

초전도 한류기 개발과 활용 동향

현옥배
SuperGenics

1. 서 론

초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)는 전력선로의 고장전류를 제어하는 전력기기로서, 고온초전도체의 발견 이후 가장 조기에 활용될 전력기기의 하나로 기대되었다. 그에 맞추어 많은 초전도 한류기가 개발되고 실계통 시험(field test)이 시행되었다. 초전도 한류기가 현장에 설치되어 시험 운전을 시작한 것이 1996년으로, ABB가 자기차폐형 초전도 한류기를 수력발전소 소내 전력계통에 설치하고 6개월간 운용한 것이 시작이다. 그 후, 수많은 학술적 연구에 더하여, 배전 전압은 물론 송전전압용으로 20여건의 초전도 한류기 시스템이 개발 및 제작되었다. 그 대부분은 전력선로 보호용으로 현장에 설치되고 수용가에 전력을 공급하는 전력 시스템의 일부로서 짧게는 반년에서 길게는 수년간 운전되었다. 그 시험을 통해 설치, 운전, 정비 및 고장 수리 등에 관한 경험과 지식을 축적하였다. 그 중 일부에서는 운전 중 실제 고장전류가 발생하였고, 이에 대응하여 한류 성능을 입증하기도 하였다.

그러나 상기 20여 건의 시스템 제작, 현장 설치 및 운전이 대부분 연구개발(R&D)에 기반한 사업으로 진행되었다. 따라서 상당부분의 사업 경비가 정부 등 공공기관으로부터 지원되었다. 따라서, 진정한 의미에서 초전도 한류기의 상업화에는 미흡한 것도 사실이다. 초전도 한류기의 사업 전반에 걸쳐 전적으로 민간 영역에서 시행되기에는 아직 기술개발이 더 진행되어야 할 것으로 보인다.

이 글에서는 초전도 한류기의 방식 및 특징을 간단히 설명하고, 이어서 세계적으로 시행된 개발 및 실계통 시험에 대해 그 현황과 추이를 기술한다. 더하여, 교류용 및 직류용 초전도 한류기 활용 노력과 그 활용 전망에 대해 살펴볼 것이다. 여기에 기술된 내용들은 기 공개된 보고서, 논문, 기사, 인터넷 등 공개된 자료를 기반으로 작성되었다.

2. 초전도 한류기 형식 및 추이

초전도 한류기는 초전도체의 성질을 이용하여 전력 선로의 고장전류를 효과적으로 한류하는 전력기기이다. 기존 상전도 방식의 한류기에 비해, 한류 특성 면에서는 물론, 상시 임피던스, 전력손실 및 신뢰성 측면에서 훨씬 좋은 특성을 보인다. 초전도체의 특성과 임피던스를 만드는 방식에 따라 다수의 초전도 한류기가 여러 가지 방식으로 개발되었다. 주요 방식으로는 (1) 저항형(resistive type), (2) 포화철심형(saturated iron-core type), (3) 자기차폐형(magnetic shield type), (4) 정류형(bridge type, rectifier type, electronic inductive type, etc.) 등이 있고, 더하여 flux lock type, electronic hybrid type 등이 학술적으로 연구 및 개발되고 있다. 특히 최근에는, 자기차폐형의 파생 형식으로, 철심을 제거한, 일명 Smart Coil이 개발되고 있다.

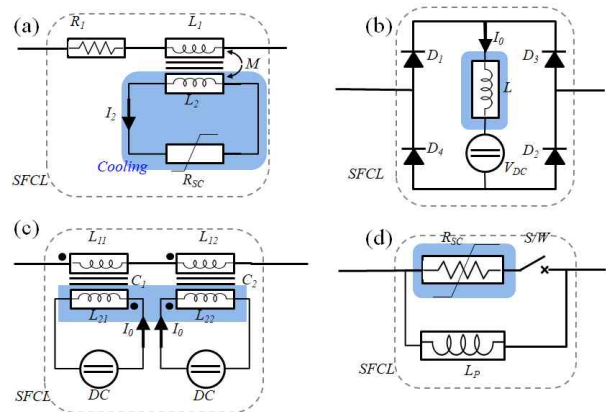


그림 1. 초전도 한류기 주요 일개도. (a) 자기차폐형, (b) 정류형, (c) 포화철심형, (d) 저항형 초전도 한류기 개념도. 청색으로 색칠한 부분이 저온 및 초전도 부분.

