

Design and fabrication of race-track type field coil for the high temperature superconducting generator

M.H.Sohn*, S.K.Baik, Y.S.Jo, H.S.Ha, E.Y.Lee, D.Y.Jeong, Y.K.Kwon, K.S.Ryu
Applied Superconductivity Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

Received 27 July 2000

Abstract

The fabrication and characteristics of HTS race-track type field coil for generators was carried out. Field coils are composed of 3 pancake coils wound by 37-filamental Bi-2223/Ag-alloy tapes. The winding machine is horizontal type. The critical currents (I_c) of the superconducting tapes were measured with variation of bending strain and external magnetic fields. I_c of both whole field coils and 3 pancake coils were measured as a function of temperature. At 77K under the self-field, I_c of whole field coils was 12A, while in the case of middle pancake coil, I_c was 15A. The distribution of magnetic field B was obtained, using 3-D FEM. Our simulation showed that maximums of B_z in x-y plane were locally distributed in both the upper and the lower coils. In addition, the fabrication processes and the characteristics of field coil are described.

Keywords : high temperature superconducting generator, field coil, pan-cake coil, strain, magnetic field, finite element method

I. 서론

초전도현상을 발견하면서부터 초전도기술을 전력분야에 적용하고자 하는 노력들이 선진국들을 비롯한 세계 곳곳에서 오늘날까지 계속되고 있으며, 초전도발전기분야도 지난 25년간 지속적으로 선진국들이 앞 다투어 연구해 오고 있다[1, 2]. 기존의 발전기를 대신하여 전기저항이 없는 초전도발전기를 사용할 경우 전력계통의 안정성과 효율의 1% 정도를 향상시킬 수 있으며, 발전기의 크기와 무게를 약 1/2로 줄일 수 있는 이점이 있다[3].

금속계 초전도선재를 사용할 경우 냉매는 액체헬륨을 사용하여야 하지만 임계온도가 훨씬 높은 고온초전도선재를 사용할 경우 액체질소를 냉매를 사용할 수 있어 전력기기들의 냉각시스템이 보다 간단해 질뿐 아니라 유지비용도 획기적으로 줄일 수 있다[4].

본 연구에서는 미래에 실용화 될 것으로 전망되는 고온초전도발전기의 개발에 필요한 요소기술들을 확보하고자 5kW 고온초전도발전기용 레이스트랙형 계자코일을 제작하고 I_c 특성을 평가한 결과에 관하여 설명하고자 한다.

II. 계자코일 설계 및 제작

2-1. 설계

현재 개발진행 중인 5kW 고온초전도발전기는 220V, 60Hz, 4극으로 회전수는 1800rpm이다. 발전기기의 설계는 30kW급 초전도발전기의 설계와 마찬가지로 하였으며[5], 그 결과를 그림 1에 단면으로 나타내었다.

계자코일용 도체로는 NST(Nordic Superconducting Technologies)사가 제작한 77K, 자체 자장에서 임계전류가 30A 이상인 Bi-2223 선재를 사용하기로 하였다. 코일 형태는 소용량급에서 주로 채택하는 레이스트랙형을 그리고 권선은 고온초전도마그네트 제작에서 주로하는 더

*Corresponding author. Fax: +82 55 280 1692
e-mail: mhsohn@keri.re.kr

블팬케이크 권선을 선택하였다. 계자코일의 운전전류를 55A로 정한 다음 초전도발전기를 설계한 결과 계자코일의 내외반경으로 이루어진 영역에서의 임계전류밀도는 $101.85A/mm^2$ 이었다. 이 때 권선의 점적율은 60%로 하였다. 이 결과를 참고로 설계한 계자코일의 사양과 계자코일의 단면을 표 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

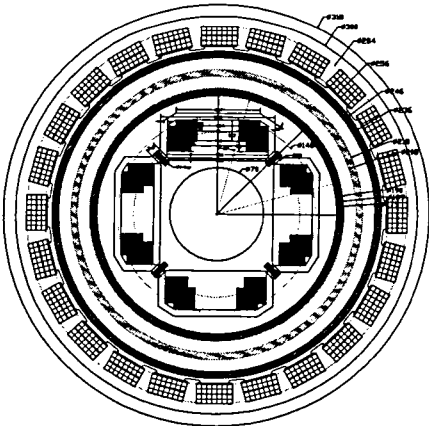


그림 1. 5kW 급 고온초전도발전기의 설계단면

표 1. 계자코일의 설계사양

팬케이크 수	3/극
극당 턴수	467턴
동작전류	55[A]
도체단면	0.25mm x 3mm
보빈재질	Al 7075
직선부 길이	166[mm]

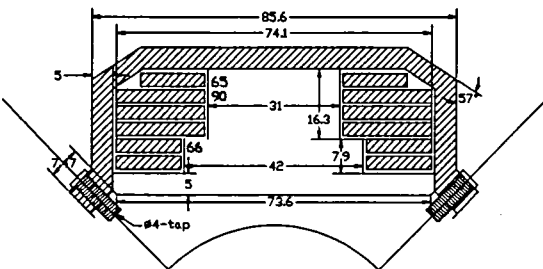


그림 2. 계자코일의 단면

그림 2에서는 계자코일 한국의 횡단면 구조

를 자세히 보여 주고 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 42mm 이며, 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 계산 결과 467 턴이며, 최하층에서부터 팬케이크 코일의 턴 수는 66, 66, 90, 90, 90, 65로 그림 2에서와 같이 배치된다.

