

고온초전도 계자코일의 설계 및 제작

백송규, 장현만, 고락길, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식*
 한국전기연구소 초전도응용연구그룹, 국립창원대학교*

Design and Fabrication of High-Tc Superconducting Field coils

S.K. Baik, H.M. Jang, R.K. Ko, M.H. Sohn, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, Y.S. Jo*
 Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon National University*

Abstract - Superconducting racetrack coils are used in areas of generators, motors, wiggler magnets and so on. Especially now a days many advanced nations including U.S., Japan are developing high temperature superconducting(HTS) wire which has better performance than low temperature superconducting(LTS) wire. Most of HTS wires such as Bi-2223 are manufactured with PIT(Power In Tube Method) process, so the shape of the wire looks like tape different from LTS wire of round shape as normal conductors. Generally HTS racetrack coils are composed of a few partial double-pancake colis and then the double-pancakes are jointed each other according to their applications.

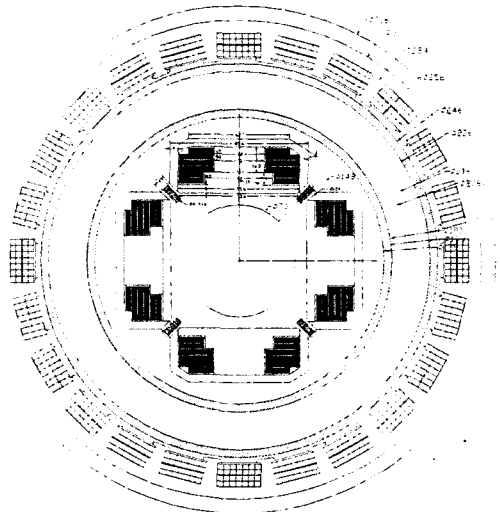


그림 1 5kW 급 고온초전도발전기 단면(mm단위)

1. 서 론

시험용 소용량 고온초전도발전기에 사용되는 레이스트랙(Racetrack)형의 계자코일을 설계 및 제작하는 과정을 설명하고자 한다. 각각의 레이스트랙형 계자코일은 고온초전도 선재가 저온초전도 선재와는 달리 테이프 형태를 띠므로 권선기에서 Joint 없이 한번에 권선하는 것보다 부분의 더블팬케이크(Double-pancake) 코일들을 먼저 제작한 후, 각각의 더블팬케이크를 접합하도록 구성이 된다. 본 논문에서는 이러한 레이스트랙형의 계자코일을 3개의 더블팬케이크를 이용하여 제작하였고, 각각의 더블팬케이크는 고온초전도 테이프를 Lap-joint 방식을 통하여 연결하였다. 또한 코일이 감겨지는 보빈의 제작과정과 권선방법 등도 소개하고자 한다.

제작하고자하는 고온초전도발전기의 재원을 표 1에 나타낸다. 발전기의 용량은 5kW로 설계되었고, 1800 rpm 의 4극 레이스트랙으로 구성이 된다. 발전기 내부의 횡단면 배치를 그림 1에 보인다. 그림에서와 같이 최내층은 지름 70mm 의 빈 공간을 두어 계자코일 냉각을 위한 장치들이 들어갈 수 있도록 하였고, 최외층의 기계실드를 제외하고는 모두 비자성재료로 이루어진다. 특히 설계시에 발전기의 과도상태 동작시 발생할 수 있는 비동기자계에 의한 계자코일의 켄치를 막는 역할을 하는 댐퍼를 극저온용기 내측에 배치하여 그 동작온도를 낮추므로 상온에 배치할 때보다 훨씬 더 높은 도전율을 갖도록 하였다. 이에 따라 구리원통으로 제작하는 댐퍼의 두께를 줄일 수 있었다(2).

2. 본 론

2.1 고온초전도 발전기의 설계

고온초전도발전기의 설계 방법은 기본적으로 그 전자기적 이론 및 내부 배치 방법은 동일하나 고온초전도 테이프를 더블팬케이크 방식으로 배치할 경우 계자코일의 단면형상을 직사각형에서 변형할 수 있는 장점이 있어서, 그림 1에서와 같이 이론상의 계자코일 배치선에 근접하게 코일을 배치시킬 수 있는 장점이 있으며 공실형의 레이스트랙코일의 양단부에서 자장의 집중현상을 다소 완화할 수 있으므로 초전도코일의 자장에 의한 영향을 줄일 수 있다(1).

고온초전도 계자코일의 동작온도는 20~30K에서 운전하도록 설계하였고, 이때의 동작전류는 55A 이며 사용하고자는 초전도 테이프의 동작전류밀도는 101.85A/mm² 로 하여 계자코일의 점적율이 60%가 될 수 있도록 하였다. 그림 1에서와 같이 최외층 기계실드의 바로 내측에 배치되는 전기자코일은 상전도코일로서 동작전류밀도는 3A/mm² 이며 이는 공기냉각이 가능한 값으로서 Y결선의 전철선으로 24개의 슬롯에 배치된다(3).

