

초전도 한류기 개발 및 적용 현황



양 성 은
한전 전력연구원 연구원

1 개황

국내 전력계통의 경우 전력수요가 수도권 지역과 부산을 중심으로 한 동남부 산업지역 등 2개 지역에 집중돼 있어 공급 신뢰도 및 안정도 향상을 위해 망상 구조(Network)로 운영되고 있다. 이에 따라 임피던스 저하로 인해 계통에 고장이 발생할 경우 고장전류가 큰 상태에 있다.

또한, 꾸준한 전력수요 증가에 따른 발전소 확충, 송전선로 건설 등의 지속적인 설비 증설과 스마트그리드 도입, 대용량 분산전원 접속 등의 이유로 고장시 고장 전류가 차단기의 차단내력을 초과하는 변전소 수가 증가할 것으로 예상된다.

위와 같은 문제를 해결하기 위한 가장 직관적인 방법으로 고장전류의 크기는 유지한 채 차단기를 용량이 큰 것으로 교체하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 고가의 차단기를 다수 설치하는데 발생하는 경제적인 비용이 큰 부담이 된다. 또 고장전류의 크기는 줄어들지 않기 때문에 계통에 있는 전력기기에 대한 영향은 줄어들지 않는 문제도 있다.

이에 전력계통 운영자는 고장전류를 규정된 값 이하로 제한하는 방향으로 계통을 재설계하고자 노력하고 있다. 우선적으로 고장전류가 큰 지역에서 연계 모선



을 개방해 고장전류를 저감시키는 방법을 사용하고 있지만, 이로 인해 계통 간 결합력 감소로 안정도가 손상되고, 계통 유연성 결여로 공급신뢰도가 저하되며, 전압제어가 원활하지 못함으로 인해 전력품질이 저하되고 있는 실정이다.

다른 방법으로 고 임피던스의 공심 한류리액터를 선로에 직렬 연결해 고장전류의 크기를 줄이는 방법도 채택돼 사용하고 있다. 공심 한류리액터를 선로 및 모선 사이에 설치해 운전 중인데 상시에 리액턴스 부하가 돼 무효전력손실 및 전압강하를 발생시킨다.

이와 같이 전력계통은 정상시에는 전력계통에 영향을 거의 미치지 않으면서, 고장시에 신속하게 고장전류를 저감해 주는 방안을 필요로 하고 있다. 초전도 한류기는 초전도성을 이용해 이 조건을 만족하는 새로운 개념의 기기로서 계통의 고장전류 문제를 해결해 줄 것으로 기대된다.

2 현황

가. 초전도 한류기 개요 및 종류

초전도 한류기는 초전도체의 초전도성을 이용해 계통에 임피던스를 투입함으로써 고장전류를 차단기가 차단가능한 용량으로 제한하는 기기이다. 초전도 한류기는 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

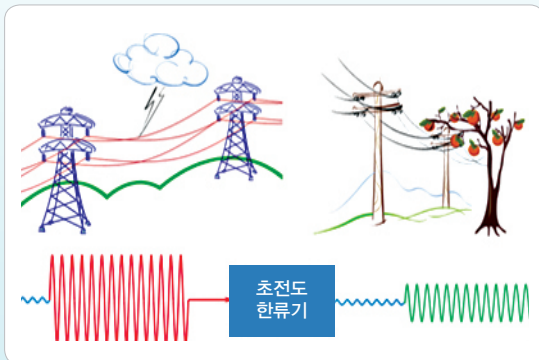


그림 1 초전도 한류기 개념도

- 정상운전시에는 임피던스가 없어 기존 선로에 영향을 미치지 않는다.
- 고장발생 1/4주기 이내에 전류제한을 개시할 수 있다. 선로전류가 임계전류 값만 넘으면 임피던스가 발생하므로 전류가 첫 피크치에 도달하기 전에 제한한다.
- 고장이 종료되면 자동적으로 임피던스가 감소하고 초전도성을 회복해 정상운전 상태로 복귀한다.
- 초전도체의 한류 특성은 잠재적 고장전류 크기와 무관하다. 선로전류가 일정한 값만 넘으면 임피던스가 발생하므로 한류특성이 고장전류의 크기에 영향을 거의 받지 않는다. 즉 초전도 한류기는 차단기와 달리 추후에 고장전류가 더 증대하였을 때에도 교체할 필요가 없다.

