한 아크 소호이다. VI의 아크가 작은

확률로 완전히 제거되지 않을 수 있음이 문제이다. 이에 대해 낮은 전압의 전력전자 스위치를 YBCO와 VI 사이에 삽입하여 문제를 확실히 해소하였다.

■ 초전도체 극소화

여기서 초전도체의 극소화를 보면, 실제 사용된 초전도체는 60 V급 한류소자 2개 (정격전류 630 A)이다. (단, 재폐로를 가능케 하려면 에너지 밀도가 작아져야 하므로 5개의 소자가 필요하다.)

그러므로 3상 구성에 6개 (재폐로시 30개) 소자가 필요하다. 그러나 순전히 저항형 초전도 한류기를 제작할 경우는 (재폐로 없이도) 상당 14 kV를 감당하기 위해 240 소자, 3상에 720 소자를 소요하게 된다. 순수한 저항형 보다 초전도체 양이 약 1/120로 감소하였다. 이것이 초전도체의 극소화 내용이다. 한편, 재폐로 성능은 초전도체가 초기 아주 짧은 시간만 한류하므로 에너지 입력이 극히 제한되기 때문에 가능하였다. 초전도 소자는 비록 켄치되지만, 직후 에너지 입력이 끝나므로 온도상승이 적어 회복시간을 0.4초 이내로 할 수 있음이 확인되었다.

■ 시작품 제작 및 단락시험

상기 구조의 STFCL을 설계하고 시작품을 제작 및 시험하였다. 우선 3개의 모듈, 초전도 소자 및 냉각 부분, FS 및 전력용 퓨즈 부분, 그리고 리액터 부분으로 제작하여 시험하였다. 사양은, 정격전압/전류가 22.9 kV/630 A용 3상 구조로서 용량이 25 MVA인 현재 제작된 것 중 세계 최대 규모이다.

이렇게 제작된 한류기를 공인 시험기관인 LS산전의 PT&T에서 시험하였다. 최대 고장 전류 25 kVrms를 포함하여 각종 고장전류 크기 및 각도에 대해 시험하였다. 시험 도중 다양한 고장 및 사고를 경험하기도 하였으나, 마침내 안정적으로 동작하는 한류기의 구조 및 시스템 제작 노하우를 개발할 수 있었다. 그림 2는 모듈 조립되어 시험을 기다리는 초전도 한류기이고, 실제 제작시는 모든 모듈이 한 개의 상자 속에 수납된다 (그림 4). 그림 3은 3상 단락시험 결과이다.

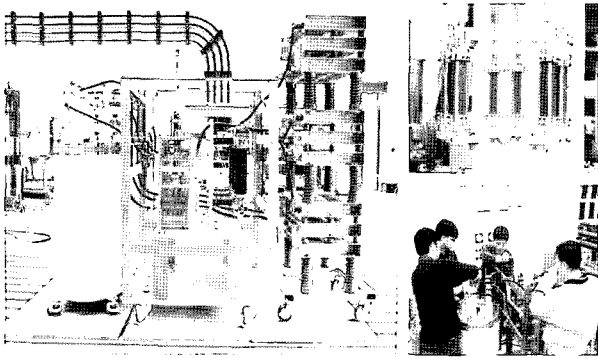


그림 2. 초전도 한류기 모듈 조립

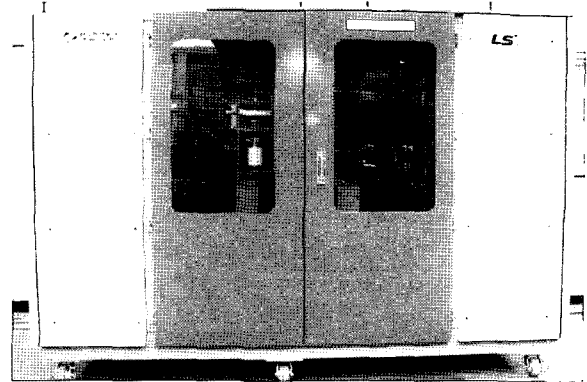


그림 4. 조립 완성된 초전도 한류기

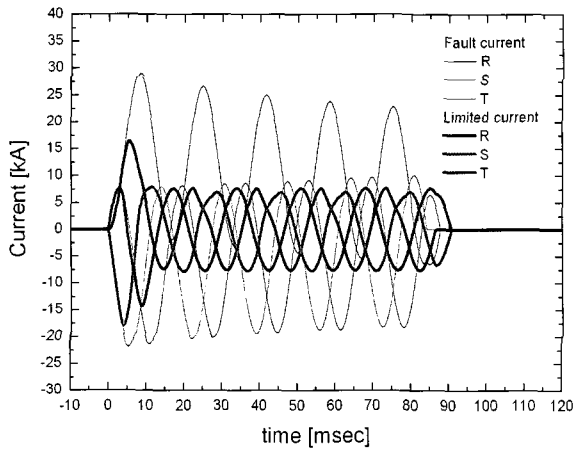


그림 3. 3상 단락시험 결과 (연한색이 고장전류, 진한 색이 한류된 전류)

하이브리드 방식의 다양한 변화 및 의미  
 하이브리드 초전도 한류기를 창안함으로써 선진국 초전도 한류기에는 없는 다양한 성능의 기기가 가능해졌다. 우선, (1) 상기 한류기는 '반주기내 한류형'으로, 고장 후 첫 1/2 주기 이내에 한류가 완성되며, 모든 초전도 한류기의 공통적 성능이다. (2) 다음 '반주기 후 한류형'이 가능하다. 이는 고장 후 첫 1/2 주기 파형을 한류하지 않고 통과시킨 후 둘째 1/2주기부터 한류를 시작한다. 일견 불합리합직한 이 방식은, 그러나 현장에서는 보호협조를 용이하게 하기 때문에 크게 선호되는 방식이다. (3) 동 구조에서 리액터를 제거하면 대용량 퓨즈로 되는데, 이는 다국적 전력기기 회사인 스위스 ABB가 시판중인 Is limiter의 성능에 필적한다. 또한, (4) 리액터 없이 선로를 약간 바꾸면 초고속 차단 스위치가 만들어진다.