이들을 특성으로 정리하면, 우선 한류방식 면에서는 그림 1(a), (b), (c)에 의한 유도형, 그리고 (d)의 저항형으로 구분된다. 한

편, 동작 원리면에서는 (a)와 (d)는 초전도체 quench 방식이고, (b)와 (c)는 quench-free 방식이다.

상기 형식은 초전도체의 사용법, 상전도 부품의 적용 방법 등 각각 특징을 가지며, 나름의 장점과 단점을 보인다. 초전도 한류기 개발 초기인 2000년 전후에는 자기차폐형과 정류형도 주요 개발 방식이었다. 그러나 그 이후 개발 사업이 없다. 이는 초전도체의 제작 문제, 전력전자 소자의 문제 등으로 타 방식에 비해 기술적 난이도가 높다는 것으로 이해된다. 이런 이유로, 여기서는 자기차폐형과 정류형을 제외한 2개 방식, 저항형과 포화철심형에 대해 집중적으로 서술할 것이다.

2.1. 저항형 (Resistive SFCL)

대전류에서 초전도체 quench시 발생하는 저항을 직접 이용하는 방식이다. 전력선로의 전류 및 전압에 맞추어 초전도체를 저온조에 수납한다. Quench시 열발생을 줄이고 한류 시간을 확보하기 위해 차단기 및 한류리액터 (Current Limiting Reactor, CLR)를 같이 사용한다. 다양한 초전도체가 사용되며, 초기에는 REBCO 박막, Bi2212 튜브를 선재 형태로 가공하였다. 최근에는 모두 REBCO 2G 선재를 사용한다. 이 방식으로 가장 많은 수의 초전도 한류기가 제작되고 실제통에서 시험이 이루어졌다. 2018년 운전 중인 초전도 한류기는 모두 이 방식이다. 예로서, Siemens가 제작하고 독일 Augsburg-Stadtwerke 계통에 설치 및 운영 중인 10 kV 초전도 한류기 등이 있다. 특히 소수이지만 순수 상업운전 목적으로 도입한 형식도 저항형이다. 사례로, Applied Materials (AMAT)가 제작한 115 kV 시스템 (태국 Glow energy의 분산전원 도입으로 인한 고장전류 억제용으로 설치)과 러시아 SuperOx의 220 kV급 시스템 (모스크바 시내 UNECO 계통의 Mnevnik 변전소에 설치 예정)이 있다. 국내 한전 전력연구원이 개발한 154 kV, 2 kA급 (고창 시험장에서 시험)도 저항형이다.

저항형은 타 방식에 비해 구조가 간단하고 이해하기 쉽다. 기술 난이도도 낮은 편이어서, 실제로 기술 완성도가 4가지 방식 중 가장 높다. 전력선이 초전도체이므로 상시 임피던스가 아주 작다는 것이 자랑이다. 초전도 도체 선택에 따라 한류 임피던스를 임의로 조절할

수 있음도 장점이다 (strong limitation).

한편, 초전도체에 직접 교류 전류가 인가됨으로 인한 기술적 어려움이 크다. 예로서, 부상과 저온조에 극저온 고전압 기술이 필수적이다. 또한, 전류인입선 열부하 및 교류손실 등으로 냉각부하가 커서 대형 냉동기가 쓰이고 운용 경비도 높다. 더하여, 초전도체 quench 이후 회복시간이 필요해서 고장전류 차단 후 0.3 ~ 0.5초에 이루어져야 하는 재폐로 (reclosing)가 불가하다. 단, 부하 중 회복 기능 (Recovery Under Load, RUL)을 적용하면 불안전하지만 재폐로가 가능하다. 냉동기, 차단기 및 CLR을 추가하면 크기가 작지 않다.