코일이 감기는 보빈과 지지축 및 코일의 고속회전시 이탈방지를 위한 덮개는 모두 알루미늄(Al 7075)으로 제작하였으며, 팬케이크코일의 층간 절연을 위하여 두께 0.5mm의 FRP 판을 이용하였다. 설계된 레이스트랙 코일의 직선부 길이는 166mm이다.

2-2. 권선기

계자코일의 권선은 수평형의 권선기를 이용하였는데 그림 3에 나타내었다. 이 수평형 권선기에서 보빈이 설치되는 축은 시계방향과 반시계방향 회전이 모두 가능하고, 반대편의 카세트축에는 파우더브레이크가 설치되어 있는데 인가한 전압에 따라 보빈에 감기는 고온초전도 도체에 장력이 걸리게 된다.



그림 3. 수평형 권선기

2-3. 권선방법 및 절연

더블팬케이크 코일을 감을 때는 권선할 길이를 정확히 계산하여 2개의 권선용 카세트에 나누어 감은 뒤 상층에 감을 부분을 카세트에 감은 채로 보빈의 상부에 그림 3에 보인 바와 같이 고정시킨다. 도체를 보빈의 곡선부에 그림의 치구를 이용하여 고정한 후 일정한 장력으로 아래층의 팬케이크 코일을 권선한다. 보빈의 안쪽에 권선할 때는 장력을 8.0MPa로 하다가 바깥쪽으로 갈수록 점차 줄여 5.5MPa로 권선하였다.

아래층의 권선이 끝나면 팬케이크의 절연을 위하여 FRP 절연판을 덮은 후, 보빈 상부에 고정된 카세트를 권선기의 다른 축에 고정시키고 아래층의 권선 방향과 반대의 방향으로 보빈이 고정된 축을 회전시키면서 위층의 팬케이크를 권선하였다. 하나의 더블팬케이크의 권선이 완전히 끝나면 마찬가지로 FRP 절연판을 붙였다.

절연은 보빈의 표면을 anodizing(산화피막처리)하고, 코일의 안쪽면은 캡톤 테이프를 감아서 하였고, 바닥면은 층간 절연재로 사용한 FRP 판으로 절연하였다. 권선시에 에폭시 수지를 도체에 발라서 감은 코일의 고정을 시켰다. 그림 4에 권선과 lap-joint가 끝난 계자코일을 나타내었다.

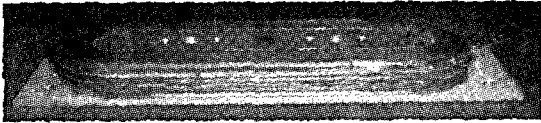


그림 4. 완성된 계자코일

III. 특성평가 및 검토

3-1. Bi-2223 도체의 특성

계자코일을 권선하기 전에 사용할 도체의 특성을 조사하였다. 그림 5에 strain에 대한 stress를 나타내었다. 일반적으로는 약 0.2%의 strain에서 도체 내부의 세라믹에 틈이 생기는 것으로 이해하고 있지만 본 실험결과에서는 약 0.3%로 추정된다.

보빈의 곡률반경이 작은 부분에 권선할 때 bending strain은 0.8%인데, 그림 6에서 약 20% 이상의 I_c 감소를 보인다.

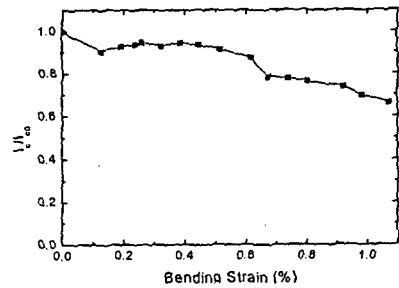
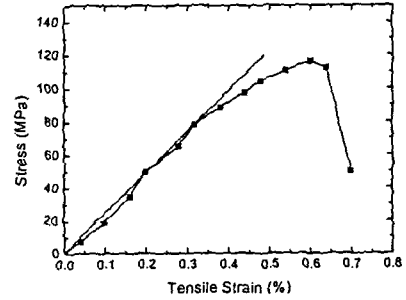


그림 6. Bending strain에 따른 I_c/I_{c0} 의 변화

실제 권선에서는 이 두 가지 strain의 torsion shear strain도 동시에 작용하기 때문에 약 8.0 - 5.5MPa 범위 내에서 권선을 하였다.

또, 외부 자장에 대한 I_c 의 변화를 그림 7에 나타내었는데, 외부자장의 방향이 테이프 도체의 표면에 나란한 경우보다 수직인 경우의 I_c 가 더 민감하게 변화함을 확인하였다.

