

초전도 케이블용 극저온 냉각시스템

김양훈¹, 양형석²
LS전선¹, 한전 전력연구원²

1. 서 론

최근 도심지 부하밀도 증가로 송전선로 대용량화가 요구되고 있고, 전력수요는 지속적으로 증가되고 있으나, 수도권 지역의 경우 변전소 부지 및 송전선 경과지 확보의 문제로 대책이 필요한 상황이다.

초전도도케이블은 송전손실을 기존 케이블의 50% 이상 저감할 수 있고, 또한 작은 단면적으로 큰 전류를 전송할 수 있기 때문에 낮은 전압으로 대전력 송전이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 기존 관로 및 전력구를 활용하여 토목 및 건설비용을 대폭 절감할 수 있는 장점이 있다.

이는 전력 공급의 안정화 및 경제적 측면에서의 이득, 그리고 초고압화에 의한 부지난 및 환경 문제 해결에 기여할 수 있다.

이러한 초전도케이블은 특정 온도영역에서만 초전도 현상을 갖는 초전도체가 핵심 구성요소로서 초전도체를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 반드시 냉각시스템이 수반되어야 한다. 기존에는 액체질소를 소비하는 감압방식의 냉각시스템을 개발하여 실증에 적용 운영되었지만, 잦은 액체질소 충전 및 정비로 인해 운영 편의성의 측면에서 다소 불편한 점이 있었다. 이러한 불편을 해결하고자 극저온 냉동기 방식의 냉각시스템이 필요한 상황이다.

본 기고에서는 극저온냉동기 방식 중 상용화 선로에 적합한 대용량, 고신뢰성 브레이튼 냉동기 개발 현황 및 향후 냉각시스템의 필요기술에 대해서 기술하고자 한다.

2. 초전도케이블 냉각 방식

현재 초전도케이블 시스템에 적용되고 있는 냉각 방식은 극저온냉동기 방식 (closed-loop) 과 감압시스템 방식 (open-loop)으로 구분될 수 있다.

감압시스템의 의한 냉각방식은 증발잠열을 이용하여 cryostat의 온도를 낮추는 방식이며, cryostat 내부에 위치한 열교환기에 의해 초전도케이블의 액체질소와 열교환을 하여 온도를 낮추게 된다. 이러한 감압시스템은 제작비용이 저렴하며, 구조가 간단한 장점이 있는 반면 감압에 의해 주기적인 액체질소 보충이 필요하고, 이에 따른 운영 비용이 증가하게 되며, 또한 정비 주기가 짧은 단점이 있다. 그림 1은 이천변전소에 설치되어 20개월 이상 운전되었던 감압방식의 냉각시스템이다. 이러한 감압시스템은 백업시스템으로 사용하기에 적합한 냉각 방식이다.

극저온냉동기에 의한 냉각방식은 기계적인 냉동기 (스털링냉동기 또는 브레이튼냉동기)를 사용하는 방식이다. 열역학적 냉동 사이클을 이용하여 냉매 (헬륨 또는 네온가스)를 극저온으로 냉각시켜, 초전도케이블의 액체질소와 열교환을 하여 온도를 낮추게 된다. 초기 cool-down을 제외하고는 액체질소 보충이 필요하지 않아 무인 변전소 운영이 가능하며, 고효율의 냉동기를 사용하는 경우 운영비용이 저렴하며, 또한 브레이튼냉동기를 사용하는 경우 잦은 정비가 필요 없고, 상대적으로 운전이 용이한 장점이 있다. 하지만 고장에 대비하여 백업시스템이 필요하다. 그림 2는 제주 초전도센터에 설치된 스텔링냉동기 방식의 냉각시스템이다.



그림 1. 감압 방식 냉각시스템 (이천변전소).



그림 2. 냉동기 방식 냉각시스템 (제주 초전도 센터).

3. 브레이튼냉동기 개발 현황

극저온냉동기를 초전도케이블 시스템에 적용하기 위해서는 대용량화가 가능해야 하며, 운전이 용이해야 하고, 신뢰성이 높아야 할 뿐만 아니라 정비 주기가 길어야 한다. 브레이튼냉동기는 스텔링냉동기에 비해 상대적으로 이러한 조건들을 만족하고 있어 초전도케이블 시스템 상용화 선로에 적용할 수 있는 적합한 냉동기라 할 수 있다.