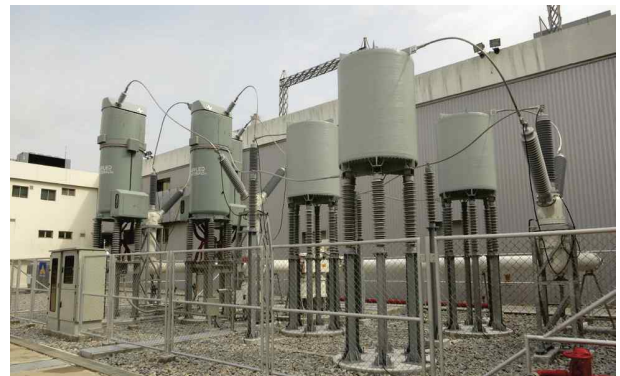


그림 2. Glow Energy에 설치된 상업운전용 115 kV 초전도 한류기. 왼쪽이 초전도 소자 부분, 오른쪽은 CLR. AMAT 제작. (사진 AMAT 제공).

2.2. 포화철심형 (Saturated Iron-core SFCL)

구조는 변압기와 유사하다. 1차 코일은 기존 상전도 코일로 하고, 2차 코일에 DC 초전도 자석을 설치한다. 초전도 자석으로 철심을 포화시켜 1차 코일에 철심에 의한 리액턴스 제거하고, 고장시는 고장전류에 의해 철심의 포화가 풀리면서 1차코일에 임피던스를 발생시켜 한류한다. 이 방식으로 220 kV 시스템을 제작하고 변전소에 설치 및 시험운전한 바 있으며 (그림 3), 2017년에는 중국남방전력이 500 kV 단상을 제작하고 성능시험하였음을 발표하였다. 한편, ASG Power systems는 1차 - 2차 코일을 동축으로 설계한 compact model을 소개하고 있다.

포화철심형에서는 1차 코일이 상전도 방식이므로 고전압에 유리하다. 초전도체는 고전압으로부터 분리되어 있으며, DC 전류이므로 손실이 작은데다, 자석을 충전시키는데 상대

적으로 저전류를 사용할 수 있으므로 냉각부하가 작고 운전경비도 낮다. 더욱이 quench가 없으므로, 회복이 지극히 빨라서, 즉시 한류 - 즉시 회복이 이루어져 차단기 재폐로를 가능하게 한다.

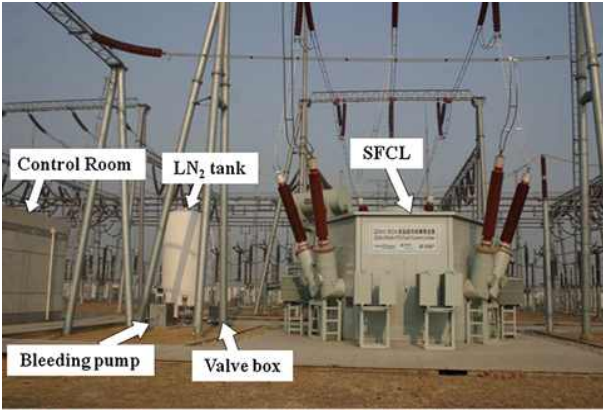


그림 3. 220 kV 포화철심형 초전도 한류기. Innopower사가 제작, Chinese national Grid의 Shigezhuang 변전소에 설치 및 운전 시험.

단점으로는 대형 철심 필요해서 크기가 크고, 무겁다. 1차 코일에서의 상시임피던스 및 손실도 단점이다. 그리고 한류 임피던스가 작아서 weak limitation 특성을 보인다. 무엇보다도, 철심의 포화가 풀릴 때 초전도 자석에 유도기전력이 발생하는데, 이에 대한 초전도 자석 보호기술이 쉽지 않다. 2가지 방식이 적용되었는데, (1) 병렬 보호회로와, (2) 초전도 자석을 방전회로가 있다. 방전의 경우 충전 시간으로 인해 재폐로가 어렵다. 두 방식 모두 대형 고장일수록 기술이 어렵다.