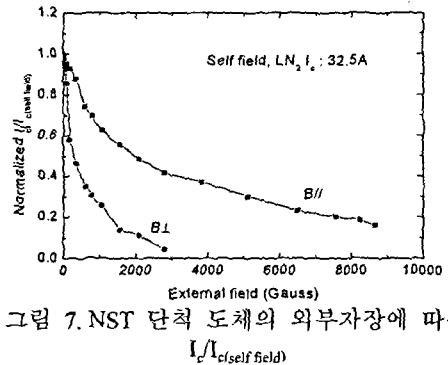


그림 7. NST 단축 도체의 외부자장에 따른 $I_c/I_{c(\text{self field})}$

3-2. 계자코일의 특성

이렇게 제작한 계자코일의 온도에 따른 I_c 측정결과를 그림 8에 나타내었다. 계자코일을 35K 이하로 낮추어야 운전전류 55A를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 9에 팬케이크 코

일 각각에 대하여 측정된 온도에 따른 I_c 결과들을 정리하였다. 가운데 팬케이크 코일의 I_c 가 상대적으로 높게 나타났으며, 상부와 하부의 팬케이크의 I_c 는 서로 비슷하게 낮았다. 이 낮은 값이 코일 전체의 I_c 를 결정짓는 것으로 판단된다.

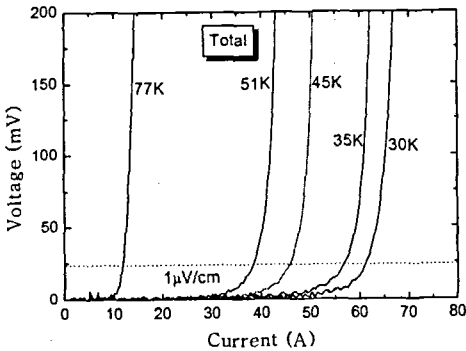


그림 8. 계자코일의 온도에 따른 I-V 곡선

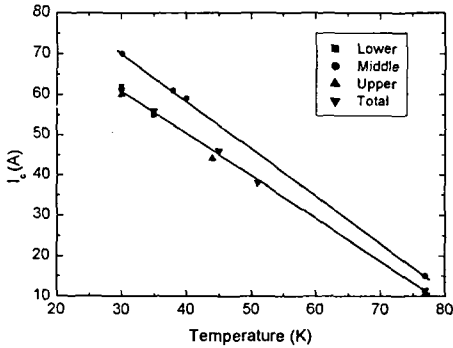


그림 9. 계자코일의 온도에 따른 I_c

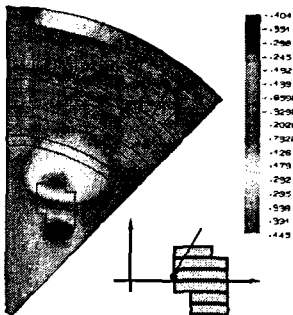


그림 10. x-y 평면에서의 자장 B_z 분포

3차원 유한요소법을 이용한 전자계해석으로 얻은 고온초전도테이프 도체의 면에 수직한 자장 성분 에 대한 자장해석결과를 계자코일의 직

선부에 수직한 평면에 대해 그림 10에 나타내었다. 자장의 수직성분 크기가 큰 영역이 상부와 하부의 팬케이크에 집중되어 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 상하부 팬케이크에서의 낮은 I_c 는 코일내부의 곡률반경보다는 전류를 인가할 때 자체적으로 발생하는 자장분포에 의존하는 것을 확인할 수 있었다

IV. 결론

5kW급 고온초전도발전기용 계자코일을 설계 제작하고 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 77K, 자체자장에서 12A의 I_c 를 나타내었으며, 운전전류 55A를 갖기 위해서는 운전온도를 35K이하로 해야 하거나 개선이 요구된다.
2. 계자코일 전체의 I_c 는 상부 및 하부의 팬케이크 코일의 I_c 에 강하게 의존하며, 상부 및 하부 코일에서의 I_c 의 저하는 고온초전도테이프 도체의 면에 수직한 자장 성분이 다른 영역보다 크게 기인한다.

참고문헌

- [1] D. Lambrecht, "Superconducting turbo generators: status and trends", *Cryogenics*, Vol. 25, 619-627 (1985).
- [2] S. H. Minnich, T. A. Keim, M. V. K. Chari, B. B. Gamble, M. J. Jefferies, D. W. Jones, E. T. Laskaris, and P. A. Rios, "Design studies of Superconducting generators", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 15, 703-711 (1979).
- [3] J. L. Kirtley, "Supercool generations", *IEEE Spectrum*, 28-35 (1985).
- [4] D. B. Montgomery, "The Future Prospects for Large Scale Applications of Superconductivity", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, 134-145 (1997).
- [5] S. K. Baik, M. H. Sohn, D. Y. Park, J. B. Ahn, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, Y. S. Jo, I. Muta and T. Hoshino, "A 30kVA Superconducting Generator Development and Basic Tests", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 10, No. 1, 947-950 (2000).