

초전도 한류기용 극저온 냉각시스템

인세환¹, 홍용주¹, 염한길¹, 김희선², 김혜림²
한국기계연구원¹, 한국전력 전력연구원²

1. 서 론

초전도 한류기는 초전도체의 특성을 이용하여 전력선에 사고 등에 의해서 과도한 고장전류가 흐르게 될 때 빠르게 전기적인 부하를 발생시켜 고장전류의 크기를 줄여주고 전력망을 보호하는 역할을 한다. 초전도 한류기는 작동원리에 따라서 저항형, 포화철심형, 자기차폐형, 정류형 등 다양한 방식으로 개발되어 왔는데, 그 중에서 상업적으로 가장 활발하게 개발이 진행되고 있는 것은 저항형(resistive type)이다.[1-2] 저항형 초전도 한류기는 초전도체가 임계 전류밀도 이상에서 초전도성을 잃어버리고 저항이 급격하게 증가하는 켄치(quench)현상을 이용하여 고장전류를 제한한다. 특히 저항형 초전도 한류소자와 차단스위치, 리액터를 연계한 하이브리드 방식은 순수 저항형에 비해 초전도체의 필요량을 최소화하면서 한류시간을 늘리고 한류기의 회복시간을 단축할 수 있는 장점을 가진다. 하이브리드 방식은 저항형 초전도 한류소자가 초기 고장을 감지하고 차단스위치가 고장전류를 차단하여 이와 병렬로 연결된 리액터에서 고장전류를 한류하는 방식이다.[1] 현재 초전도 한류기 상용화를 위한 프로젝트들이 우리나라 외에 미국, 유럽, 중국, 일본 등에서 추진되고 있다. 표 1은 이러한 프로젝트들의 개발 내용을 초전도 한류기의 종류, 용량 및 냉각시스템 관점에서 요약한 것이다. 다만 이들 프로젝트들에 적용된 냉각시스템에 대해서 알려져 있는 내용은 매우 제한적이다.[2] 우리나라에서는 전력산업 융합원천기술 개발사업으로 한국전력 전력연구원(주관기관), 한국기계연구원, 한양대가 참여하여 지난 2011년부터 5년의 개발기간으로 154 kV, 2 kA급 초전도 한류기를 개발하고 있다. 하이브리드 방식의 단상 초전도 한류기로 냉각 시스템으로는 스테링 냉동기를 이용한 과냉 액체질소 순환 냉각방식을 채택하였다. 현재 1단계(2011년

~2014년) 연구 개발이 끝나고 2단계(2014년 ~ 2016년) 연구가 진행 중이며, 초전도 한류기의 설치 및 시험은 고창의 한국전력 전력시험센터에서 수행되었다. 여기서는 지난 1단계, 3년간 수행하였던 연구결과를 극저온 냉각시스템에 한정하여 소개하고자 한다.

2. 극저온 냉각시스템의 구성

초전도 한류기가 작동하기 위해서는 한류기를 초전도체의 임계온도 이하로 유지하여야 한다. 또한 작동온도가 낮을수록 초전도체의 임계전류 밀도가 올라가기 때문에 한류기의 초전도 소자를 소형화하기 유리하다. 그래서 고온 초전도체로 구성된 초전도 한류기의 경우 액체질소의 온도를 극저온 냉동기를 이용하여 낮추고 과냉된 액체질소를 이용하여 초전도 한류소자를 냉각한다. 한편 전기절연의 측면에서도 과냉된 액체질소를 이용한 초전도 한류기 냉각은 켄치 시 액체질소에서 발생하는 기포생성을 억제하여 기포로 인한 절연 성능의 저하를 막을 수 있다.[3-5] 더불어 액체질소의 과냉 정도를 증가시키기 위하여 초전도 한류기가 설치되는 저온조의 압력을 높여준다. 이는 기포생성 억제효과 이외에 고압에

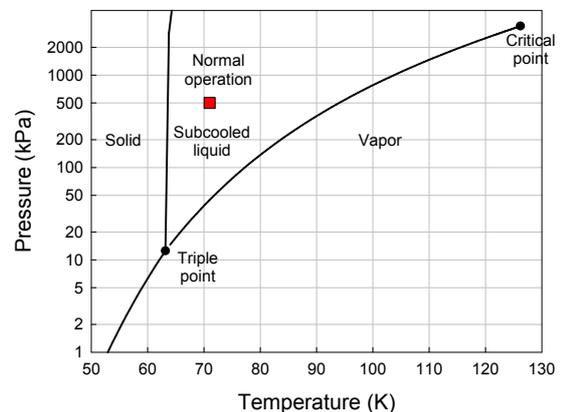


그림 1. 초전도 한류기 작동온도와 압력.