3. 초전도 한류기 개발 및 활용 현황

1996년 ABB가 자기차폐형 초전도 한류기를 설치 및 운용한 이래 20건 이상의 시스템 제작, 설치 및 계통운영 사례가 보고되어 있다. 이를 통해 한류기의 성능 입증에 더하여, 운전 및 정비 기술, 운영 경비 조사 등 활용에 필요한 지식과 경험이 축적되었다

3.1. 초전도 한류기 계통 적용 현황

표. 1은 세계적으로 초전도 한류기 제작, 현장 설치 및 전력공급용으로 운용된 사례를

모은 것이다. AMSC/Siemens의 115 kV SFCL 등에서처럼, 연구개발은 되었으나 현장 운전 시험이 없었던 사업은 이 표에 포함되지 않았다. 반면, 현장에 설치 및 운전이 계획되어 있는 진행중인 사업을 포함시켰다 (SuperOx의 220 kV SFCL).

이 표가 보여주듯이, 개발 초기에는 자기차폐형, 정류형 등이 활발하게 연구개발 되었으나, 시간이 가면서 포화철심형과 저항형으로 압축되고 있다. 2018년 현재 실계통 운용중인 초전도 한류기는 전부 저항형이다. 그리고 진행중인 초전도 한류기 개발 사업도 저항형이 대세를 이루고 있다. 이는 저항형 모델이 타 형식에 비해 기술적으로 더 성숙해 있음을 나타낸다고 할 수 있다.

한편, 표 1에 표시되어 있지 않지만, 초전도 한류기 실계통 시험에서 실제 고장에 발생했고, 그에 대처하여 한류 성능을 입증한 사례도 있다. 그 중에는 Central Hudson G&E 계통의 Knapps Corner SS, Poughkeepsie, NY에 설치된 변압기의 NGR 보호용 초전도 한류기가 있다. 이 초전도 한류기는 2014년 6월부터 2017년 가을까지 3년간 31회나 발생한 고장전류에 대해 한류성능을 입증하였다. 국내에서도, 이천 변전소에 설치된 22.9 kV 초전도 한류기가 2년의 운전기간 동안 2회의 고장전류가 발생하였고, 성공적으로 한류한 바 있다.

3.2. 초전도 한류기 사용자

표 1의 실증 사업에서 초기에는 연구개발의 일부로서 수행된 실증사업이었다. 실증 사업이 초전도 한류기가 필요한 장소에서 주로 수행되었지만, 부분적으로는 전력계통에 초전도 한류기가 반드시 필요하지는 않음에도 기기의 성능 입증을 위해 실증 시험을 수행하기도 하였다. 반면, 최근의 초전도 한류기는 실제 필요에 의해 그 위치 및 사양을 정하고 있다. 예로서, 독일 Augsburg시의 Stadtwerke-Augsburg 계통과 태국의 Glow Energy 계통에 설치된 사례가 있는바, 각각 분산전원의 도입에 따라 고장전류가 증가하였고, 이를 완화하기 위한 목적으로 설치한 것이다. 아래 표 2는 표 1의 초전도 한류기가 설치된 계통상의 위치를 요약한 것이다. 활용 경향을 파악하기 위해 계획되었지만 사업이 중단된 경우와 현재 진행 중인 사업을 포함하여 작성하였다.

표 1. 초전도 한류기 개발 및 실증사업 현황. 녹색 부분은 2018년 운용중이거나 건설 중인 초전도 한류기. (※ MS = 자기차폐형, BG = 정류형, SI = 포화철심형, R = 저항형, N/A = Not Available)

