

초전도회전기용 레이스트랙형 고온초전도 마그네트 설계 및 제작

손명환*, 백승규, 조영식, 이언용, 권영길, 류강식
한국전기연구원 전략기술연구단 초전도응용연구그룹

Design and Fabrication of Racetrack type High Tc Superconducting Magnet for the Superconducting Rotating Machine

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

Abstract - Racetrack coils are used in many areas of superconductivity applications such as generators, motors, maglev, wiggler magnets and so on. The fabrication and characteristics of race-track type High Tc Superconducting (HTS) magnets were carried out. The Magnet is composed of 3 pancake coils wound by 37-filament Bi-2223/Ag-alloy tapes. Quench current (I_q) of both whole magnet and 3 pancake coils were measured. At 77K under the self-field, I_q of magnet was 12A, while in the case of middle pancake coil, I_q was 15A. The upper pancake coils of racetrack magnet with iron plates, magnet having optimized current distribution and initial magnet are compared with each other through 3D FEA, manufacturing and testing these magnets. The measured performance of the upper pancake coil #3 with iron plates improved by 50% on the basis of initial pancake coil #3. Quench current (I_q) of field winding was 12A. In addition, the fabrication processes and the characteristics of HTS magnet are described.

고온초전도회전기 개발에 필요한 요소기술들을 확보하고자 3kW 고온초전도발전기의 계자코일용 레이스트랙형 마그네트를 제작하고 지금까지 평가한 전기적 특성 및 제작과정에 관하여 설명하고자 한다.

2. 본 론

2.1 계자코일용 마그네트의 설계

현재 개발진행 중인 3kW 고온초전도발전기는 220V, 60Hz, 4극으로 회전수는 1800rpm이다. 발전기의 설계는 30kW급 초전도발전기의 설계와 마찬가지로 하였으며[6], 그 결과를 그림 1에 단면으로 나타내었다.

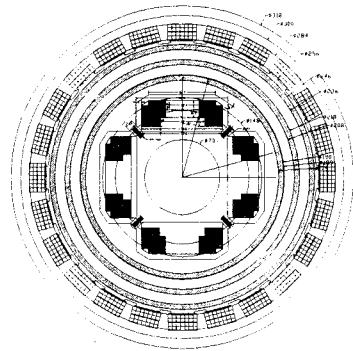


그림 1. 3kW급 고온초전도 발전기의 설계단면

계자코일용 도체로는 77K, 자체 자장에서 임계전류가 30A 이상인 Bi-2223 선재를 선택하였다. 코일 형태는 소용량급에서 주로 채택하는 레이스트랙형을 그리고 권선은 고온초전도마그네트 제작에서 주로하는 더블팬케이 크 권선을 선택하였다. 계자코일의 운전전류를 46A(운전 온도 35K이하)로 정한 다음 초전도발전기를 설계한 결과 계자코일의 내외반경으로 이루어진 영역에서의 임계전류밀도는 60.6A/mm²이었다. 이 때 권선의 접착율은 60%로 하였다. 이 결과를 참고로 설계한 계자코일용 마그네트의 사양과 단면을 표 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

표 1. 계자코일용 마그네트의 사양

팬케이크 수	3/극
극당 턴수	477턴
운전전류	46 [A]
도체 단면	0.25mm × 3.0mm
직선부 길이	166 [mm]

1. 서 론

초전도현상을 발견하면서부터 초전도기술을 전력분야에 적용하고자 하는 노력들이 선진국들을 비롯한 세계 곳곳에서 오늘날까지 계속되고 있으며, 초전도발전기 및 모터분야도 지난 25년간 지속적으로 선진국들이 앞 다퉈서 연구해 오고 있다[1, 2]. 기존의 회전기를 대신하여 전기저항이 없는 초전도회전기를 사용할 경우 기존기의 크기와 무게를 약 1/2로 줄일 수 있는 큰 이점이 있다 [3].

