

## LS 산전 한류기 사업 현황

심 정 욱  
LS산전 전력연구소 송변전연구단

### 1. 서 론

최근 국내외 전력계통은 대용량 전력설비 증가와 IT산업의 확대 등으로 전력수요가 증가되고 있는 추세이며 보다 고품질의 전력공급이 요구되고 있다. 이에 따라 전력 공급의 안정성 및 고품질화를 위해 계통 운영의 변화가 필요하게 되었다. 또한 21세기 들어서 화석, 원자력 연료 기반으로 운영되던 기존 전력계통에서 태양광, 풍력 등과 같은 신재생, 분산전원과의 연계가 점차적으로 늘어나고 있으며, 계통의 친환경, 경제적 운용 요구에 따라 계통 간의 연계에 대한 필요성도 증대되고 있다. 하지만 이러한 이유로 계통 연계를 할 경우 전력공급이 유연해지지만, 이에 따른 용량 증가로 인하여 고장이 발생할 경우 단락전류가 증가되는 문제가 발생된다. 기존의 해결 방법으로는 변압기 %Z 증대, 한류리액터 채용 및 계통 분리 등의 방법이 있지만, 이로 인하여 무효전력 손실 증가, 안정도 저해 및 계통 연계에 대한 이점이 상실되는 단점들이 있어 새로운 해결방법을 필요로 한다.

이러한 문제를 극복하기 위한 방안으로 고장 전류를 제한하는 한류기(Fault Current Limiter)를 적용하는 방법이 있는데, 국내외 연구기관 및 전력기기 제조사 주관으로 다양한 형태의 한류기 개발 및 계통 적용 연구가 활발히 진행되고 있으며 이에 따른 사업화가 지속적으로 추진되고 있다[1]-[3].

LS산전은 2000년 시작된 21C 프론티어 초전도응용기술개발 사업의 초전도한류기 개발과제를 시작으로 한류기 개발을 시작하였으며 개발 성과를 바탕으로 한류기 사업화를 진행 중에 있다. 본 논문에서는 한류기의 간단한 이해부터 시작하여 그동안 진행해온 LS산전의 한류기 개발 및 사업화 진행 현황에 대하여 기술하도록 하겠다.

### 2. 한류기의 정의

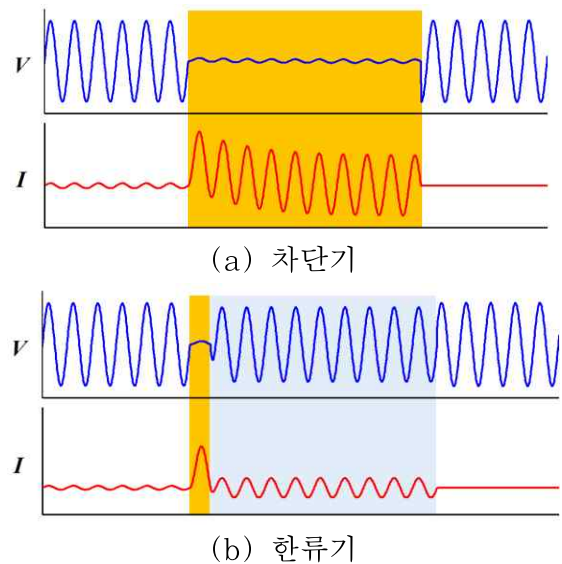


그림 1. 차단기 및 한류기 전압, 전류 비교.

한류기는 전력계통에 큰 고장전류가 발생할 경우 고속으로 임피던스를 투입하여 고장전류를 적정한 값 이하로 한류시킴으로 전력기기의 기계적, 열적 스트레스 예방 및 계통 신뢰도를 향상 시켜주는 장치이다. 이런 고장 발생에 따른 한류기 동작으로 계통에서 얻는 효과로는

- 1) 고장 전류로 인한 전력기기의 기계적, 열적 스트레스 경감
- 2) 고장 발생시 한류 임피던스 고속 투입에 따른 인접선로 저전압 파급 방지
- 3) 보호협조 개선

등이 있다. 그림 1에서 나타나는 바와 같이 차단기는 고장전류 발생 후 감지 및 차단기 개방까지 85~120ms가 소요된다. 따라서 고장전류가 차단되기 전까지 수 cycle 동안 해당 계통의 기기들은 고장전류에 의한 열적, 기계적 충격을 받게 되며, 그 동안 단락에 의하여 고장 선로에 저전압이 발생되어 인접 건

전 선로에 파급될 수 있다. 이에 반하여 한류기는 고장발생 직후 고속(<math><16\text{ms}</math>)으로 임피던스를 투입함으로써 고장전류를 신속히 저감하여 계통 설비의 기계적, 열적 스트레스를 경감할 수 있으며, 한류기 동작으로 발생된 임피던스로 고장선로의 전압이 유지됨으로 저전압을 방지하여 인접선로의 전동기 부하 등을 보호할 수 있다. 또한 지중선로와 같이 선로의 길이가 짧고 고장점에 따른 고장전류의 차이가 거의 적은 계통의 보호협조 개선에도 활용 할 수 있다.