설치 장소	Project (전력회사)	제작사 (형식)	사양		활용처 및 운용 기간 (Field test or live-grid operation period)
			V(kV)	I(A)	
배전용 (Medium Voltage, ≤ 35 kV)					
Löntschi, Switzerland	PSEL (NOK power plant)	ABB (MS)	10.5	66	발전소내 전력선 보호(1996 ~ 1997, 6개월)
SCE Center SS, LA, USA	SPI-DOE (SCE)	GA (BG)	15	1200	SCE grid (operation test N/A)
Nephen SS, Germany	CURL10 (RWE)	Nexans (R)	10	800	Bus-tie (Apr. 2004 ~ Mar. 2005)
Baiyin SS, Gansu, China	MOST, China (N/A)	CAS (BG)	10.5	1500	변압기 2차측 (Feb. 2011 ~ Mar. 2015)
Tokyo Gas, Japan	NEDO (Tokyo Gas)	Toshiba (R)	6.6	72	IPP 선로 보호 (Jan. 2008 ~ N/A)
Puji SS, Kunming, China	CMST (Southern China Power Grid)	Innopower (SI)	35	1500	Outgoing feeder (Feb. 2008 ~ more than 4 years)
Shandin SS, LA, USA	CEC Avanti & DOE (SCE)	Zenergy (SI)	15	2000	Outgoing Feeder (Mar. 2009 ~ Oct. 2010)
Bamber Bridge, Lancashire, UK	IFI-LCNF (ENW)	Nexans (R)	11	100	Busbar coupling (Oct. 2009 ~ Jun. 2010)
Boxberg power plant, Germany	Vattenfall (Vattenfall)	Nexans (R)	12	800	Outgoing feeder (power plant grid) (Nov. 2009 ~ Oct. 2010 (1st FT))
Boxberg power plant, Germany	ENSYSTROB (Vattenfall)	Nexans (R)	12	800	Outgoing feeder (power plant grid) (Oct. 2011 ~, 1 year (2nd FT))
이천변전소, 한국	GENI (한국전력)	LS산전 (R)	22.9	630	Outgoing feeder (Aug. 2011 ~ Jan. 2013)
Ainsworth Lane, Liverpool, UK	IFI-LCNF (Scottish Power)	Nexans (R)	11	400	Busbar coupling (Aug. 2012 ~ Mar. 2014)
San Dionigi SS, Milano, Italy	RSE (A2A)	RSE (R)	9	(3.4 MVA)	Feeder protection (Mar. 2012 ~ Jun. 2014)
Scunthorpe SS, North Lincolnshire, UK	IFI-LCNF (Northern Power Grid)	Zenergy, ASL (SI)	11	1250	Transformer (secondary) (Aug. 2012 ~ 2014)
San Juan de Dios, Palma de Mallorca, Spain	ECCOFLOW (Endesa)	Nexans (R)	24	1005	Bus-tie N/A (Planned Oct. 2013 ~, 6 months)
AMAT, Santa Clara, USA	AMAT (AMAT)	AMAT (R)	15	1000	Local grid protection (Jul. 2013 ~ N/A)
Knapps Corner SS, Poughkeepsie, NY, USA	NYSERDA (Central Hudson G&E)	AMAT (R)	15	400	NGR (Jun. 2014 ~ Autumn 2017)
Hercules SS, Essen, Germany	Ampacity (RWE)	Nexans (R)	12	2300	HTS cable protection (Mar. 2014 ~ 2 year FT, 운전기간 연장)
Chester street SS, Birmingham, UK	FlexDGrid (WPD)	Nexans (R)	12	1600	Busbar coupling (Nov. 2015 ~, 2 year FT 운전기간 연장)
Bournville, Birmingham SS, UK	FlexDGrid (WPD)	Nexans (R)	12	1050	Busbar coupling (Mar. 2016 ~, 2 year FT 운전기간 연장)
Lechhausen SS, Augsburg, Germany	ASSiST (Stadtwerke-Augsburg)	Siemens (R)	10	815	IPP (CHP) connection (Mar. 2016 ~ 2017 & 장기운전 중)
송전용 (≥ 66 kV)					
Shegezhuang SS, Tianjin, China	863 plan, China (Chinese State Grid)	Innopower (SI)	220	800	Transformer (primary) or Network coupling (Jun. 2012 ~, 3년 운전 계획.)
Map Ta Phut, Rayong, Thailand	- (Glow Energy)	AMAT (R)	115	800	Transformer (secondary), 2 units (July 2016 ~, 상업 운전)
Mnevnik SS, Moscow, Russia	- (UNESCO)	SuperOx	220	1200	(Under installation. 상업 운전)