최근 몇 년 동안 고온초전도 선재의 성능이 향상됨에 따라 이를 이용한 응용이 가속화되고 있다. 고온초전도 선재를 사용한 응용에서는 질소를 사용하는 냉각이 가능하므로 비용이 절감되고 냉각 구조를 단순화시킬 수 있어 매우 큰 이익이 있다[4]. 하지만 마그네트로 제작하기 위한 설계에서는 고온초전도체의 brittle한 성질 때문에 보빈의 곡률과 권선시의 장력을 신중히 검토하여야 한다. 또한 자체발생자장에 대한 임계전류의 감소도 고려하여야 한다. 특히, 널리 알려진 것과 같이 테이프 형태의 고온초전도 선재의 임계전류(I_c)는 액체질소의 온도에서 그 테이프 도체의 넓은 면에 수평인 자장($B_{||}$)에 비해 수직인 자장(B_{\perp})에 대해 매우 큰 폭으로 감소하는 특징을 가지고 있다[5]. 따라서, 고온초전도 마그네트의 설계에서 마그네트의 안정도와 성능향상을 위하여 도체가 경험하는 자장의 수직성분이 작은 방법이 고려되어야 한다.

동기회전기(Synchronous Rotating Machine)의 계자코일용으로 고온초전도 도체를 사용할 경우 테이프형의 도체로 레이스트랙형으로 권선하는 방법이 가장 일반적이다.

본 연구에서는 미래에 실용화 될 것으로 전망되는 고

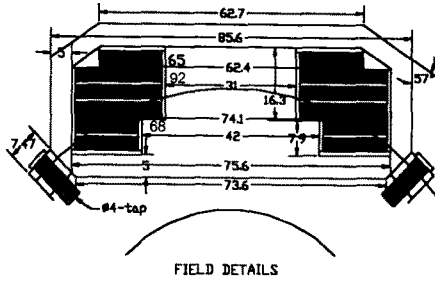


그림 2. 계자코일용 마그네트의 단면

그림 2에서는 계자코일 한국의 횡단면 구조를 자세히 보여 주고 있다. 그림에서와 같이 한국의 코일은 6층의 팬케이코일로 이루어지고 1층과 2층은 joint 없이 하나의 더블팬케이코일로 이루어진다. 맨 아래 더블팬케이코일의 레이스트랙 단부의 직경은 그림에서 알 수 있듯이 42mm이며, 상부의 더블팬케이코일은 그 직경을 달리하여 31mm로 설계하였다. 특히 위의 더블팬케이코일 설계시 주의할 점은 2층과 3층의 팬케이코일과 4층과 5층의 팬케이코일이 lap-joint 되므로 코일의 외반경이 같도록 설계 및 제작되어야 한다는 것이다.

각각의 팬케이코일 코일의 턴 수는 테이프의 두께와 절연두께에 영향을 받으므로 실제제작시의 오차를 최소화하도록 설계하여야 한다. 계자 한국당의 전체 코일턴수는 설계시의 계산결과 477 턴이며, 최하층에서부터 팬케이코일 코일의 턴 수는 68, 68, 92, 92, 92, 65로 그림 2와 같다.

코일이 감기는 보빈과 지지축 및 코일의 고속회전시 이탈을 방지하고 전기자로부터의 변동 자계를 차폐시키는 댐퍼의 역할을 하도록 덮개는 모두 알루미늄(AI 7075)으로 제작하였으며, 팬케이코일의 층간 절연을 위하여 두께 0.5mm의 FRP 판을 이용하였다. 설계된 레이스트랙 코일의 직선부 길이는 166mm이다.

2.2 계자코일용 마그네트의 개선

앞의 기본적인 설계결과를 바탕으로 고온초전도 계자코일용 마그네트의 특성 및 안정성을 향상시키기 위한 방법으로 각 층의 더블팬케이코일들의 배치를 FEM 해석을 이용하여 최적화시켰다. 이는 고온초전도 테이프에 작용하는 자장성분 중에서 코일의 운전전류에 가장 큰 영향을 미치는 테이프면에 수직인 성분의 최대치를 유한요소해석을 이용하여 최소화시킨 것이다. 이에 따른 코일의 횡단면 재배치 결과를 그림 3에 나타낸다.

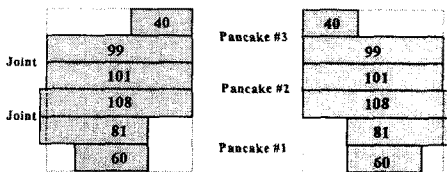


그림 3. 개선한 고온초전도 마그네트의 단면

개선된 마그네트의 권치전류를 높여 안정성을 더욱 향상시키기 위해서 규소강판을 코일의 상·하 양쪽에 설치하였다. 사용된 규소강판은 고온초전도체에 쇄교하여 지나가는 자속의 경로를 일부 바꾸는 역할을 하여 마그네트의 권치전류를 결정하는 팬케이코일 1번과 3번의 임계전류를 향상시켜 최종 권치전류를 향상시킬 수 있을 것이다. 그림 4는 1차 설계된 모델과 전류분포를 개선한 모델과 개선한 계자코일에 규소강판을 사용한 모델에서 팬케이코일 3번의 액체질소 온도에서 얻은 I-V곡선을 나타낸다. 규소강판을 사용한 모델의 I-V특성이 가장 좋은

것을 알 수 있다. 따라서 마그네트의 권선분포를 개선한 모델에 규소강판을 사용한 것이 가장 안정성이 높을 것으로 예상된다.