초전도 한류기에는 임피던스를 투입하는 원리에 따라 여러 종류가 있는데, 현재 개발되고 있는 수 kV급 이상의 초전도 한류기에는 저항형, 포화철심형, 자기차폐형 등이 있다.

저항형 한류기는 초전도체에 고장전류가 흐를 때 초전도성을 잃어 저항이 발생하는 성질을 이용해 고장전류를 억제한다. 초전도체를 일정한 온도(임계온도, 약 섭씨 -186도) 이하로 냉각하면 저항이 'Zero'가 돼 많은 전류가 흘러도 열이 발생하지 않는다.

그러나 전류가 과도하게 흘러 일정한 값(임계전류)을 넘으면 초전도성을 잃어 저항이 급속하게 발생하게 되는데(quench), 저항형 초전도 한류기는 바로 이 성질을 이용한 전력기기이다. 과도전류가 흐를 때 초전도체의 고유 성질에 의해 선로에 저항이 급격히 투입돼 전류를 제한하게 되는 것이다. 보통 초전도체만을 단독으로 사용하지는 않고 초전도체 보호 및 유연한 임피던스 투입을 위해 리액터와 스위치를 같이 사용하는 복합형 방식을 택한다.

포화철심형 초전도 한류기는 한 쌍의 철심 한쪽에

각각 AC 코일을 감아 선로에 연결하고 반대쪽을 DC 코일로 감아 DC 회로에 연결해 구성한다. DC 코일에 전류를 인가해 철심이 포화되도록 하면 상시에는 AC 코일이 공심 리액터와 거의 같이 동작해 임피던스가 작고, 고장전류가 흐를 때에는 철심의 포화가 풀려 AC 코일의 임피던스가 커져 전류를 제한하게 된다.

자기차폐형 초전도 한류기는 철심의 1차 측에 AC 코일을 감아 선로에 연결하고, 2차 측에 초전도 링 혹은 튜브를 설치하여 구성한다. 초전도체는 초전도 상태에 있을 때에는 자기장을 배척해 초전도체 내부의 자기장이 "Zero"가 되며(마이스너 효과), 초전도성을 잃고 상전도 상태가 되면 자기장을 배척하지 않는 특성을 가지고 있다.

상시에는 2차 측에 있는 초전도체에 흐르는 전류가 적어 초전도 상태를 유지하면서 철심의 자기장이 "Zero"가 되므로 1차 측 코일의 임피던스가 거의 없다. 고장전류가 흐르면 초전도체가 초전도성을 잃어 철심에 자기장이 생기므로 1차 측 코일에는 임피던스가 발생해 전류를 제한한다.

나. 초전도 한류기 개발 및 적용 현황

초전도 한류기의 필요성이 부각되면서 초전도 한류기에 대한 개발 및 실증이 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다.

1) 국내 동향

국내의 초전도 한류기 기술은 지난 십여 년간의 연구진의 노력에 힘입어 이제 세계적 수준에 도달해 있다. 국내에서 초전도 한류기 연구개발은 2001년 교육과학기술부의 21C 프런티어 사업에 의해 본격적으로 시작됐다.

한전 전력연구원은 LS산전과 공동으로 2007년에 22.9kV/630A급 초전도 한류기를 개발했다. 기본 구조는 복합형 방식으로 상시 운전시는 전류가 초전도체가 있는 주 회로를 통하나, 고장시에는 초전도체가 고장전류를 감지해 고속스위치를 동작시켜 고장전류를 상전도 한류소자(리액터 또는 저항)가 있는 보조회로로 우회하도록 함으로써 고장전류를 제한하는 구조이다. 초전도체의 사용량을 최소화 할 수 있어 경제성면에서 강점을 갖는다.

