HTS변압기의 액체질소 과냉을 위한 구리판의 설계

최연석, 장호명, Steven W. Van Sciver
미국 Florida 주립대학교, 국립 고자장 연구소

Design of Copper Sheets to Subcool Liquid Nitrogen in HTS Transformer

Yeon Suk Choi, Ho-Myung Chang, Steven W. Van Sciver
National High Magnetic Field Laboratory/Florida State University

ychoi@magnet.fsu.edu

Abstract - In our newly proposed cryogenic systems for HTS transformer, liquid nitrogen is subcooled by copper sheets extended from coldhead of cryocooler. Since the shape of copper sheets has been given by the shape of HTS windings and electrical restriction, the thickness of copper sheets is the main parameter to determine operating temperature in HTS windings. Temperature distributions between windings and coldhead are investigated by heat transfer analysis, from which the thickness of copper sheets to maintain every part of windings below 66 K is calculated. The effects of the amount of AC loss on the temperature distributions in cooling system are also presented.

1. 서 론

기존의 변압기에 비해 고온 초전도 변압기는 소형화가 가능하고, 과부하 운전 시에도 운전효율을 높일 수 있으며, 절연유를 사용하지 않기 때문에 안전하며 환경오염을 줄일 수 있다. 이러한 장점들 때문에 전세계적으로 고온 초전도 변압기에 대한 연구가 진행되고 있으며, 고온 초전도 변압기에 대한 가능성 평가[1]는 이를 더욱 가속화시키고 있다. 미국 국립 고자장 연구소(National High Magnetic Field Laboratory)에서는 고온 초전도 변압기용 냉각장치설계를 위한 한-미 공동연구가 진행되고 있다. 소형화 및 고효율화에 적합한 냉각장치 설계를 위한 첫 단계로 열역학적 관점에서 최적의 운전온도를 찾는 이론을 제시하였다[2,3]. 이 결과를 근거로 과냉 액체질소의 자연대류를 이용하여 63~66 K에서 운전하는 새로운 개념의 고온 초전도 변압기용 냉각장치를 제안하였다[4].

Fig. 1은 제안된 과냉 액체질소의 자연대류를 이용한 고온 초전도 변압기용 냉각장치의 개략도이다. 초전도 권선부는 상부에 위치한 밀폐형 냉동기에 수직방향으로 연결된 구리판에 의해 냉각되는 액체질소 용기에 잠겨있다. 초전도 권선 에서 교류손실에 의해 발생한 열은 액체질소의 자연대류에 의해 수직구리판으로 전달된 후, 수직구리판과 수평구리판의 열전도를 통해 냉동기로 전달된다. 초전도 권선과 구리판 사이의 액체질소는 열을 전달하는 매체이며 동시에 전기적 절연체로 사용된다.

고온 초전도 변압기내의 구리판 형상은 전기적 절연문제 및 초전도 권선의 형상에 의해 결정된다[5]. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 수직 구리판은 초전도 권선부의 외부에만 설치되며, 권선부 표면으로부터 반경방향으로 약 70 mm 떨어져 있다. 수직 구리판은 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 와전류(eddy current) 발생을 최소화시키기 위하여 원주 방향의 폭이 약 40 mm인 48개의 판들로 구성된다. 수평 구리판 또한 와전류