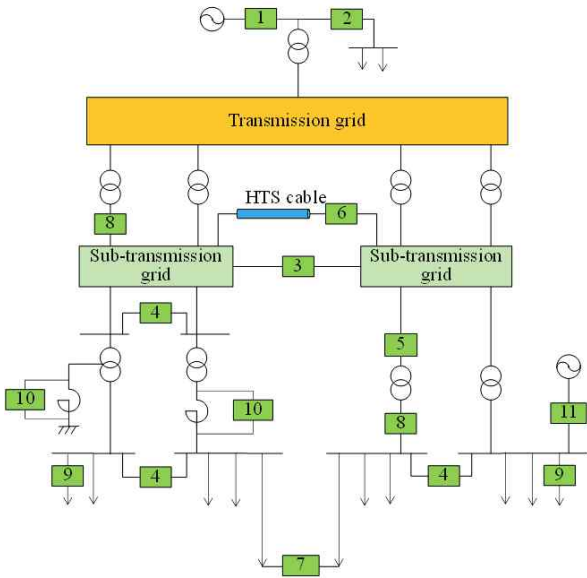


그림 4. 초전도 한류기 사용처 사례.

표 2. 초전도 한류기 적용처.
(괄호 안의 번호는 그림 4의 번호와 동일.)

설치 위치	설치 변전소
Generator feeder (1)	
Power station auxiliaries (2)	- Löntsch - Boxberg
Network coupling (3), Busbar coupling (4)	- Puji - Netphen - Bamber Bridge - Ainsworth Lane - San Juan de Dios - Chester Street - Bournville - Devers, SCE (115 kV)* - Mnevniki (220 kV)
Protection of superconducting equipment (6)	- Hercules
Loop - Closing ring circuit (7)	
Transformer (primary) (5)	- Shigezhuang (220 kV)
Transformer (secondary) (8)	- Gaoxi-Loudi & Baiyin - Shandin - VSA (Eccowflow) - Scunthorpe - Map Ta Phut - Tidd, AEP (138 kV)*
Outgoing feeder (9)	- - San Dionigi
Shunting CLR / NGR (10)	- Knapps Corner
Coupling local generating units (11)	- Tokyo Gas (IPP) - Lechhausen, Augsburg (CHP)

* 사업 중단으로 실증시험 없음.

3.3. 실증 사업의 성격과 활용성

표 1에서 보는 실증 사업을 보면, 대부분 R&D 성격의 개발 및 실증 사업으로, 정부 등으로부터 공공 자금 지원하에 이루어 졌다. 개발 초기에는 통상적으로 사업경비의 필요성이나 위험 등으로 정부 지원하에 개발이 이루어진다. 그러나 경제성이 보장된 사업이라면 민간 기업으로부터의 투자 및 개발이 이루어져야 할 것이다. 표 4는 현재 운용 중인 초전도 한류기 및 진행 중인 사업에 대해 사업 경비의 성격을 담고 있다.

이 표에서 보듯이, 현재 운용 중인 초전도 한류기들이 주로 정부 자금 혹은 기타 공공 자금의 지원으로 사업을 수행하고 있다. 공공 자금 지원이 사업 경비의 대략 50% 정도일 것으로 추정되는데, 이로 인해 현재의 실증 사업이 진정한 의미의 상업적 활용에는 미치지 못한다. 한편, 표의 아래 2개 사업, Glow Energy의 사례와, 아직 설치되지 않았지만 진행 중인 사업으로 UNECO의 사례는 초전도 한류기 활용 면에서 새로운 변화를 암시하고 있다. 상기 2건은 정부지원 등 공공 자금 지원이 없이 고장전류 증대에 대한 대책으로 시행된 순수 민간사업으로 알려져 있다. Glow Energy의 경우 신규 발전원이 계통에 연결됨으로 인한 고장전류 증대를 억제하기 위한 목적으로 초전도 한류기가 적용되었다. UNECO의 경우도 Moscow 지역의 선로 증설에 따른 고장전류 증대에 대한 대책이다.