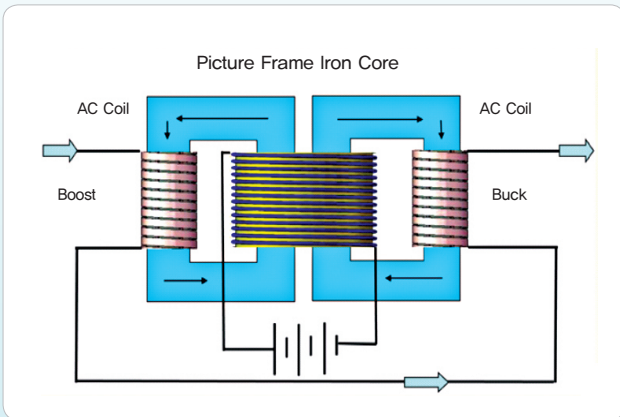


그림 2 포화철심형 한류기 구조

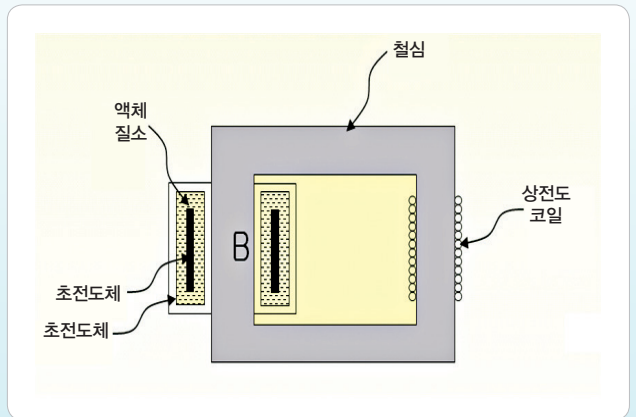


그림 3 자기차폐형 한류기 구조

표 1 초전도 한류기 연구 동향 요약

설치(예정) 장소	프로젝트	제작사	정격전압(kV)	정격전류(A)	비고
미국 남가주 전력 Devers 변전소	DOE	AMSC, Siemens	115	900	제작시험
중국 텐진 Shigezhuang 변전소	-	Innower	220	800	실계통 운전 중
미국 SCE Shandin 변전소 (LA 교외)	DOE	Zenergy Power	15	2,000	모선연계용 2009.5~운전 중
일본 동경가스	NEDO	Toshiba	6.6	600	IPP 보호용 2007년~운전 중
중국 운남성 Puji 변전소	정부	Innower	35	1,500	2008.2~운전 중
영국 Ainsworth Lane, Scottish Power	ASL	Nexans SC	12	400	모선연계용 2011년~운전 중
독일 Boxberg, 발전소 소내	ENSYSTROB	Nexans SC	12	530	발전소내 전력보호 2011.10~운전 중
이탈리아 밀라노 San Dionigi 변전소	RSE	RSE	9	220	Feeder 보호용 2012.3~운전 중
스페인 Endesa San Juan de Dios 변전소 및 슬로바키아VSE	ECCOFLOW	Nexans	24	1,000	변압기 2차 측 및 모선연계 2013년~운전 중
독일 Hercules 변전소	Ampacity	Nexans	12	2,300	초전도 케이블과 연계 2014년~운전 중

2010년에는 대용량의 22.9kV/3,000A급 초전도 한류기를 개발했고, 아울러 22.9kV/630A급의 초전도 한류기를 한전의 고창 전력시험센터에 설치하고 1.5년 간의 장기실증시험, 실선로 단락 시험 등을 완료했다.

한편 연세대학교는 현대중공업과 공동으로 2007년에 13.2kV/630A급 단상 권선형 한류기를 개발했다. 국내에서는 최초의 2세대 선재인 YBCO Coated Conductor를 한류기 제작에 사용했으며, 독창적인 슬레노이드 권선법을 개발해 이를 적용시켰다. 이후 에너지 기술개발 사업의 지원을 받아 전력소자의 위상각 제어를 통해 고장전류의 크기를 능동적으로 조절하는 FCC(Fault Current Controller)의 연구를 진행하고 있다.

한전 전력연구원과 LS산전은 전력산업융합원천기술개발사업에서 22.9kV/630A급 초전도 한류기를 이천변전소의 배전선로에 설치하고 2011년 8월에 국내

에서 최초로 초전도 한류기 상업운전을 개시해 약 17개월간 안정적으로 운전했다. 초전도 한류기 원격 감시제어 시스템을 SCADA 시스템과 연계하고 초전도 한류기 이상시 심각 정도에 따라 대응하는 시스템(예 : Level 1의 경우 병렬 CB 자동 절체 등)을 구축해 무인운전을 수행했다.



그림 4 22.9kV/630A급 하이브리드 초전도 한류기 시작품

또한 2014년에는 한전 전력연구원의 주도 하에 154kV/ 2,000A급 단상 초전도 한류기의 제작을 완료해 한전의 고장전력시험센터 내에 설치하고 현재 성능 시험을 진행하고 있다.