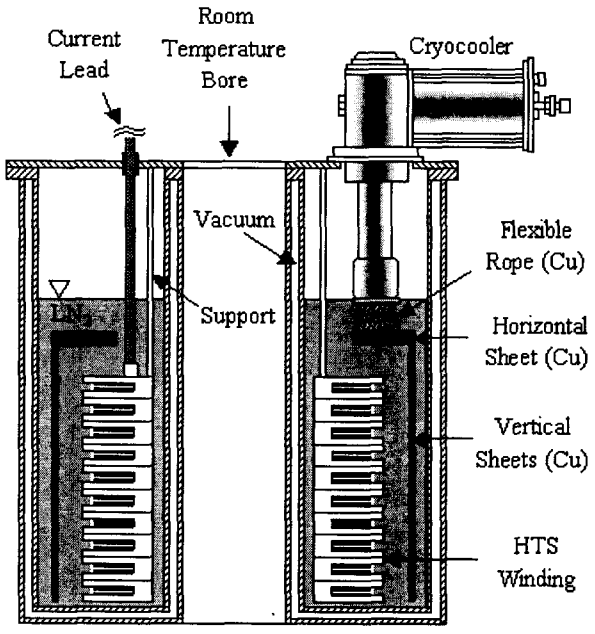

Fig. 1. Schematic configuration of cooling ststem for HTS transformer

발생을 최소화시키기 위하여 초전도 권선보다 약 200 mm 높은 곳에 위치하며 Fig. 2에서 보는 바

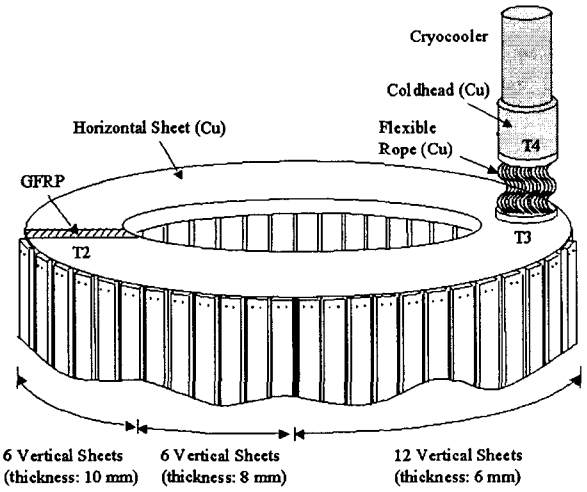

Fig. 2. Schematic configuration of copper sheets assembly

와 같이 중앙에 상온의 철심이 통과하기 위한 공간이 있다. 따라서 초전도 권선부의 운전온도를 63~66 K 로 유지하기 위해서는 구리판의 두께를 적절히 선정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 고온 초전도 변압기의 액체질소 과냉을 위한 구리판 및 권선부에서 냉동기까지 온도분포에 대한 열전달 해석을 수행하여, 이 결과를 이용하여 초전도 권선부가 63~66 K를 유지할 수 있는 구리판 두께에 대한 설계를 시도하였다. 구리판의 두께 및 교류손실이 권선부에서 냉동기까지 온도분포에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구의 결과는 유사한 액체냉각형 고온 초전도 시스템 설계에 또한 유용하게 사용될 것이다.

2. 열전달 해석

고온 초전도 변압기용 냉각장치에는 교류손실에 의한 발열 때문에 초전도 권선부와 같은 고온부와 냉동기와 같은 저온부가 존재한다. Fig. 1, 2에서 보는 바와 같이, 초전도 권선부는 냉동기로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 이들 사이에 위치한 수평구리판 에서는 원주 방향으로, 수직구리판 에서는 축(또는 길이)방향으로 온도구배가 발생한다.

초전도 권선부와 수직구리판의 축 방향 온도분포는 1차 에너지 균형 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 초전도 권선의 하부(T_1)와 수직구리판 상부(T_2) 사이의 온도차는 축방향으로 분포된 냉동부하와 액체질소를 통한 대류, 그리고 구리판의 전도에 의해 결정된다[4].

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{2kA}\left[\left(H + \frac{3k\,\delta_V}{hH}\right) Q_{ac} + H^2 Q'_r\right] \quad (1)$$

Q_{ac}는 교류손실이며, Q'_r는 저온용기 벽의 축방향 단위길이 당 복사열전달이다. A, H, δ_V 는 각각 수직구리판의 단면적, 초전도 권선부의 높이, 그리고 수직구리판의 두께이다.