표 1. 초전도 한류기 연구현황[2].

Project	SuperLimiter™	AmpaCity	Boxburg	ECCOFLOW	AZA/RSE	Bruker iSFCL	Puji	Shanghai 10kV	Tianjin 220 kV	Nagoya
Location	Los Angeles, USA	Essen, Germany	Boxburg, Germany	Slovakia and Spain	Milan, Italy	Augsburg, Germany	Puji Substation, China	Chongming Island, China	Shigezhuang Substation, China	Nagoya, Japan
Developer	AMSC consortium	Nexans	Nexans	Nexans	ERSE Spa	Bruker EST	Innower	Shanghai Jiao Tong University	Innower	Nagoya University
Type	Hybrid	Resistive	Resistive	Hybrid	Resistive	Inductive Shielded Core	Saturable Core	Resistive	Saturable Core	HTS Transformer
Voltage	138 kV	10 kV	12 kV	24 kV	9 kV	10.6 kV	35 kV	10 kV	220 kV	22 kV/ 6.6 kV
Rated current	1.2 kA	2.4 kA	560 A	1005 A	220 A	817 A	1.5 kA	400 A	800 A	52.5/ 175 A
Cryogen	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂
Refrigeration type	Closed-Loop, Recondensing System	Sub-cooled, pressurized, open cycle LN ₂	Open-loop	Closed-loop, GM cryocooler	Closed-loop, Stirling cryocooler	Unavailable	Open-loop	Unavailable	Unavailable	Unavailable
Refrigeration system capacity	300 W @77 K	4 kW @67 K (incl. cable)	3 kW @65 K	Unavailable	1 kW @77 K	Unavailable	200 W @77 K	Unavailable	Unavailable	Unavailable
Nominal operating temperature	<75 K	67 K	77 K	Unavailable	65 K	Unavailable	77 K	Unavailable	Unavailable	77 K

서 기체질소의 절연특성이 향상되기 때문에 초전도 한류기 중 기체질소에 노출되는 부분의 절연성능을 또한 증가시킬 수 있다.[6] 현재 개발 중인 초전도 한류기의 작동 온도와 압력은 71 K, 500 kPa 이다. 그림 1은 초전도 한류기의 작동조건을 액체질소 상평형도에 나타낸 것이다. 극저온 냉각시스템은 초전도 한류기의 이러한 작동조건을 만족시키도록 구성된다.

그림 2는 초전도 한류기 냉각시스템의 개략도를 나타낸다. 초전도 한류기 냉각시스템은 초전도 한류소자가 설치되는 저온조(main cryostat), 가압장치(pressure builder), 과냉각 저온조(subcooling cryostat), 극저온 냉동기(cryocooler)로 구성된다. 또한 과냉각 저온조는 하이드로 사이클론(hydro-cyclone), 극저온 열교환기(cryogenic heat exchanger), 액체질소 펌프(LN₂ pump)로 구성된다. 그림 3과 4는 구축된 초전도 한류기의 극저온 냉각시스템을 나타낸다. 초전도 한류기 냉각시스템은 저온조 내부의 액체질소를 액체질소 펌프를 이용하여 순환시키면서 극저온 냉동기를 통하여 냉각하는 구조로 이루어져 있다. 저온조에서 발생한 열을 흡수한 액체질소는 저온조로부터 배출되어 하이드로 사이클론을 통과한다. 이어서 액체질소는 극저온 열교환기에서 과냉각 저온조 내부의 낮은 온도의 액체질소와 열교환을 하여 온도가 낮아진다. 과냉각 저온조의 내부의 액체질소는 포화상태로 존재하며 극저온 냉동기에 의하여 내부압력이 조절된다. 즉