표 3. 운전 및 건설 중인 초전도 한류기 적용 사업에 대한 공공자금 지원. 가장 최근의 활용사업은 순수 민간사업. (표. 1 참조)

설치장소	설치 년도	Project	전력 회사	지원 기관
Hercules SS, Essen, 독일	2014	Ampacity	RWE	BMWi
Chester street SS, Birmingham, 영국	2015	FlexDGrid	WPD	LCNF
Bournville SS, Birmingham, 영국	2016	FlexDGrid	WPD	LCNF
Lechhausen SS, Augsburg, 독일	2016	ASSiST	(주1)	(주2)
Map Ta Phut, Rayong, 태국	2016	Glow Energy	Glow Energy	(없음)
Mnevniki SS, Moscow, 러시아	2018	UNECO	UNECO	(없음)

(주1) Stadtwerke-Augsburg
(주2) Bavarian State Ministry for Economic Affairs and Media, Energy and Technology

3.4. 진행 중인 초전도 한류기 사업

현재 진행 중인 초전도 한류기 사업으로 러시아의 SuperOx가 개발하는 220 kV, 1.2 kA 저항형 초전도 한류기가 있다. 이 한류기는 러시아 전력회사인 UNECO가 발주하고 SuperOx가 수주하였다. 러시아 UNECO 전력계통의 Moscow 서부 지역에 있는 한 변전소에 2018년 설치될 예정이다.

한편, 국내에서는 LS산전이 한국전력공사의 지원 사업으로 22.9 kV 저항형 초전도 한류기를 개발하고 있다. 여기서 주목할 점은, 한국전력공사가 도심지에 소형 에너지센터 (Mini-Energy Center, 일종의 소형 변전소)를 통한 전력공급을 구상하고 있는데, 그 개념상 변전소간 계통 연계를 상징하고 있어 고장전류제한장치가 필요하다. 개발 중인 LS산전의 초전도 한류기도 상기 소형 에너지센터 계통에의 적용이 검토되고 있는 한류장치 중 하나이다. 소형 에너지센터 계통이 실현되고, 고장전류제한기로 초전도 한류기가 채택되어 성공적으로 운전된다면, 이는 국내의 초전도 한류기 활용에 큰 전환점이 될 것으로 기대된다.

3.5. DC 계통에의 적용

상기 표 1을 포함하여 모든 초전도 한류기는 교류 전류를 가정한 교류용 초전도 한류기 (AC SFCL)이다. 그 설치 장소도 교류 전력 계통이다.

한편, 최근에는 고압직류계통(HVDC)의 관심 및 적용 증대에 맞추어 직류용 초전도 한류기(DC SFCL)가 연구 및 개발되고 있다. HVDC network에 있어 문제 중의 하나는 고장전류 제한과 적절한 차단장치의 어려움이다. 초전도 한류기는 DC 계통에서 고장전류 제한기로서, 혹은 차단장치의 일부로서 적용될 수 있다. 최근 많은 DC SFCL 관련 연구가 발표되고 있거니와, 아직 대부분의 주내용이 시뮬레이션 혹은 해석 관련이지만, 실제 DC SFCL을 개발 사업도 있다. 예로서, 중국은 160 kV DC SFCL 개발 사업을 승인하였다. 더하여, 유럽연합의 FASTGRID 사업은 150 kV DC SFCL demonstrator 개발을 목표로 하고 있다. 특히 FASTGRID 사업에서 주목할 점은 저항형 초전도 한류기에 소요되는 초전도 도체의 성능을 혁신시켜, 과거보다 도체량을 약 1/3로 감소시키는 연

구를 진행하고 있다는 것이다. 이 연구 목표대로라면 DC, AC모두의 초전도 한류기에서도 도체량 감소, 냉각부하 감소 등 경제성 확보에 큰 기여를 할 것이다.