표 1 고온초전도발전기 재원

회전속도	1800 [rpm]
역전압	220[V]
극수	4
주파수	60[Hz]
역률	0.9

2.2 고온초전도 계자코일의 구조

계자코일 제작을 위해 사용되는 선재는 NST(Nordic Superconductor Technologies)에서 제작된 Bi(Pb)-2223 의 테이프형 선재로 77K, 0T 에서의 임계전류값이 32A 정도로 그 폭은 3mm 이고 두께는

0.25mm 정도이다.

표 2 계자코일의 재원

극 수	3/pole
턴수	467
전류	55[A]
단격	0.25t x 3w[mm]
재질	알루미늄

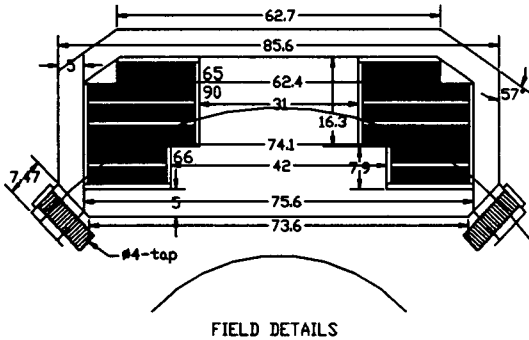


그림 2 계자코일의 횡단면 구조(mm단위)

그림 2에서는 계자코일 한국의 횡단면 구조를 자세히 보여주고 있다. 그림에서와 같이 한국의 코일은 6층의 팬케이크로 이루어지고 1층과 2층은 Joint 없이 하나의 더블팬케이크로 이루어진다. 맨 아래 더블팬케이크의 레이스트랙 단부의 직경은 그림에서 알 수 있듯이 42mm이며, 상부의 더블팬케이크는 그 직경을 달리하여 31mm로 설계하였다. 특히 위의 더블팬케이크 코일 설계시 주의할 점은 2층과 3층의 팬케이크와 4층과 5층의 팬케이크가 Lap-Joint 되므로 코일의 외반경이 같도록 설계 및 제작되어야 한다는 것이다.

각각의 팬케이크 코일의 턴 수는 테이프의 두께와 절연두께에 영향을 받으므로 실제제작시의 오차를 최소화하도록 설계하여야 한다. 계자 한국당의 전체 코일턴수는 설계시의 계산결과 467 턴이며, 최하층에서부터 팬케이크 코일의 턴 수는 66,66,90,90,90,65 으로 그림 2에서와 같이 배치된다. 또한 각 더블팬케이크 코일에 사용되는 선재의 길이는 선재 Joint 시의 여유를 고려하여 아래층부터 70m, 91m, 78m 이며 1,2층의 더블팬케이크 코일은 동일한 길이로 분배가 되며 최상층의 더블팬케이크는 위층 팬케이크는 32m, 아래층은 46m 가 되도록 하였다.

코일이 감기는 보빈과 지지축 및 코일의 고속회전시 이탈방지를 위한 덮개는 모두 알루미늄으로 제작하였으며, 팬케이크코일의 층간 절연을 위하여 두께 0.5mm의 FRP 판을 이용하였다. 그림 3에 계자코일 및 지지부의 조립도를 보인다. 설계된 레이스트랙 코일의 직선부 길이는 166mm 이며 코일의 중심부와 단부에서의 자장측정을 위하여 홀센서를 삽입할 수 있도록 하였다.

2.3 계자코일 권선과정

권선장치를 구성할 때에 일반적인 솔레노이드 코일을 권선하는 수직형의 권선기를 사용하여 더블팬케이크 코일들을 권선하고자 하였으나, 권선용 디스크를 이동하기 힘들고 코일층간에 에폭시를 바르기 힘들었다. 따라서 고온초전도선재를 더욱더 안전히 다룰 수 있고 코일제작이 용이한 수평형 권선장치를 채택하게 되었다.