### 3. 초전도 한류기

2000년부터 LS산전은 한전전력연구원(KEPRI)과 공동으로 6.6kV 및 22.9kV 배전급 초전도 한류기 개발을 목표로 연구 개발을 추진해왔다. 이에 따른 가장 큰 성과로는 첫째로 6.6kV YBCO 박막형 전초전도 한류기 개발이 있으며, 둘째로 22.9kV 복합형 초전도 한류기 개발을 들 수 있다. 당시 초전도 한류기 개발에 있어서 가장 큰 어려움은 초전도 소재 선택에 있었으며, 개발 초기 당시에 한류기에 적용할 수 있는 초전도 소자로는 YBCO 박막과 BSCCO 선재가 있다. YBCO의 경우 켄치시 발생 임피던스가 크고 통전전류를 조절할 수 있는 장점이 있는 반면에 선재의 취급이 어렵고 가격이 고가인 단점이 있었다. 이에 반하여 BSCCO의 경우 상대적으로 가격이 저렴하고 선재 형태로 모듈제작이 비교적 용이하나, 켄치시 발생 저항이 적고 선재의 불균일성 문제가 있다. 이에 따라 개발 초기에는 YBCO 박막을 채용하여 진행하였고, 이후 보다 안정적인 2세대 선재인 Coated Conductor(CC)를 채용하여 개발을 추진하였다. 그림 2는 6.6kV/200A급 YBCO 저항형 초전도 한류기이다.

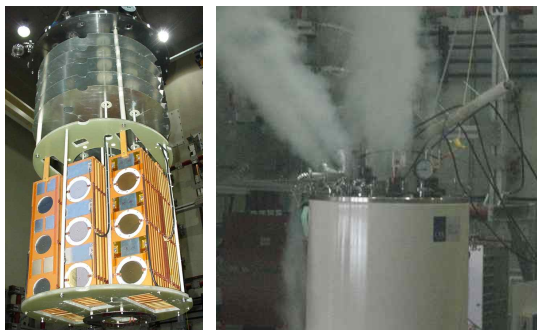


그림 2. 6.6kV/200A 저항형 초전도한류기.

전초전도 한류기의 경우 고장전류 유입시 초전도체의 임계전류 초과에 따른 켄치속도가 매우 빠르기 때문에 고속 임피던스 투입이 가능하다. 하지만 전압 및 전류 용량이 증가 될수록 초전도체의 사용량이 기하 급수적으로 증가되며 이에 따른 냉각비용도 함께 증가가 되어 경제성 문제로 인하여 사업화의 어려움이 있었다. 이러한 문제를 개선하기 초전도체의 고속켄치 성능을 활용하되 초전도체가 감당해야할 에너지를 저항 또는 리액터로 우회하는 방법을 구상하게 되었고 수많은 시행착오를 거친 후 고속스위치를 개발하여 복합형 초전도 한류기를 개발하기에 이르렀다. 그림 3은 복합형 초전도 한류기의 개념도로서 소량의 초전도체와 고속구동이 가능한 고속스위치를 직렬로 결선함으로써 주회로를 구성하고, 이와 병렬로 CLR(Current Limiting Resistor)를 결선한 구조이다. 동작 원리는 고장발생시 초전도체가 켄치됨으로 초기 고장전류를 고속스위치 구동코일로 우회시킴으로 고속스위치를 개방시키고 이때 주회로의 고장전류는 CLR측으로 전류(轉流)됨으로 주회로의 초전도체를 보호함과 동시에 고장전류는 CLR에 의해 한류가 되는 구조이다. 이에 따라 초전도체의 사용량은 기존의 1/100이하 수준까지 감소하게 됨으로 고가의 초전도체 비용을 줄일수 있게 되었으며, 냉각용량도 대폭 감소할 수 있어 기존 저항형 초전도 한류기에 비해 경제적 우수성을 확보할 수 있었다. 또한 저항형 초전도 한류기의 경우 한류에 따른 발생에너지를 초전도체가 감당하게 되어 초전도체 발열에 따른 부담이 있었지만, 복합형 초전도 한류기의 경우 초전도체는 초기 켄치 후 한류에 따른 에너지 부담을 CLR이 감당하게 됨으로 보다 안정적인 운전이 가능하게 되었다.