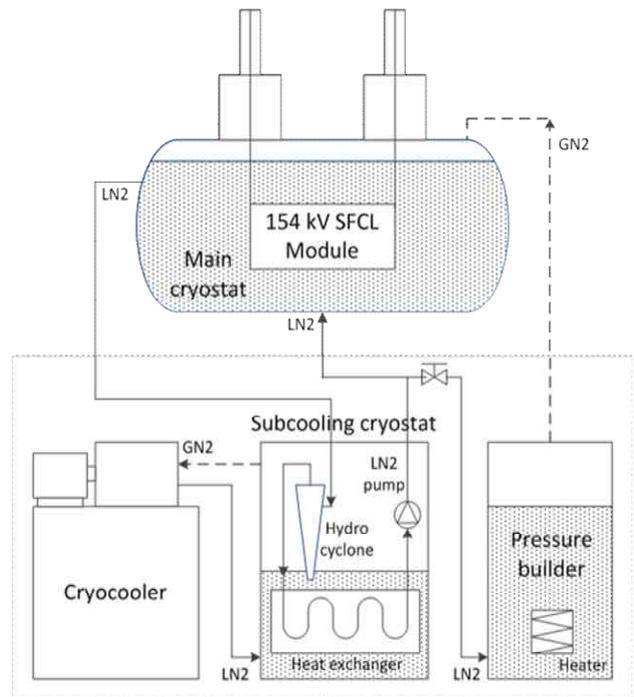


그림 2. 극저온 냉각시스템 구성도.

과냉각 저온조의 기체질소는 극저온 냉동기의 저온부 열교환기에서 재액화되고 재액화량을 조절하여 과냉각 저온조의 압력을 제어한다. 물론 과냉각 저온조 내부의 액체질소는 포화상태에 있기 때문에 내부압력을 조절함으로써 액체질소의 온도가 제어된다. 하이드로 사이클론은 냉각시스템의 제작과정 중 발생하여 배출되지 못한 미세 입자(50 μm 이상)들이 고전압 하에서 방전을 일으켜 절연파괴(break-down) 되는 것을 방지하기 위해

3. 극저온 냉각시스템 운전결과

표 2. 초전도 한류기용 극저온 냉각시스템 사양

System component	Specification
Main cryostat	- 71 K, 500 kPa, heat load < 800 W
Coolant	- Subcooled LN ₂ (500 kPa, 71 K, 23 ton)
Pressure builder	- Automatic pressure control (500 kPa) - Heater (2 kW) - Solenoid valve
Subcooling cryostat	- LN ₂ circulation pump (30 kg/min) - Hydrocyclone (50 μm) - Heat exchanger (4 kW)
Cryocooler	- Stirling cryocooler (RL type, 4 kW @ 77 K)



그림 3. 액체질소 충전중인 저온조.



그림 4. 극저온 냉각시스템 (극저온 냉동기, 과냉각 저온조, 가압장치).

미세입자를 포집하는 역할을 한다. 극저온 열교환기를 통과한 액체질소는 액체질소 펌프를 거쳐서 다시 저온조로 돌아간다. 저온조 내부를 작동압력(500 kPa)으로 유지하기 위해서 가압장치가 사용되었다. 가압장치는 액체질소로 채워진 극저온 압력용기 내부에 히터가 설치된 구조로 히터로 공급되는 전력을 이용하여 내부의 액체질소를 기화시켜서 저온조로 공급한다. 저온조의 압력은 히터에 공급되는 전력과 가압장치에 상부에 설치된 솔레노이드 밸브의 개폐를 통하여 제어된다. 가압장치 내부의 액체질소가 최소높이 이상으로 유지되도록 저온조로부터 주기적으로 액체질소가 공급된다. 표 2는 초전도 한류기용 극저온 냉각시스템의 사양을 나타낸다.

초전도 한류기의 냉각시스템 운전은 전체 시스템의 질소 퍼징, 저온조 예냉, 액체질소 충전, 냉동기 운전을 통한 액체질소 과냉각, 저온조의 가압 과정으로 이루어진다. 저온조 예냉은 저온조와 저온조의 초전도 한류소자 및 부상에서의 열응력 발생을 최소화하기 위하여 저온조를 서서히 냉각하는 과정이다. 저온조 예냉이 끝나면 액체질소를 충전하고 극저온 냉동기를 가동한다. 이후 액체질소 펌프를 가동하여 저온조의 액체질소를 냉각시스템 내부로 순환하여 저온조의 온도를 한류기의 작동온도로 낮춰준다. 저온조의 온도를 낮추면서 가압장치를 이용하여 저온조의 압력을 한류기 작동압력으로 올려주고 유지시킨다. 극저온 냉각시스템을 통한 일련의 과정을 통하여 초전도 한류기는 작동온도와 작동압력을 유지하게 된다.