브레이튼냉동기는 현재 전세계적으로 4개 업체에서 개발되고 있으며, 시제품을 초전도케이블 실증 선로에 적용 운영하는 계획을 추진하고 있다.

브레이튼냉동기는 그림 3과 같이 2개의 등압과정과 두개의 등엔트로피과정으로 이루어진다.

1-2 과정 : 냉매는 압축기에서 고온고압으로 압축됨

2-3 과정 : 고온고압으로 압축된 냉매는 after cooler를 통과하면서 냉각됨

3-4 과정 : after cooler에서 냉각된 냉매는 H/X#1을 통과하면서 온도가 내려감

4-5 과정 : 열교환기를 통과한 냉매는 팽창기를 통해 더욱 더 낮은 온도로 냉각됨

5-6 과정 : 팽창기를 통해 최저로 내려간 냉매는 H/X #2 를 통과하면서 초전도케이블 냉각을 위한 액체질소와 열교환을 통해 온도가 올라감 (액체질소는 과냉각됨)

6-1 과정 : H/X #2 를 온도가 올라간 냉매는 H/X #1 을 통과하면서 온도가 올라감

냉매로는 헬륨가스 또는 네온가스가 사용

되며, 이에 따라 압축기 및 팽창기 형태 및 크기, 냉매 운전압력이 결정된다. 압축기는 스크류 방식, 왕복동 방식, 터보 방식이 사용되며 현재는 고신뢰성 및 maintenance free를 위해 그림 4와 같이 마그네틱베어링을 채용한 터보 방식의 압축기를 사용하고 있는 추세이다. 그리고 효율을 향상 시키고자 압축기와 팽창기를 직접 연결하여 모터를 구동하는 방식을 적용하고 있다.

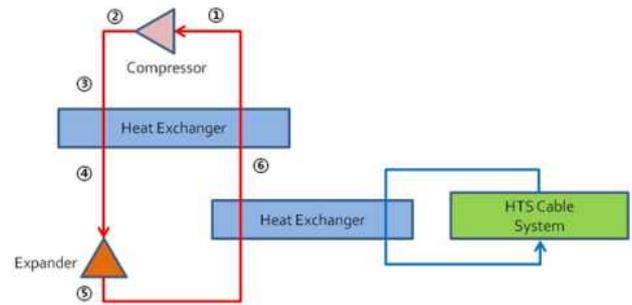


그림 3. 브레이튼냉동기 개요도.



그림 4. 압축기 임펠라 및 마그네틱베어링 (Air Liquid).

1) 한전 전력연구원

한전 전력연구원에서는 지식경제부 전력산업융합원천기술개발사업으로 2011년부터 10kW급 브레이튼냉동기를 개발하고 있으며 시제품 제작 중이다. 시제품은 제주 초전도 센터 내의 AC 154kV 초전도케이블 시스템 (선로 길이 1km)에 설치하여 실제통에 적용 운영할 예정이다.

냉매는 헬륨가스를 사용하며, 압축기는 왕복동 방식, 팽창기는 터보 방식을 적용하고 있다. 향후 고효율 터보방식의 압축기를 적용할 예정이다.

냉매인 헬륨가스는 액체질소 어는점 (약 63.15K) 보다 더 낮게 내려가며, 부하 변동에 따라 액체질소는 동결할 수 있다. 이로 인해 열교환기 성능이 저하되며, 결국 초전

극저온 냉동시스템 개발 현황

도케이블 시스템을 안정적으로 냉각할 수 없게 된다. 그림 5와 같이 액체질소가 동결되는 것을 방지하기 위해 2통로 교류 열교환기를 개발하였으며, 열교환기는 소형화, 고효율화를 위해 알루미늄 판-핀 (plate-fin) 형을 적용하였다.

팽창기는 가스베어링을 채용한 터보 방식이다. 상온상태에서 공기를 이용하여 팽창 성능을 평가하여 실제 운전 성능을 예측하였다. 그림 6은 팽창기 성능 평가 결과이다.