수직구리판 상부와 수평구리판 저온부(T_3)사이의 온도차는 1차원 열전도 방정식을 이용하면 구할 수 있다.

$$T_2 - T_3 = \frac{Q'_c}{2kw\,\delta_H} l^2 \quad (2)$$

여기서 w, δ_H, l은 각각 수평구리판의 반경방향 폭, 축방향 두께, 그리고 원주방향의 길이를 의미한다. 식(2)에서 Q'_c는 원주방향으로 균일하게 분배된 단위길이 당 전달열로서 교류손실, 복사열전달, 전도열전달, 전류도입선의 합을 원주길이로 나눈 값으로 간주한다.

$$Q'_c = \frac{Q_{ac} + Q_r + Q_k + Q_l}{l} \quad (3)$$

유연한 구리로프는 수평구리판과 냉동기를 연결하는데, 이는 초기 냉각(cool-down)시 발생하는 열 수축을 수용하기 위한 목적으로 사용된다. 수평구리판 저온부(T_3)와 냉동기의 냉동부(Coldhead)(T_4) 사이의 온도차는 유연한 구리로프의 열전도와 구리로프 양 끝단에서의 접촉열전달에 의해 구한다.

$$T_3 - T_4 \approx \frac{Q_c}{\frac{kA}{L} + 2\,h_c A} \quad (4)$$

여기서 h_c는 접촉 열전달 계수이며 접촉면의 조도 및 수직 압력에 좌우된다[6]. 식(4)에서의 면적 및 길이는 구리로프의 유효면적 및 유효길이를 사용한다.

3. 설계결과 및 토의

초전도 권선부와 냉동기 사이의 온도분포를 계산하기 위하여 사용한 각종 자료가 Table 1에 나타나있다. 냉각손실양은 기존의 결과[4]를 인용하였다.

교류손실(91 W)을 포함하여 총 냉동부하가 170 W, 수직구리판의 두께가 10 mm, 수평구리판의 두께가 30 mm 일 때, 냉동기에서 초전도 권선부까지 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 수평구리판의 온도분포는 균일하게 전달되는 교류손실에 의한 발열에 의해 위로 볼록한 형상이다. 과냉 액체질소의 자연대류에 의한 권선부와 수직구리판 사이의 온도차는 약 1.5 K 이다. 수직구리판의 상부와 하부사이의 온도차는 약 2 K 인데, 이 온도차는 수직구리판의 두께에 의존한다. 고온 초전도 변압기내 결빙 부분을 최소화시키고, 동시에 냉각시스템의 무게를 줄이기 위해 6 mm, 8mm 두께의 수직구리판을 10mm

Table 1. Given data for design of copper sheets in LN_2 subcooled HTS transformer

Thermal conductivity of copper		630 W/(m-K)
Heat transfer coeff. between copper sheet and HTS winding		84 W/(m^2-K)
HTS Windings	Inner Diameter	410 mm
	Outer Diameter	650 mm
	Height	480 mm
Cooling Loads	Conduction	19 W
	Radiation	42 W
	Current Leads	18 W
	AC loss	91W(61-151W)
	Total	170W(140-230W)

Table 2. Summary of copper sheets design in LN_2 subcooled HTS transformer

Operating Temperature	Coldhead	44 K
	Horizontal Sheet	63 K
	Bottom of Winding	66 K
Vertical Sheets	Material	Copper
	Width/Height	43/680 mm
	Thickness	6/8/10 mm
	Number of Sheets	24/12/12
Horizontal Sheet	Material	Copper
	Thickness	30 mm
	Inner/Outer Dia.	530/790 mm

두께의 수직구리판 대신에 냉동기 가까운 부분에 사용하기록 설계 하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 냉동기에 가까운 곳부터 6 mm 두께를 갖는 구리판 24개, 8 mm 두께를 갖는 구리판 12개, 10 mm 두께를 갖는 구리판 12개를 차례로 수평구리판의 옆면에 설치한다. 구리판의 두께가 달라지는 곳에서는 온도분포가 불연속하며, 구리판의 두께가 얇아질수록 온도는 증가한다. 6 mm 두께를 갖는 수직구리판 부위의 초전도 권선부 온도는 액체질소의 결빙으로 인하여 열전달계수가 감소하게 되어 약간의 온도상승이 예측된다. 6/8/10 mm 두께의 수직구리판과 30 mm 두께의 수평구리판은 초전도 권선부의 온도를 66 K 이하로 잘 유지시켜준다. 본 연구에서의 구리판 설계의 결과를 Table 2에 정리하였다.