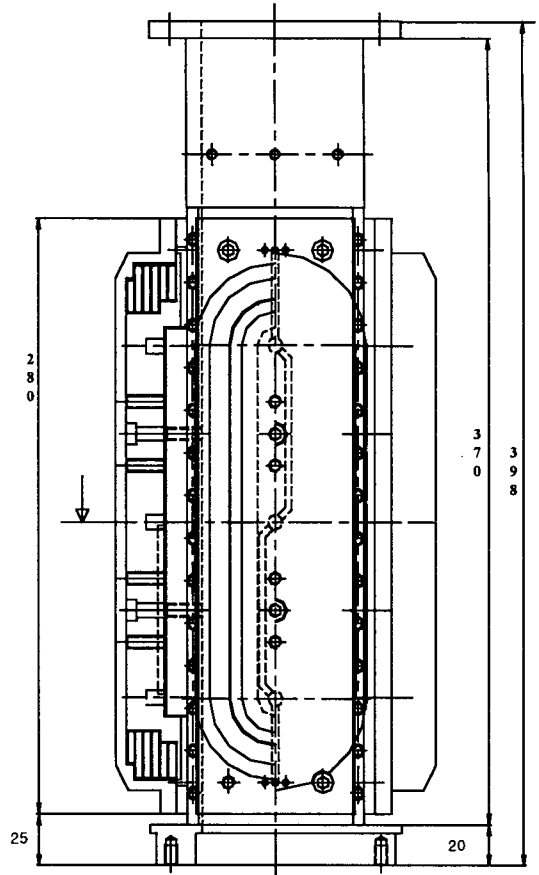


그림 3 계자코일 및 지지부의 조립도

먼저 각 더블팬케이크의 길이 계산에 따라 권선용 디스크에 선재를 옮긴 후 상층 팬케이크의 권선 분량만큼 다른 디스크에 옮긴다.

상층 팬케이크가 감겨질 선재가 담긴 디스크는 그림 4에서와 같이 계자코일보빈과 보조 권선지그 위에 설치하고 고온초전도 선재가 손상을 입지안도록하여 감고자 하는 보빈에 밀착이 되도록 한다. 보빈의 측면은 Kapton 테이프를 이용하여 초전도선재와 전기적인 절연을 이루도록 하며 보빈의 아래 표면은 코일의 층간 절연에 사용되는 것과 같은 FRP 판을 사용하여 전기적 절연을 하도록 한다. 먼저 아래층 팬케이크코일을 약간의 장력을 주면서 권선을 하고, 코일이 권선이 된 후에 단간의 밀착 및 레이스트랙 직선부에서 접착력을 강화하기 위하여 에폭시를 권선 중에 연속적으로 발라준다. 아래층 팬케이크의 권선이 끝나면 팬케이크간의 절연을 위하여 FRP 절연판을 덮은 후, 보빈 위측에 부착된 디스크를 다른 쪽 디스크를 빼낸 자리에 고정시키고 아래층 팬케이크 권선시의 방향과 반대로 회전시키면서 위층 팬케이크를 권선한다. 하나의 더블팬케이크의 권선이 완전히 끝나면 마찬가지로 FRP 절연판을 씌우고 상부의 더블팬케이크와의 Lap-Joint를 원활히 하기 위하여 절연판이 코일의 외곽과 일치가 되도록 잘라서 붙인다. Joint 및 전류리드에 접합시키기 위해 남겨 둔 코일의 양쪽 단자들을 그림 5에서와 같이 가지런히 정리하고, 레이스트랙 코일의 좌우 직선부를 조임틀을 이용하여 고정화 후 내부 에폭시가 완전히 경화될 때까지 하루정도 기다린다.