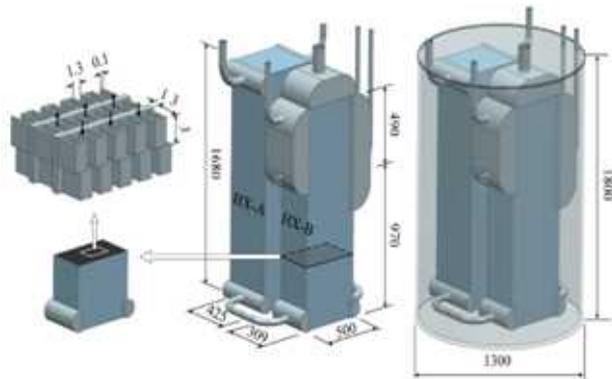


그림 5. 동결 방지 열교환기.

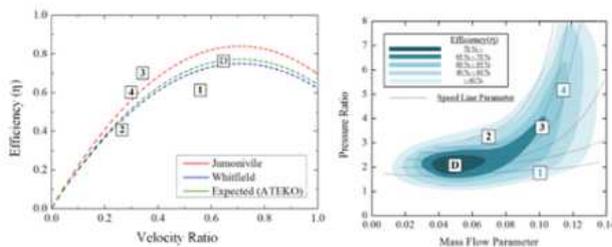


그림 6. 팽창기 성능 평가.

2) Taiyo Nippon Sanso Cooperation

2007년에 2kW급 브레이튼냉동기 시제품을 제작하였다. 네온가스를 냉매로 사용하였으며, 압축기는 왕복동 방식을 그리고 팽창기는 터보 방식을 각각 채용하였다. 냉각용량은 2kW @ 70K, 그리고 COP는 0.05의 성능을 가졌다. 왕복동 압축기를 사용하였기에 정비주기가 짧고, 설치면적이 크다는 단점이 있었다.

이후 마그네틱 베어링을 채용한 터보 압축기를 개발하였으며, 2010년에 사이클 해석을 통해 성능 개선을 하여 2.5kW @ 65K,

COP 0.06의 성능을 가진 양산에 근접한 브레이튼냉동기를 그림 7과 같이 개발하였다.

초전도 전력기기는 대용량을 요구하고 있기에 10kW급의 브레이튼냉동기를 개발하여, 2014년에 그림 8과 같이 시제품을 제작하였다. 2kW급 브레이튼냉동기는 압축기와 팽창기가 분리형이지만, 효율 및 신뢰성을 향상시키고자 압축기와 팽창기가 일체형인 Turbine-Compressor를 그림 9와 같이 개발하였다. 표 1은 10kW급 브레이튼냉동기 사양이다. 현재 개발시험을 완료하여 초전도 케이블 시스템에 적용하고자 계획하고 있다.

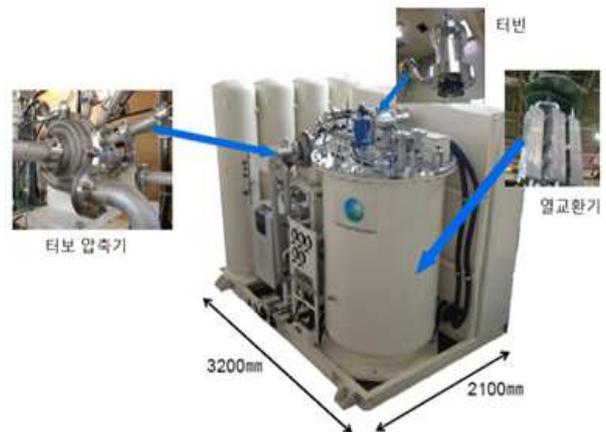


그림 7. 2kW급 브레이튼냉동기(TNSC).

