

고온 초전도 전력케이블의 냉각시스템 설계에 관한 연구

김대웅*, 양병모*, 윤형희*, 강지연*
한전전력연구원*

A Study on Cooling System Basic Design for HTS Power Cable

D.W Kim*, B.M Yang*, H.H Yoon*, J.W Kang*
KEPRI*

Abstract - 고온초전도 케이블은 초전도 상태를 유지하기 위해서 반드시 액체질소를 이용한 냉각시스템이 필요하다. 액체질소는 순환펌프에 의해 케이블의 유로를 순환하고 케이블을 냉각시키게 된다. 본 논문에서는 초전도 케이블의 냉각시스템의 기본 설계에 있어서 중요한 운전온도, 운전압력, 열부하에 대해서 고찰하였고, 현재 국내 초전도 케이블의 연구개발에 대해 고찰함으로써 향후 초전도 케이블이 실용화되기 위해 나아가야 할 방향에 대해 제시하였다.

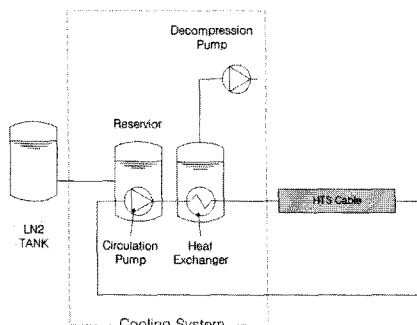
1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 단위면적당 흘릴 수 있는 전류밀도가 높은 초전도 선재를 사용하여 대전류를 흘릴 수 있어 케이블 시스템으로 구현시, 동일 포설구간에 최소 3배 이상의 용량을 가지는 미래형 전력수송 케이블이다. 고온 초전도체는 일정 온도 영역에서만 고유의 특성을 갖는 초전도 현상이 나타나기 때문에 초전도 케이블의 선재를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 반드시 냉각 시스템이 필요하게 된다.^[1,2] 본 연구에서는 고온 초전도 케이블의 냉각시스템의 기본적인 설계 개념과 현재 국내에서 연구, 개발되고 있는 고온 초전도 케이블의 냉각시스템에 대해 고찰하고 향후 나아가야 할 방향에 대해 제시하고자 한다.

2. 본 론

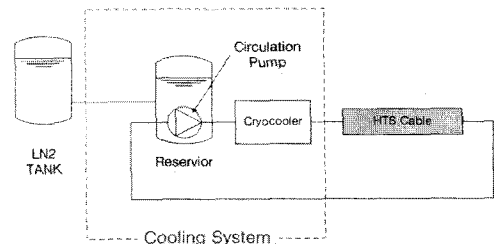
2.1 초전도 케이블의 냉각시스템

초전도체를 냉각시키는 냉각방식은 크게 액체헬륨이나 액체질소 등을 이용하는 액체 냉각방식(liquid cooling)과 냉동기로 직접 냉각하는 전도 냉각방식(conduction cooling)으로 나눌 수 있다. 액체 냉각방식은 저온의 액체를 순환시켜 냉각하는 방식으로 열적 안정성(thermal stability)이 우수하다. 즉 초전도 시스템의 열적 교란에 의한 발열이 있을 때 초전도 도체 표면에서 저온 액체의 비등(boiling)을 동반한 열전달이 이루어지므로, 단위 면적당 열전달이 매우 크고, 일정한 압력 하에서는 액체의 온도로 일정하게 유지된다.^[3] 반면, 저온 액체의 저장이나 이송에 따른 열손실이 존재하고, 저온 액체용기에 대한 전문 인력이 필요 없으며, 또한 액체의 저온이나 순환에 따른 열손실을 줄일 수 있고, 시스템의 소형, 경량화가 가능하며, 설치 위치나 각도에 있어서도 유연한 구성을 할 수 있는 등 여러 가지의 장점을 가지고 있지만 액체 냉각방식에 비해 열적 안정성이 떨어진다. 즉, 액체 냉각방식의 경우 냉각되는 초전도 도체의 주위 온도는 기본적으로 액체의 포화 온도로 일정한 반면에, 극저온 냉동기의 온도는 부하에 따라 크게 변화할 수 있어 열적 안정성이 극저온 냉동기의 냉동 특성과 초전도 도체의 발열 특성에 좌우된다.^[4] 따라서 일반적으로 초전도 케이블은 대용량의 안정적인 냉각능력 확보를 위해 액체 냉각방식을 적용하고 있다.