현재 고온 초전도 변압기내에서 발생하는 냉각손실 중 가장 불확실한 양은 초전도 권선에서의 교류손실이다. 앞에서 제시한 교류손실양은 Bi-2223/Ag선재의 단위길이 당 손실이 0.75 W/(kA-m) 라는 모델[1]을 근거로 하였다. 교

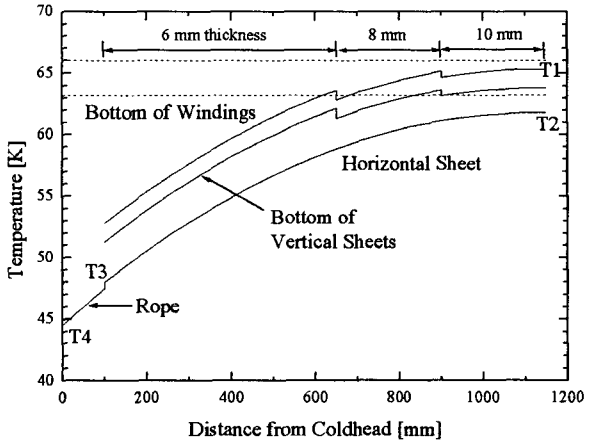

Fig. 3. Temperature distributions from coldhead to HTS windings (Q_{ac}=91W)

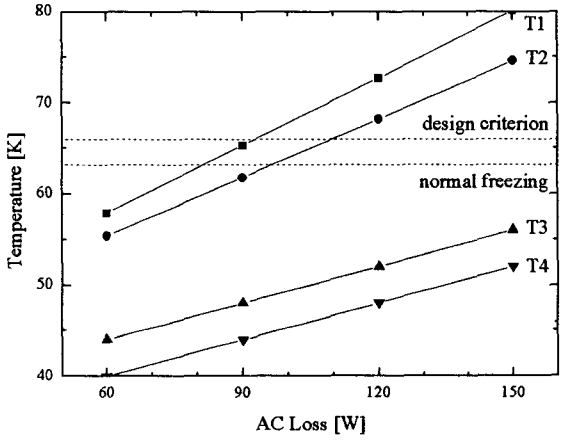

Fig. 4. Effect of AC loss on temperature distributions

류손실양은 자기장의 방향에 크게 좌우되므로, 초전도 권선의 설계에 따라 그 값이 크게 달라진다. 따라서 본 연구에서는 교류손실을 0.5 W/(kA-m)에서 1.25 W/(kA-m) 까지 변화시켰다. Fig. 4는 수직구리판의 두께를 6/8/10 mm, 수평구리판의 두께를 30 mm로 고정시켰을 때, 교류손실양이 온도분포에 미치는 영향을 보여준다. 교류손실이 증가할수록 앞에서 설명된 각 위치에서의 온도는 증가한다. 교류손실양이 90 W 일 때, 초전도 권선 하부(T1)의 온도는 72 K가 되고, 이는 본 연구에서의 목표 운전온도보다 6 K 높다. 교류손실양이 150 W 가 되면 초전도 권선 하부의 온도는 질소의 증발온도를 넘게되어 냉각장치내에서는 기포(bubble)가 생기게 된다. 운전온도를 낮추고 기포가 생기지 않게 하기 위해서는 좀 더 두꺼운 구리판이 필요하다.

Fig. 5는 교류손실이 150 W인 경우, 8/10/12 mm 두께의 수직구리판, 55 mm 두께의 수평구리판을 사용하였을 때 냉동기에서 권선부까지의 온도분포를 보여주고 있다. 초전도 권선부와 수직구리판 사이의 온도차는 약 1.5 K 이며, 수직구리판 상부와 하부사이의 온도차는 약 2.2 K 이다. 교류손실에 의한 발열이 증가했지만 두꺼운 구리판을 사용함으로서 온도차이를 교류손실이 90 W 인 경우와 유사하게 유지할

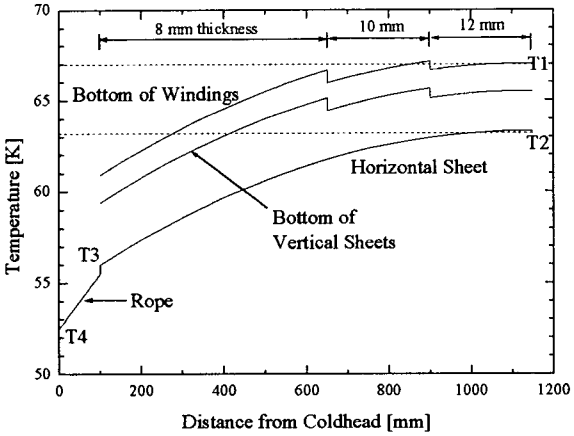

Fig. 5. Temperature distributions from coldhead to HTS windings (Q_{ac}=150 W)