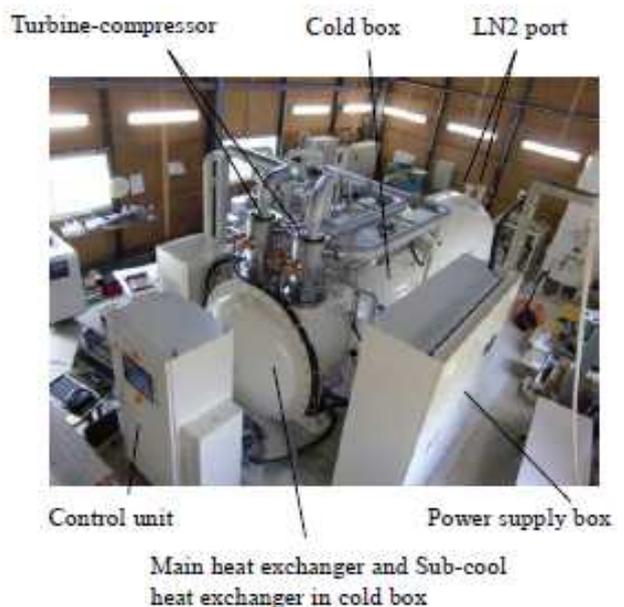


그림 8. 10kW급 브레이튼냉동기 (TNSC).

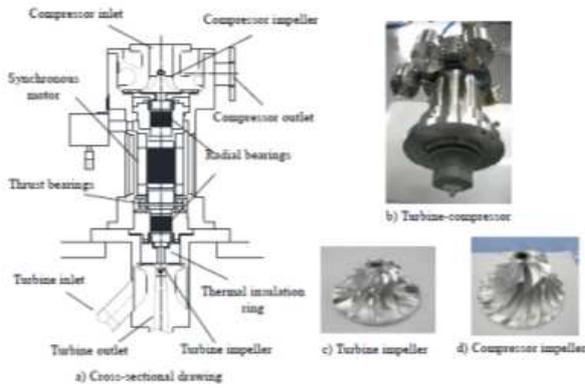


Fig. 3 Cross-sectional drawing and photograph of the turbine-compressor

그림 9. Turbine-Compressor.

표 1. 10kW급 브레이튼냉동기 사양.

Cooling temperature	70 K
Cooling capacity	10 kW
Process pressure	0.5 MPa / 1.0 MPa
Neon gas flow rate	0.96 kg/s
Input power	125 kW
COP	0.08

3) Air Liquid

Air Liquid는 2006년에 우주용 소용량 터보 브레이튼냉동기를 개발하였으며, 100,00 시간 이상 기동하였다. 초기 브레이튼냉동기는 오일방식의 스크류 압축기를 사용하였으나, 이후 마그네틱베어링을 채용한 터보 압축기 및 팽창기를 개발하였다. 또한 그림 10과 같이 팽창기와 압축기를 직접 연결하여 모터를 구동하는 방식을 적용하여 대용량, 고효율, maintenance free의 브레이튼냉동기 성능을 확보하고 있다. 냉각용량 조절은 모터의 회전수를 변경하여 가능하다. MTBF (Mean Time Between Failure)는 105,000시간, MTBM (Maintenance Time Between Maintenance)는 10년이다. 제품군은 TBF-80 (7.6k), TBF-175 (16.5kW), TBF-350 (50.8kW) 이다.

4) Mayekawa

Mayekawa는 5kW급 브레이튼냉동기 시제품을 제작하여 TEPCO network에 적용 운영할 예정이다. COP는 0.1, MTBM은

30,000 시간을 목표로 하고 있다. 냉매는 네온가스를 사용하며, 압축기 및 팽창기 모두 터보 방식을 적용하였다. 냉각용량은 회전수 및 압력에 의해 조절 가능하게끔 하였다. 그림 12는 브레이튼냉동기 개요도이며, 그림 13은 5kW급 시제품 사진이다.

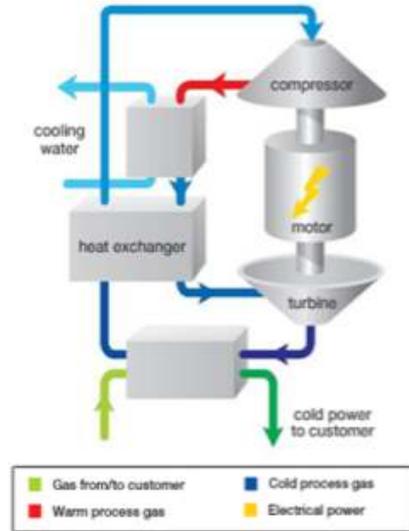


그림 10. 브레이튼냉동기 개요도 (AL).