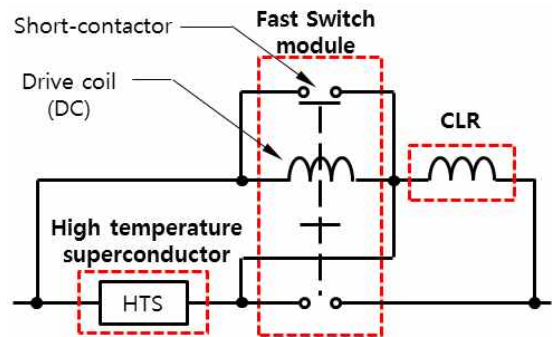


그림 3. 복합형 초전도 한류기 개념도.



그림 4. 한전 고창 실증시험용 복합형 초전도 한류기(22.9kV/630A).

이러한 성과를 바탕으로 22.9kV 630A 복합형 초전도 한류기 및 22.9kV 3,000A 대용량 복합형 초전도 한류기 개발 성과를 이루었으며, 2008년부터 2010년까지 한전 고창 실증시험센터 초전도 전력기기 시험동 내에 22.9kV 630A급 복합형 초전도한류기를 설치 및 한류기 장기 시험 운전을 수행하였으며, 시험 기간 중 수회에 걸쳐 단락 시험을 수행함으로써 한류기 성능 검증을 하였다. 그림 4는 고창실증시험센터에 설치되었던 복합형 초전도 한류기이다.

이러한 결과를 바탕으로 2009년부터 한전 주관의 초전도전력기기 시범운용 사업 참여를 통하여 초전도 케이블과 더불어 경기도 이천변전소 초전도 전력기기 시험 사이트에 복합형 초전도 한류기를 설치하였고 실계통 운영을 시작하였다[4]. 이천변전소에 설치된 복합형 초전도 한류기는 보다 엄격한 규정을 적용하여 한전 측과 관련 시험 규격을 정의하였고, 실계통 부하변동에 따른 극저온 냉각운용 시스템 개발, 한전 절연규격, 12.5kA 단락전류에 대한 한류동작성능 등 실계통에 요구되는 성능을 확보하였다. 이를 토대로 2010년 12월 경기도 이천변전소 초전도 전력기기 시험 선로에 복합형 초전도 한류기를 설치하였고, 2011년 8월 실계통 운영을 개시하였다.

본 과제에서의 주요 성과로는 복합형 초전도



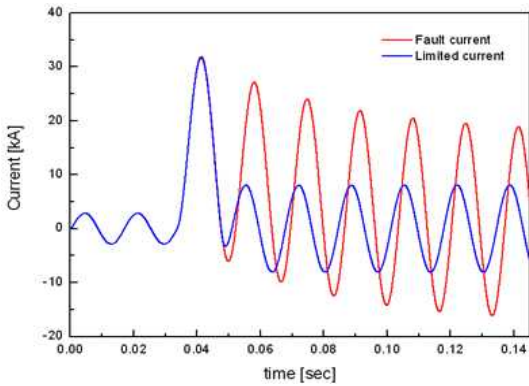
그림 5. 경기도 이천변전소 복합형 초전도 한류기 실계통 운용.

한류기 시범 선로에 실제 사고가 2회 발생하였는데 한류기가 모든 사고에 대해 정상동작하여 세계 최초의 실계통 한류기 동작이 수행된 점에 있다. 그림 5는 경기도 이천변전소 초전도 전력기기 시험동 및 설치된 복합형 초전도 한류기이다. 본 실계통 운전은 2013년까지 운용하였으며, 2014년 후속과제를 진행할 예정이다.

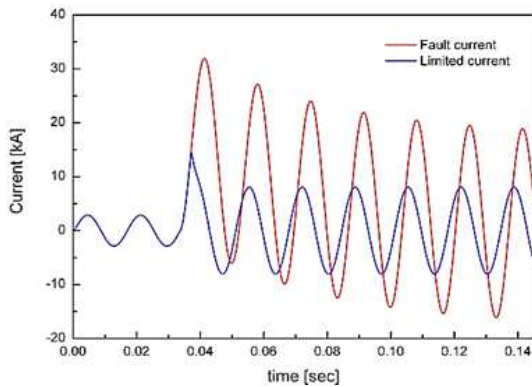
#### 4. 한류기 사업화

21C 프론티어사업 이후 LS산전은 본격적인 한류기 사업화를 고민하였으며 당시 시장 상황을 고려해볼 때 송전급 보다는 배전급에서의 시장 가능성을 예측하였다. 하지만 배전 선로에 적용되는 전력기기는 기기의 신뢰성 뿐만 아니라 기기의 가격이 가장 큰 요인 중 하나이다. 기존 저항형 초전도 한류기의 경우 대용량화에 따른 초전도체 및 냉각시스템 증가에 따른 가격 문제가 있었다. 이를 보완하기 위해 초전도체 사용량을 대폭 줄인 복합형 초전도 한류기를 제안하였으나 이 역시 전체 한류기 원가의 70%가 초전도체와 냉각시스템이 차지하고 있다. 또한 냉각시스템의 유지보수기간이 매우 짧기 때문에 유지보수를 해야할 고객사 입장에서는 달가와 하지 않는 부분이 있다. 이로 인하여 기존 복합형 초전도 한류기 기술을 바탕으로 원가 절감을 위한 새로운 방안을 찾게 되었고, 그 결과 복합형 한류기의 초전도체 역할을 대신할 고속고장검출장치를 개발, 적용함으로써 한류기 원가를 대폭 절감할 수 있게 되었다. 현재 LS산전에서는 한류기를 2가지 종류로 구분하고 있다. 고장