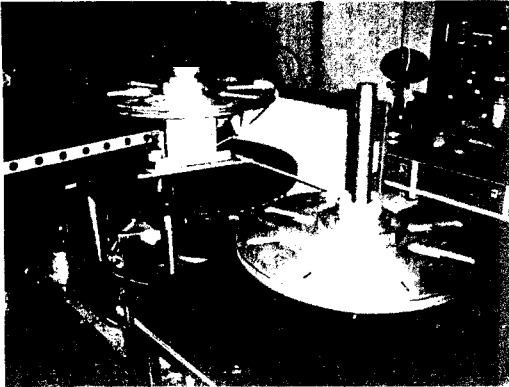


그림 4 고온초전도 계자코일의 권선장치

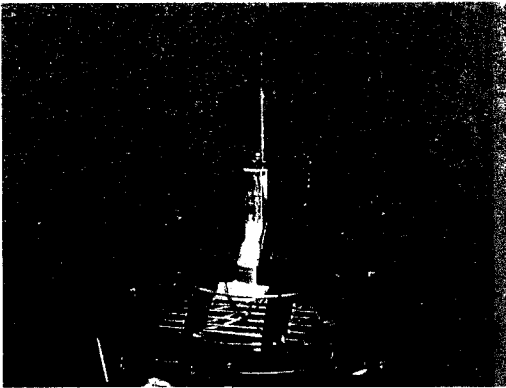


그림 5 Lap-Joint 전의 계자코일

아래층 더블팬케이크의 내부 에폭시가 완전히 응고되었으면 중간층의 더블팬케이크 권선을 아래층과 마찬가지로 권선한다. 특히 상부의 더블팬케이크는 아래층의 더블팬케이크와는 달리 상하의 팬케이크 턴 수가 다르므로 디스크에 선재를 옮길 때에 길이 제산을 정확히 할 필요가 있으며, 아래층 팬케이크가 감기는 디스크에는 56턴을 옮기고 위층 팬케이크가 감기는 다른 디스크에는 40턴을 옮겨서 차이를 두었다. 3층의 더블팬케이크 권선이 모두 끝난 후에는 Lap-Joint를 위해 남겨둔 부분을 접합되는 팬케이크간에 코일의 최외층 한 턴 정도를 남겨둘 수 있도록 선재표면의 절연코팅을 선재가 손상되지 않게 잘 벗긴 후 Joint 한다.

2.4 계자코일의 특성 시험

고온초전도 선재는 굽힘 반경이 작을수록 그 임계전류치가 감소하므로 제작하고자하는 계자코일의 경우는 최소 굽힘 반경이 31mm 이고 이 부분에서 자장의 최대 영역이 발생하여 퀠치가 발생하는데 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 77K의 액체질소상태에서 선재의 절연코팅을 벗긴 후 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준에 따라 Short Sample의 퀠치전류를 잰 결과 선재 제작회사에서 제시한 임계전류 32A 보다 작은 27A 정도가 나왔으며, 한 층의 더블팬케이크 권선 시는 14A이고 Lap-Joint 후의 한 극 계자코일의 퀠치전류는 12A 정도였다.

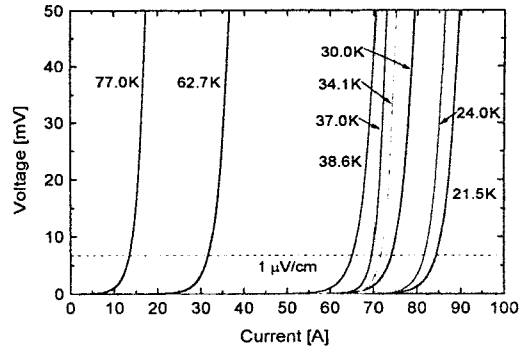


그림 6 최하층 더블팬케이크의 온도에 따른 퀠치전류

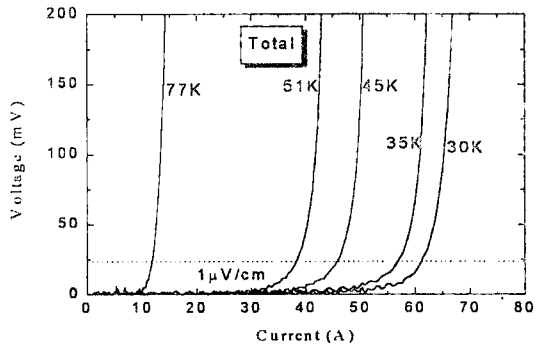


그림 7 한 극(1 pole) 권선후 온도에 따른 퀠치전류

3. 결 론

Bi-2223 고온초전도 선재를 이용하여 소용량 발전기에 사용되는 레이스트랙형 계자코일을 제작하였다. 고온초전도선재는 NbTi와 같은 금속계 저온초전도 선재와는 달리 충격에 매우 약하며, 선재가 굽혀지거나 손상을 입으면 그 통전능력이 급격히 저하한다. 따라서 이러한 고가의 부서지기 쉬운 고온초전도 선재를 취급할 때에는 세심한 주의가 요구된다. 제작된 한 극의 레이스트랙형 코일은 3개의 더블팬케이크 코일로 구성되며, 각각의 더블팬케이크는 수평형 권선을 이용하여 권선하였다. 또한 각각의 더블팬케이크는 Lap-Joint 방법으로 접합이 되며 계자코일 한 극을 제작하여 온도의 변화에 따라 특성평가를 한 결과, 5kW 용량의 시험용 고온초전도 발전기의 동작전류를 상회하는 전류를 흘릴 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] D. Aized, B.B. Gamble, A. Sidi-Yekhlef and J.P. Voccio, "Status of the 1,000 hp HTS Motor Development", IEEE Trans. on AS, Vol.9, pp.1197~1200, June 2000
- [2] S.K. Baik, M.H. Sohn, D.Y. Park, J.B. Ahn, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, Y.S. Jo, I. Muta, T. Hoshino, "A 30kVA Superconducting Generator Development and Basic Tests", IEEE Trans. on AS, Vol.10, pp.947~950, March 2000
- [3] 백승규, 손명환, 권영길, 장국렬, 이연용, 류강식, 박도영, 김용주, 안중보, 김국현, "30kVA 초전도발전기의 설계 및 성능평가", 99 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.146-149, 1999