그림 5는 극저온 냉각시스템의 운전 동안 극저온 냉동기, 과냉각 저온조, 저온조로부터 과냉각 저온조로 유입되는 액체질소 및 저온조로 다시 공급되는 액체질소의 온도변화를 나타낸다. 그림에서 가로축은 저온조 내부의 액체질소가 액체질소 펌프에 의해서

1회 순환하는데 걸리는 시간($\tau=14.6$ 시간)에 대해서 무차원화한 시간이다. 그림 5에서

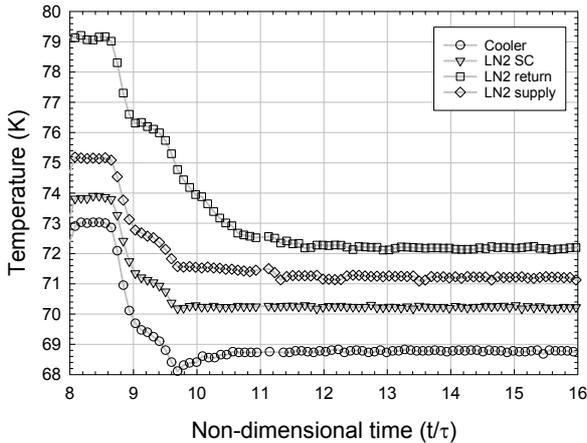


그림 5. 극저온 냉각시스템의 액체질소 온도변화.

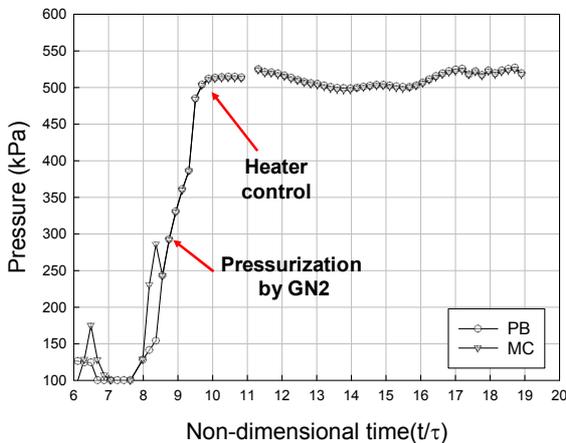


그림 6. 저온조와 가압장치의 압력변화.

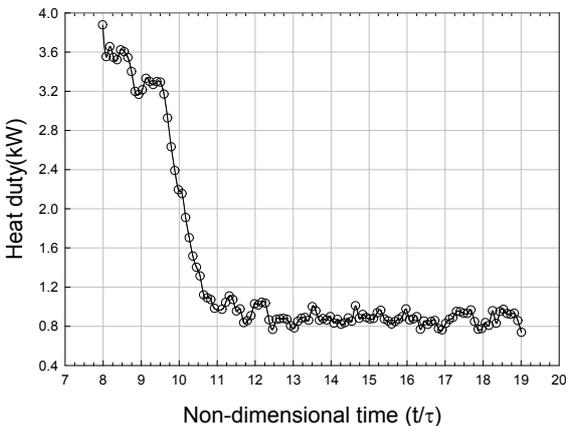


그림 7. 극저온 냉동기 냉각부하의 변화.