(a) A-type 한류기



(b) B-type 한류기

그림 6. LS산전 한류기 파형 비교.

전류 반파 이후 한류가 가능한 A-type 한류기와 고장전류 반파 이내 한류가 가능한 B-type 한류기로 구분하였다. A-type 한류기의 경우 비록 고장전류 첫 주기는 한류하지 못하지만 반주기 이후의 고장전류는 한류가 가능한 한류기로서 구조가 간단하고 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 하지만 B-type 한류기의 경우 첫 반주기 이내 한류가 가능하지만 이를 구현하기 위한 부품 비용이 매우 크다. 그림 6은 A-type 한류기와 B-type 한류기의 한류파형을 비교한 그림이다.

현재 LS산전에서는 A-type 한류기에 대한 제품화가 진행되어 22kV 5,000A 40kA 대용량 한류기와 22.9kV 630A 12.5kA 한전 지중선로용 한류기의 상용화를 추진하고 있다. 현재 22kV 5,000A 40kA 한류기의 경우 광양 POSCO에 적용하여 고장전류에 의한 기기 보호 및 인접선로 저전압 방지를 목적으로 상용 운전 중에 있으며 이러한 실적을 바탕으로 추가 발주가 예상되고 있다. 22.9



(a) 24kV 5000A 40kA 대용량 한류기 (b) 22.9kV 630A 12.5kA 지중선로용 한류기

그림 7. LS산전 A-type 한류기.

kV 지중선로용 한류기의 경우 지중배전선로의 보호협조 개선을 목표로 개발이 진행되어 현재 한전 측과 시범운동을 준비 중에 있어 한전 및 민수 배전급 분야의 한류기 사업화가 이루어지고 있다.

#### 4. 맺음말

LS산전은 한류기 사업화 추진에 따라 지난 2013년 대형연구개발성과 기술이전 조인식을 통하여 국책과제 연구 결과에 대한 사업화 성과를 보여주었으며 연구개발성과지원센터 주관으로 정부 R&D연구성과 7대 대표과제에도 선정되었다.

현재 LS산전에서 배전분야의 한류기는 아쉽게도 비초전도형 한류기로 진행하고 있지만, 송전급 한류기의 경우 초전도체를 적용한 한류기가 가능하리라고 판단하고 있다. 특히 한류기 구성상 초전도체의 손실 크기는 전압보다는 통전전류의 영향이 크기 때문에 동일 전류조건인 경우 배전급에서 발생하는 손실과



그림 8. 21C 프론티어 사업 초전도 한류기 개발 기술이전 조인식.

큰 차이가 없으리라고 예상된다. 하지만 송전급의 경우 투자 비용이 매우 크고, 예상 개발기간이 길기 때문에 현실상 모다 확실한 시장이 필요한 상황이다. 그렇지만 전 세계적으로 고장전류 초과와 문제가 지속적으로 발생되고, 신재생 보급의 증대 및 친환경 정책의 강화가 예상되므로 조만간 송전급 한류기 시장이 개화될 것으로 예상된다.

### 참고문헌

[1] Ok-Bae. Hyun, Hye-Rim Kim, Jungwook Sim, Young-Ho Jung, Kwon -Bae Park, Jong-Sung Kang, B. W. Lee and Il-Sung Oh, "6.6 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Based on YBCO Films", IEEE Transactions on Applied Supercond., Vol. 15, No. 2, pp.2027-2030, 2005.

[2] J. Sim, K.B. Park, H.R. Kim, J.S. Kang, B.W. Lee, H.M. Kim, I.S. Oh and O.B. Hyun, "14 kV single-phase superconducting fault

current limiter based on YBCO films", Cryogenics 47, pp.183-188, 2007.

[3] S. Eckroad, "Superconducting Power Equipment", EPRI Technology Watch 2012, 1024190.

[4] W.J. Choe, J.W. Sim, G.H. Lee, S.H. Bang, June 2011 "The Test and Installation of Medium Class(22.9 kV) hybrid type fault current limiter in KEPCO grid", CIRED.

### 저자이력



#### 심정욱(沈政煜)

1996년 순천향대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 LS 산전 전력연구소 선임연구원.