2) 해외 동향

(가) 유럽

유럽은 분산전원 투입 등으로 배전급 한류기의 수요가 많아 주로 배전급에서 실계통 적용이 진행되고 있다. 초전도 한류기의 용량과 적용 국가가 확대하는 추세이며 시장 진입을 추진하는 단계에 있다.

독일에서 2009년에 12kV/800A급 저항형 초전도 한류기를 Vattanfall사의 발전소 구내에 소내전력 보호용으로 설치해 운전했다. 최근에는 EU의 지원 하에 5개 전력회사가 참여하고 있는 'Eccoflow 프로젝트'에서 24kV/1,000A급 초전도 한류기를 개발해 2013년에 스페인의 Endesa 계통에 설치하고 실계통 운전을 개시했다.

또한, 독일에서 Ampacity 프로젝트에서 Essen시의

변전소에 12kV/2,400A 초전도 한류기를 설치해 실계통 운전 중에 있다. 한편 이탈리아에서는 9kV/220A급을 개발, Milano의 변전소에 Feeder 보호용으로 설치해 2012년부터 운전 중이다.

(나) 미국

Zenergy Power의 주도 하에 에너지성의 지원을 받아 12.5kV/1.2kA급 초전도 한류기를 개발하고, Southern California Edison의 Shandin 변전소에 설치해 운전했다. American Superconductor는 에너지성의 지원을 받아 Siemens와 공동으로 115kV/900A급의 초전도 한류기를 개발했다.

(다) 중국

Innower사는 중국정부의 지원 등에 힘입어 2007년에 35kV/1.5kA급 제작을 완료하고, 운남성의 Puji 변전소에 설치해 운전했다. 2013년에는 220kV/800A급 초전도 한류기를 개발하고 Tianjin Electric Power 계통의 Shigezhuan 변전소에 설치해 운전 중이다.

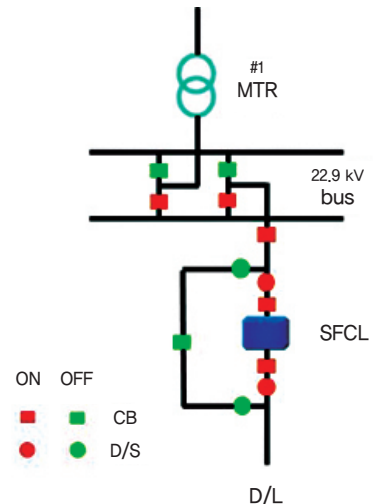


그림 5 이천변전소에서 운전되고 있는 22.9kV/630A급 초전도 한류기(좌) 및 초전도 한류기 설치 위치(우)



그림 6 Eccoflow 프로젝트의 24kV/1,000A급 초전도 한류기(좌), 미국의 115kV/900A급 단상 초전도 한류기(중), 중국의 220kV/800A급 초전도 한류기(우)

3 전망

초전도 한류기는 배전급의 경우 초전도 한류기의 실증을 통해 Track Record를 쌓고 시장 진입을 추진하고 있고, 송전급의 경우 개발을 완료해 실증을 시작한 단계에 있다.

초전도 한류기가 전력계통에 본격적으로 적용되기 위해서는 몇 가지 문제가 먼저 해결되어야 한다. 실계통 장기 테스트를 통한 장기 신뢰성 확보, 초전도 전력기기의 제작비용 저감, 냉각시스템 최적화를 통한 운전 비용 절감, 옥내에 설치되기 위한 한류기 크기 축소 등

이 필요하며, 초전도 한류기가 계통에 투입되었을 때 보호 협조에 대한 연구 또한 추가적으로 필요하다.

초전도 한류기 기술은 장기적인 관점에서 고장전류 문제를 해결할 수 있는 근본적인 대책임에는 분명하다. 이 때문에 전 세계적으로 초전도 한류기를 실계통에 투입하기 위한 개발이 지속적으로 진행되고 있다.

초기에는 다른 신기술의 적용에서와 같이 틈새시장에 적용될 것으로 예상되며, 앞에서 언급한 신뢰성 및 경제성 확보 등의 개선이 이뤄질 경우 초전도 한류기의 계통 적용이 확대됨으로써 보다 안정적이고 효율적인 전력 공급이 가능해질 것으로 예상된다. [KEA](#)