저온조 내부의 액체질소 온도를 낮추기 시작 한지 약 $3\tau(8.5\tau\sim 11.5\tau)$ 의 시간 후에 액

체질소의 온도가 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 이 때 저온조로부터 유입되는 액체질소의 온도는 약 72 K, 과냉각 저온조로부터 저온조로 공급되는 액체질소의 온도는 약 71 K를 나타낸다. 저온조에서 액체질소 배출구의 위치는 저온조 높이를 기준으로 80% 위치에 있고, 초전도 한류소자는 그 아래 위치한다. 그리고 저온조로 액체질소가 공급되는 위치는 저온조 바닥이다. 따라서 그림 5의 결과는 초전도 한류소자의 온도가 초전도 한류기의 작동온도인 71 K에서 1 K 이내에 들어옴을 나타낸다. 그림 6은 운전 중의 저온조와 가압장치의 압력변화를 나타낸다. 가압장치만을 이용하여 가압할 경우 히터 용량의 한계 때문에 초기 가압(100→500 kPa)에 많은 시간이 걸린다. 이를 보완하기 위하여 초기 가압을 위해서는 외부에서 추가적으로 기체질소를 공급하고 작동압력에 도달한 후에 가압장치를 가동하여 작동압력을 유지하는 방식을 채택하였다. 그림 6에서 가압장치를 통하여 저온조의 압력이 작동압력인 500 kPa 부근으로 유지됨을 확인할 수 있다. 그림 7은 냉각시스템을 운전하는 동안 극저온 냉동기의 냉각부하의 변화를 나타낸다. 극저온 냉동기의 냉각부하는 극저온 열교환기의 입구, 출구 온도로부터 계산되었다. 냉동기의 초기 가동 시에는 4 kW 부근의 최대 부하를 나타내지만 저온조 액체질소의 온도가 낮아지면서 부하가 감소하여 정상상태에서 대략 880 W의 냉동부하를 나타내었다. 이는 초전도 한류기에 전류가 흐르지 않을 때의 저온조, 가압장치, 배관 등에서 발생하는 열부하로 초전도 한류기 냉각시스템 자체의 냉각부하를 나타낸다.

초전도 한류기 냉각시스템은 2014년 9월 말부터 2015년 1월말까지 약 4개월 동안 운전되었고, 그 사이 한류기에 대한 통전실험이 수행되었다. 4개월 동안 냉각시스템은 고창 전력시험센터의 선로변경으로 인한 전력 불안정 시기를 제외하면 안정적으로 운전되었다.

4. 맺음말

전력산업 융합원천기술 개발사업으로 한국전력 전력연구원(주관기관), 한국기계연구원, 한양대가 참여하여 154 kV, 2 kA급 단상

초전도 한류기를 고창 한국전력 전력시험센터에 구축하고 운전시험을 수행하였다. 운전시험을 통하여 개발된 과냉 액체질소 순환냉각 방식의 극저온 냉각시스템이 안정적으로 초전도 한류기의 작동온도와 압력을 유지할 수 있음을 보여주었다. 현재 2단계(2014년 ~ 2016년) 연구개발이 진행 중이며, 극저온 냉각시스템 부문에서는 시스템 크기와 제어/모니터링 시스템을 최적화하는 연구가 수행 중이다. 내년 초에는 최적화된 시스템으로 6개월 장기 운전시험을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] O. B. Hyun et al., "Domestic effects for SFCL Application and hybrid SFCL", Prog. Supercond. 10 60-67 (2008)
- [2] S. Eckroad, "Superconducting power equipment", Technology Watch 2012 1024190 (2012)
- [3] K. Nam et al., "Suppression of bubbles in subcooled liquid nitrogen under heat impulse", Cryogenics 47 442-449 (2007)
- [4] J. Ko et al., "Study on thermal response to instantaneous heat generation in LN2 chamber for HTS-FCL", IEEE T. Appl. Supercon. 23 5603204 (2013)
- [5] S. In et al., "Experimental study on vaporization of subcooled liquid nitrogen by instantaneous heat generation in LN2 chamber for HTS-FCL", IEEE T. Appl. Supercon. 25 3800204 (2015)
- [6] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants", Cryogenics 38 1063-1081 (1998)

저자이력



인세환(印世煥)
1996-2000년 연세대학교 기계전자공학부, 2000-2002년 KAIST 기계공학과, 2002-2010 KAIST 기계공학과, 2010-2013 삼성중공업 책임연구원
현재 한국기계연구원 선임연구원



홍용주(洪溶柱)
1986-1990년 고려대학교 기계공학과, 1990-1992년 고려대학교 기계공학과, 2002-2010년 고려대학교 기계공학과
현재 한국기계연구원 책임연구원



염한길(廉漢吉)
1986-1990년 인하대학교 항공공학과, 1990-1992년 인하대학교 항공공학과, 2004-2008년 인하대학교 기계공학과
현재 한국기계연구원 책임연구원



김희선(金喜宣)
2004-2008년 KAIST 기계공학과, 2008-2010년 KAIST 기계공학과
현재 한국전력 전력연구원 선임보연구원



김혜림(金蕙林)
1975-1979년 서울대학교 물리학과, 1979-1981년 Iowa State Univ. 물리학과, 1981-1991년 Cornell 물리학과
현재 한국전력 전력연구원 책임연구원