그림 11. 5kW급 브레이튼냉동기 (AL).

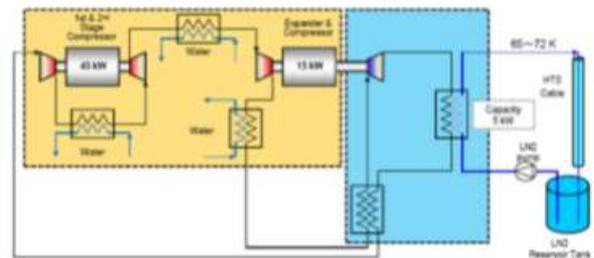


그림 12. 브레이튼냉동기 개요도 (Mayekawa).

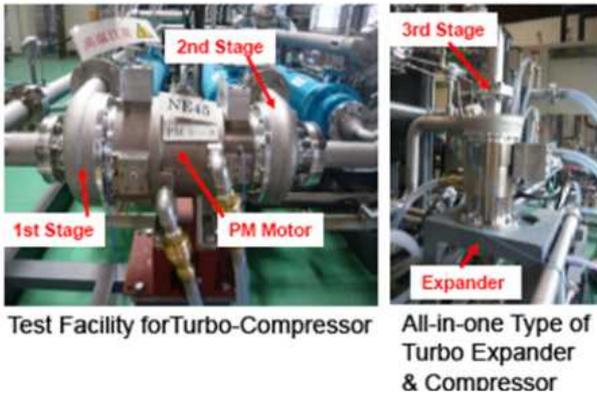


그림 13. 5kW급 브레이튼냉동기.

4. 향후 냉각시스템 필요 기술

초전도케이블 시스템의 상용화를 위해서는 대용량, 고신뢰성의 냉각시스템이 필수적이며, 다음과 같은 기술들이 개발되어야 한다.

첫째, 대용량 고효율 고신뢰성 브레이튼냉동기가 개발되어야 한다. 운전 비용 절감을 위해서는 30% Carnot 이상의 고효율 극저온 냉동기가 개발되어야 하며, 또한 MTBM이 최소 3년 이상 충족되어야 한다.

둘째, 냉각시스템 콤팩트화 및 신뢰성이 확보되어야 한다. 설치에 있어 제약이 없어야 하며, 현장에서 설치가 용이한 Plug & Play 방식을 적용해야 한다. 또한 고장 요소가 적어야 하며, 위험을 방지하기 위한 safety 및 고장 발생시 조치, 그리고 운영의 용이성을 위한 무인 운전 등을 고려해야 한다.

셋째, 수직구에서의 열유체/전기적으로 문제가 없는지 검증되어야 한다. 상용화 선로에서는 수직구가 존재할 수 있으며, 이러한 수직구에서의 액체질소 유동 특성, 초기 cool-down 및 과도 상태에서의 열유체/축력 및 전기적인 특성 등이 검증되어야 한다.

참고문헌

- [1] Yoshida. S., et al., "Development of neon refrigerator for HTS power machines", Proceedings of 23th International Cryogenic Engineering Conference (2010)
- [2] Chang H. M. et al., "Heat-Exchanger Design of 10kW Brayton Cryocooler for HTS Cable Application", Proceedings of ICEC 24-ICMC (2012)
- [3] <http://www.airliquideadvancedtechnologies.com>

저자이력



김양훈(金良勳)
1999년 제주대학교 기계공학과 석사
2005년 부산대학교 기계공학과 박사 수료
2005 ~ 현재 LS전선 초전도프로젝트팀 차장



양형석(梁炯皙)
2001년 Tsukuba대 졸업 (공학 박사, 극저온공학전공)
2001 ~ 2009 한국기초과학지원연구원 선임연구원
2009 ~ 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원