수 있을 것이다. 수직구리판 상부와 수평구리판 저온부 사이의 온도차는 약 2배 두꺼운 수평구리판을 사용하여 6 K 이내로 유지할 수 있다. 구리판의 두께를 늘리면 온도차이를 줄일 수 있다. 하지만 두께가 어느 이상 두꺼워지면, 더 이상 두꺼워져도 온도차이를 줄이는 효과는 미비하다. 따라서 교류손실이 150 W 일때, 냉각장치가 필요이상으로 무거워 지는 것을 방지하기 위해 초전도 권선부의 최고온도를 67 K로 설계하였다.

교류손실이 150 W 이상 되면, 더 두꺼운 구리판을 사용하기 보다는 초전도 권선부의 최고온도를 조금 더 높게(예를 들면 70 K) 설계하는 것이 타당할 것이다. 초전도 권선부의 최고온도를 66 K 이하로 유지하고자 한다면, 냉동기를 추가 설치해야 한다.

Fig. 3과 Fig. 5에서, 냉동기에서 가까운 초전도 권선부와 수직구리판 사이의 액체질소는 결빙되는 것을 볼 수 있다. 전기적으로 액체질소는 우수한 절연체이므로 질소의 결빙으로 물성이 크게 변하지 않는 한, 질소의 결빙은 전기절연에 문제가 없을 것이다. 열적으로보면, 액체질소가 결빙되면 열전달계수가 감소하고, 따라서 온도가 상승한다. 온도가 상승하면 결빙된 질소는 다시 녹게되어, 이 시스템은 열적으로 안정된 시스템이다.

4. 결 론

본 연구에서는 액체질소 과냉을 이용하여 1 MVA 고온 초전도 변압기의 권선부 작동온도를 66 K 이하로 유지할 수 있는 구리판을 설계하였다. 구리판의 두께는 열전달 해석을 이용하여 얻어진 냉동기와 권선부 사이의 온도분포를 이용하여 구하였다. 구리판의 두께는 냉동손실 중 교류손실양에 크게 좌우된다. 교류손실이 증가하면 초전도 권선부의 작동온도를 낮추기 위해서는 더 두꺼운 구리판이 필요하다. 하지만 두께가 어느이상 두꺼워지면, 온도를 낮추는 효과는 미비한 반면에 냉각장치는 필요이상으로 무거워진다. 교류손실이 두 배 이상 증가하면 권선부의 작동온도를 조금 높게 설계하든지 아니면 냉동기를 추가 설치해야 한다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단과 미국 선진 전력시스템 연구센터 (CAPS; Center for Advanced Power System)의 지원에 의한 한-미 국제 공동연구로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Wolsky, "Cooling for future power sector equipment incoporating ceramic superconductors", Argonne Nat. Lab. Report, No.2002-1, April 2002 (http://www.iea.org/tesh/econd/scond.html)

[2] Chang HM, Choi YS, Van Sciver SW, "Optimization of operating temperature in cryocooled HTS magnets for compactness and efficiency", Cryogenics, Vol.42, No.12, pp.787-794, 2002

[3] Chang HM, Choi YS, Van Sciver SW, Baldwin TL, "Cryogenic cooling temperature of HTS transformer for compactness and efficiency", ASC, August 2002, Paper #2LG04

[4] Chang HM, Choi YS, Van Sciver SW, Choi KD, "Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen", Cryogenics (Submitted for Publication)

[5] Kim WS, et al., "Design of a 1 MVA HTS transformer with double pancake windings", Korea-Japan Joint Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, November 2002

[6] Van Sciver SW, et al. "Thermal and electrical contact conductance between metals at low temperatures", Proceedings of the space cryogenic workshop edited by Klipping I, pp 37-48, 1984