<그림 1> 감압식 냉각시스템(open type)

그림 1은 초전도 케이블의 냉각시스템 중 감압식 냉각시스템을 간단하게 나타낸 그림으로 액체질소 탱크를 통해 저장용기로 들어간 액체질소는 순환펌프에 의해 케이블 유로를 순환하게 된다. 케이블 유로를 순환하는 액체질소는 케이블을 충분히 냉각시켜야 하기 때문에 케이블로 유입되기 전에 감압식 냉각시스템을 통해 액체질소는 냉각되게 된다. 이 감압식 냉각시스템은 액체질소가 채워져 있는 용기의 압력을 감압펌프에 의해 낮추게 되고 이로 인해 이 액체질소는 대기압에서의 액체질소보다 낮은 온도인 과냉각 액체질소 상태가 되고, 케이블 유로를 순환하는 액체질소는 이 과냉각 액체질소와의 열교환을 통해 충분히 냉각되게 된다. 따라서 열교환을 통해 냉각된 액체질소는 케이블로 들어가 케이블을 충분히 냉각시킨 후 다시 저장용기로 순환되는 구조의 시스템이다.



<그림 2> 극저온냉동기 냉각시스템(closed type)

그림 2는 초전도 케이블의 냉각시스템 중 극저온냉동기를 사용한 냉각시스템을 나타낸 그림이다. 이 극저온냉동기 냉각시스템과 감압식 냉각시스템의 차이는 케이블 유로를 순환하는 액체질소의 냉각을 감압시스템 대신 극저온냉동기의 쿨드 헤드들 통해 액체질소를 냉각시키고 케이블을 냉각시킨 후 저장용기로 되돌아오는 구조를 가지고 있다.

고온초전도 전력케이블의 상용화를 위해서는 빈번히 액체질소를 충전해야 하는 감압식 냉각시스템 보다는 극저온냉동기를 이용한 냉각시스템의 방식이 요구된다.

2.2 초전도 케이블 냉각시스템의 기본 설계 이론

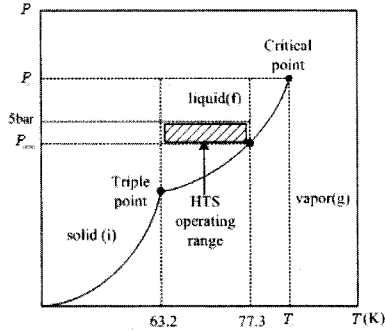
초전도 전력케이블은 선재가 초전도상태로 유지할 수 있도록 적절한 저온상태로 유지되어야 하며, 경제적으로 저온을 유지하기 위하여 외부에서의 열침입을 최소화할 수 있도록 설계되어야 한다. 고온 초전도 전력케이블의 경제적 측면에서 가장 중요한 요소는 고온 초전도 선재의 가격과 냉각시스템의 경제성이라 할 수 있다. 고온초전도 케이블 냉각시스템의 설계에서 가장 중요하다고 할 수 있는 요소로 운전온도, 운전압력, 열부하가 있다.

먼저 운전온도로는 시스템의 안정성과 경제성을 고려하여 최적의 운전온도 영역을 선택하는 것이 중요하다. 운전온도는 액체질소의 삼중점(triple-point) 즉, 어는점의 온도가 1기압에서 63.2 K의 온도보다 낮은 온도선택을 피하고, 액체질소의 비등점(boiling point) 즉, 끓는점의 온도가 1기압에서 77.3 K로 이 온도보다 높은 온도선택을 피해야 한다.

운전압력은 고온초전도 케이블의 냉각을 위하여 냉매가 케이블 내의 유로를 순환할 때 압력손실이 일어나며 이를 고려하여 적절한 크기의 압력을 선택해야 한다. 또한 케이블 유로를 순환하는 액체질소의 압력이 낮으면 액체질소가 증발하여 케이블의 절연성능을 저하시키기 때문에 순환하는 액체질소의 증발을 방지하기 위해 일정압력을 유지시키는 것이 중요하다.

냉각시스템의 설계에서 높은 단열성능의 유지는 가장 중요하다. 단열성능이 좋지 않을 경우, 액체질소의 증발량이 커지게 되고, 이로 인해 냉동능력이 큰 냉동기를 사용해야 하므로 초기비용과 운전비용이 증가하게 된다. 고온에서 저온으로의 열부하 또는, 열침입의 형태는 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)의 형태가 존재한다. 전도에 의한 열침입을 최소화하기 위해 침입경로의 단면적을 최대한 줄이고, 열의 이동 경로를 길게 해야 하며, 대류에 의한 열침입을 최소화하기 위해서는 기체 분자를 제거하여 진공층(진공도 10⁻⁴ torr이하)을 씌으로써 해결 할 수 있으며, 복사에 의한 열침입을 최소화하기 위해서는 다층 단열재(MLI,

Multi-Layer Insulation)를 저온용기 외부에 여러 층 감아주면 된다. 따라서 액체질소의 증발을 막기 위해 고온에서 저온으로의 외부 열침입을 최소화할 수 있도록 설계해야 한다.