경제성 확보와 재폐로 실현

STFCL이 기존 초전도 한류기에 비해 차별적인 중요한 의미를 갖는 것이 있다. 우선 지적되는 것이 초전도체 축소에 따라 시스템 가격이 1/2 이하로 낮아지는 "경제성 확보"이다. 또한, 동 디자인으로 인해 국내 계통이 채택하고 있는 "재폐로를 실현"시킨다는 데 중요성이 있다. 재폐로는 국내 계통에서의 활용 조건으로 기존 순수 저항형 한류기로는 불가능하다. 두 경우 모두 선진국의 초전도 한류기 어느 것도 동시에 달성하지 못하는 성능이다. 이들 성능으로 인해 송전급은 물론이고 배전급에서도 일반목적으로 그리고 조기 활용이 전망된다.

4. 실증시험 및 활용 계획

본 연구는 송전급 초전도 한류기 개발의 과정에서 얻어진 성과이다. 개발된 한류기는 초기 시작품일 뿐이며 현장에 설치하고 활용하기까지는 많은 연구개발이 추가되어야 한다. 여타 기기들이 기기 개발 후 십수년의 보완 및 검증을 거쳐 유용한 기기로 사용되고 있는 것과 유사하다.

활용에 앞서, 가장 우선하여 수행되어야 할 과제가 한전의 고창 시험선로에 초전도 한류기를 설치하고 실증시험하는 것이다. 실증시험을 통해 장기신뢰성 검증 및 보호협조 시험을 거치도록 현재 과제가 추진 중이다.

하이브리드 초전도 한류기 (STFCL)의 성공은 수요자의 관심을 끌었고, 바로 활용 요구가 발생하였다. 국내 154 kV 변압기 용량 격상(60 MVA → 100 MVA)되는데, 이로 인한 배전선

의 고장전류 문제 해소책으로 활용하고자 하는 요청이다. 이를 위해 실증시험을 거친 다음, 전류 용량을 높인 22.9 kV와 3 kA의 정격을 갖는 초전도 한류기를 개발하여 상기 요구에 대응하고자 한다. 실제로 한국전력 및 유관기관 사이에 상기 22.9 kV/3 kA 초전도 한류기 활용을 위한 Task Force Team이 이미 조직되어 활동을 시작하였다.

이는 전적으로 본 과제의 성공에 바탕을 둔 것으로, 비로소 장기에 걸친 초전도 전력기술이 현장에서 활용을 선도하도록 추진되는 것이다. 이어서 고장전류 문제가 심각한 송전선로에 사용되는 초전도 한류기 개발에 본 기술을 활용할 계획이다. 그럼으로써 국내 전력계통의 저고장전류 시대를 개척하고, 송전유연성 및 공급 신뢰도를 높일 것이다.

### 4. 맺 음

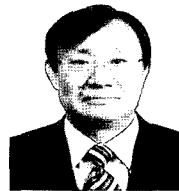
본 과제는 송전급 초전도 한류기 개발로 가는 중간 단계로서 배전선 전압인 22.9 kV 급 기기를 개발, 제작하고 시험하는 것이다. 전력연구원 - LS산전(주)의 공동 개발이며 2004년 시작하여 2007년 3월 성공적으로 완료되었다. 이 개발 과정에서 초전도체 사용을 극소화할 수 있는 하이브리드 방식을 창안하였고, 시작품을 제작하여 시험하였다. 해당 원천기술을 모두 국내에서 생산 및 소유하고 있으므로 독자적인 한류기 기술임을 증명하였고, 선진국에 앞서 경제성을 확보함으로써 조기 실용화의 길을 열었다.

초전도 한류기는 그에 필요한 다량의 초전도체와 가격 문제, 더하여 냉각설비의 가격 및 운용경비 문제 등으로 배전선로급에서는 경제성이 취약하여 특수목적 이외에는 활용이 곤란하였다. 그러나 상기한 바와 같이 하이브리드 방식을 채택함으로써 시스템 가격이 크게 줄어 일반화된 활용을 가능케 하였다. 더욱이 재폐로가 가능해짐으로 인하여 일반 배전선까지 활용을 기대하고 있다. 또한 반주기후 한류 방식은 현장 친화적이고, 초고속 차단스위치는 다른 응용의 길을 열어 줄 것이다.

### 참고문헌

- [1] Nexans-RWE Press release, (16 April 2007, Huerth, Germany).
- [2] US DOE announcement, (27 June 2007, Washington DC, USA).

### 저자 이력



#### 현옥배(玄錫培)

1976년 연세대학교 물리학과 졸업, 1987년 아이오와 주립대에서 Ph. D., Ames Lab.에서 박사후 연구원, NIST 및 일본 ISTE에서 연구원을 거쳐 현재 한전 전력연구원 수석연구원으로 재직 중.