4. 전망 및 요약

초전도 한류기는 고장전류를 한류하는 초전도 전력기기이다. 상술한 바와 같이, 20여건의 초전도 한류기가 개발되고 현장에서 실증 사업을 수행하였다. 기술적으로는 여러 방식이 시도 되었고, 최근에 이르러서는 주로 저항형이 대세를 이루고 있다. 기술 개발 여하에 따라 다른 형식의 초전도 한류기도 등장할 것이다. 또한, DC 계통이 활성화되면 그에 맞는 DC 용 초전도 한류기가 개발되어야 할 것이다. 경제성 등에서 현장이 요구에는 아직 미흡한 부분이 많이 있기는 하다. 그러나 최근 순수 민간 부문에서 SFCL의 활용이 시도되는 것처럼, 점차 R&D에서 상업적 활용으로 전환되는 시기에 있다고 사료된다. 국내에서도 전력계통에 초전도 한류기가 채택되고 성공적으로 운용될 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Mathias Noe and Michael Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. R15 - R29, 2007.
- [2] A. M. Wolsky, *HTS from precommercial to commercial - A roadmap to future HTS by the power sector*, Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, September 2013.
- [3] Ok-Bae Hyun, "Brief review of the field test and application of a superconducting fault current limiter", *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, Vol.19, No.4, (2017), pp. 1 - 11.
- [4] Albert Nelson, "Safe Guarding T&D Assets

against Fault Currents,” Applied Materials webinar. [Online] Available: <http://tinyurl.com/Safe-Guarding-TD-Assets-Asia>.

- [5] M. Moyzykh, D. Sotnikov, D. Gorbunova, and S. Samoilenkov, “Superconducting Fault Current Limiter for Moscow 220 kV City Grid,” presented at *EUCAS 2017*, paper 1L01-02, September 2017.
- [6] <http://www.superox.ru/en/products/979-tou-vysokogo-napryazheniya/>
- [7] Young-Hee Han, Seongeun Yang, Heesun Kim, Byung-Jun Park, Jaeun Yu, Hye-Rim Kim, Sewhan In, Yong-Ju Hong and Hankil Yeom, “Development and Long term Test of a Compact 154 kV SFCL,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (in print).
- [8] Antonio Pellecchia, David Klaus, Giovanni Masullo, Roberto Marabotto, Antonio Morandi, Massimo Fabbri, Chris Goodhand, and Joseph Helm, “Development of a Saturated Core Fault Current Limiter With Open Magnetic Cores and Magnesium Diboride Saturating Coils,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, Art. no. 5601007, 2017.
- [9] http://www.csg.cn/index/jdxw/201707/t20170721_158718.html. - 500 kv
- [10] Hye-Rim Kim, Seung-Duck Yu, Heesun Kim, Woo-Seok Kim, Seong-Eun Yang, Ji-Young Lee, and Ok-Bae Hyun, “Demonstration of a Superconducting Fault Current Limiter in a Real Grid,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Art. no. 5603604, 2013.
- [11] Min Jee KIM, Ok-Bae HYUN, Sang Hoon LEE, Gyeong Ho Lee, Chae Yoon BAE, Young-Geun KIM, Jong-Jin LEE, Yong Hoon JANG, “Conceptual Design of a 25.8 kV, 2.0 kA Compact Resistive SFCL for Power System Interconnection”, (submitted to *CIREC* 2019)
- [12] Lei Chen, *et al.*, “Current Limiters for a Hybrid High Voltage Direct Current System”, *Materials*, 2019, 12, 26.
- [13] http://ias.ust.hk/program/shared_doc/2018/201801hep/program/acc/HEP_20180118_1530_Yue

_Zhao.pdf

- [14] P. Tixador, “A new EC project: FASTGRID”, presented at EUCAS 2017; FastGrid News Letter #2, July 2018.

저자이력



현옥배 (玄鉦培)

1972-1975년 연세대학교 물리학과 이학사, 1976-1980년 연세대학교 이학석사, 1981-1987년 Iowa State Univ. Ph. D, 1987-1991년 Post doctoral Fellow/Research Associate (Ames Lab.), 1991-1992년 Guest Researcher (NIST, Boulder), 1992-1995년 ISTEFC Fellow (ISTEFC), 1997-2013년 한전 전력연구원 수석연구원.