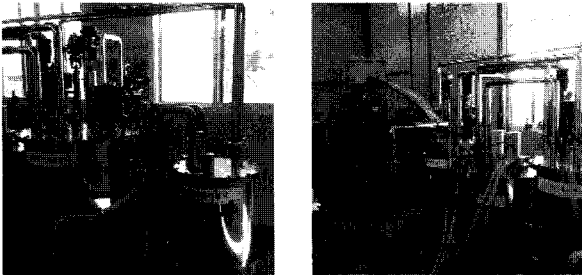


<그림 3> 고온초전도 케이블 운전범위

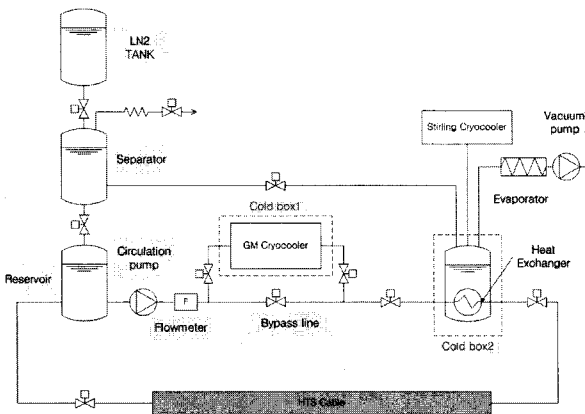
그림 3은 고온초전도 케이블의 운전범위를 액체질소의 압력-온도 선도에 나타난 그림이다. 고온초전도 케이블을 최적화된 상태로 운전하기 위해서 액체질소의 운전온도와 운전압력을 적절한 조건으로 순환시켜야 하고, 열부하 변동 등에 대해 안정적으로 냉각할 수 있어야 한다. 또한 시스템의 상태를 감시하고 자동제어를 할 수 있는 신뢰성 있는 냉각시스템을 구축하여야 한다. 그리고 고온초전도 케이블 시스템의 운용시 발생할 수 있는 사고전류, over current, 냉동기/펌프 정지, 밸브 오작동, 단열손실 증가 등 여러 가지 비정상 상황 및 사고의 발생시 신속하게 감지하고 대처할 수 있도록 안전기구 및 대응방안을 갖추어야 한다.

2.3 초전도 케이블의 국내 연구 현황

국내에서는 초전도 케이블 시스템의 실계통 적용을 위한 실증 시험을 위해 전북 고창에 위치한 한전전력시험장에서 한전과 LS전선이 각각 연구 과제를 수행하고 있다. 한전은 22.9 kV, 100 m, 3상 1cryostat 고온초전도 전력케이블(일본 ; sumitomo)을 설치하였고, 냉각시스템으로는 감압식 냉각시스템을 사용하였다. LS전선은 22.9 kV, 100 m, 3상 1cryostat 고온초전도 전력케이블(LS전선)을 설치하였고, 냉각시스템으로는 극저온 냉동기 냉각시스템을 사용하였으며, 냉동기 고장 및 점검을 위한 back up 시스템으로 감압식 냉각시스템을 사용하였다. 그림 4는 전북 고창에 위치한 한전전력시험장에 설치되어 있는 LS전선의 초전도 전력케이블 냉각시스템을 나타낸 그림이고, 그림 5는 전체냉각시스템의 구성도를 나타낸 그림이다.



<그림 4> 초전도 전력케이블 냉각시스템(LS전선)



<그림 5> 초전도 전력케이블 냉각시스템의 전체 구성도

이러한 국내의 초전도 케이블의 꾸준한 연구와 노력의 결과로 실용화 직전 단계인 실계통 시험을 할 수 있는 연구 성과를 이루었고, 이는 케이블 기술 수준이나 개발 상황이 미국, 일본 등과 동등한 수준까지 이르게 되었음을 의미한다.

3. 결 론

고온초전도 전력케이블의 극저온 냉각시스템은 액체질소를 과냉각시켜 순환하므로써 초전도 케이블을 초전도 상태로 유지시키는 시스템으로 본 연구에서는 초전도 케이블을 냉각시키는 냉각시스템의 종류와 냉각시스템을 설계하는데 있어서 기본적으로 중요한 요소들에 대한 고찰을 통해 최적화 상태의 운전을 하기위한 방향을 제시하였다. 현재 국내에서는 꾸준한 연구 개발의 결과로 케이블 기술 수준이나 개발 상황은 미국, 일본 등과 거의 동등한 수준까지 와 있다. 따라서 초전도 케이블이 상용화로 가기 위해서 가장 필요한 것은 냉각시스템의 가격을 낮추고 효율을 증대시켜야 하고, 유지/보수 및 냉각시스템의 신뢰성이 확보되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. M. Wolsky, "Cooling for Future Power Sector Equipment Incorporating Ceramic Superconductors", IEA Report, 2002
- [2] Randall F. Barron, "Cryogenic System", Oxford University Press, 1985
- [3] Cryogenic Association of Japan, 1994, Hand-book of Superconductivity and cryogenics, p.318.
- [4] Hiroyasu Ogiwara, 1999, An Introduction to Cryogenics, pp.257-258.