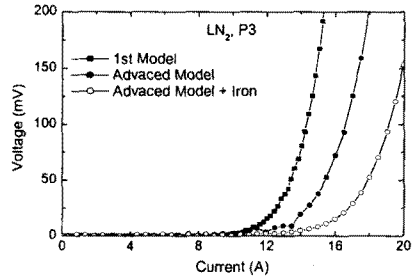


그림 4. 팬케이코일 3의 I-V 특성

2.3 레이스트랙형 마그네트 제작 및 조립

레이스트랙형 마그네트의 권선은 수평형의 권선기를 이용하였는데 그림 5에 나타내었다. 이 수평형 권선기에서 보빈이 설치되는 축은 시계방향과 반시계방향 회전이 모두 가능하고, 반대편의 카세트축에는 파우더브레이크가 설치되어 있는데 인가한 전압에 따라 보빈에 감기는 고온초전도도체에 장력이 걸리게 된다.



그림 5. 수평형 권선기

더블팬케이코일 코일을 감을 때는 권선할 길이를 정확히 계산하여 2개의 권선용 카세트에 나누어 감은 뒤 상층에 감을 부분을 카세트에 감은 채로 보빈의 상부 회전축에 고정시킨다. 도체를 보빈의 곡선부에 그림의 치구를 이용하여 고정된 후 일정한 장력으로 아래층의 팬케이코일을 권선한다. 보빈의 안쪽에 권선할 때는 장력을 8.0MPa로 하다가 바깥쪽으로 갈수록 점차 줄여 5.5MPa로 권선하였다.

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

절연은 보빈의 표면을 anodizing(산화피막처리)하고, 코일의 안쪽면은 캡톤 테이프를 감아서 하였고, 바닥면은 층간 절연재로 사용한 FRP판으로 절연하였다. 권선시에 에폭시 수지기에 도체를 발라서 감은 코일을 고정시켰다. 이렇게 고온초전도 동기기의 계자권선용 레이스트랙형 마그네트 C, D, E, F를 제작하였다.

각 계자코일은 마그네트 운전의 안정성을 높이기 위해 규소강판을 포함하는 구조로 조립하였다. 각각의 계자코일 마그네트에 Cu부스바를 연결하고, 보빈카바를 조립하여 계자코일을 완성하였다. 샤프트에 아래층 규소강판을 부착한 후 샤프트에 각 자극(pole)의 계자코일들을 서로 연결하는 조인트를 고정할 FRP 치구를 샤프트에 고정한다. 다음 4개의 계자코일을 샤프트의 4면에 부착하고 볼트로 조립하였다. 각 코일들을 설계된 회로에 따라 조인트를 하여 4극의 고온초전도 계자권선을 완성하였고 액체질소에서 성능평가를 하였다. 그림 6에 Cu부스바가 연결된

계자코일용 마그네트(좌)와 완성된 계자권선(우)을 나타내었다.

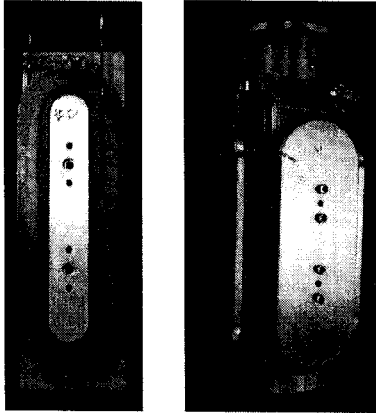


그림 6. Cu부스바가 연결된 계자코일용 마그네트(좌)와 완성된 계자권선(우)

2.4 특성평가

이렇게 제작한 4개의 계자코일들에 대한 온도에 따른 I_q 측정결과를 표 2에 정리하였다. 가운데 팬케이크 코일의 I_q 가 상대적으로 높게 나타났으며, 상부와 하부의 팬케이크의 I_q 는 서로 비슷하게 낮았다. 이 낮은 값이 코일 전체의 I_q 를 결정짓는 것으로 판단된다.

표 2. 77K 자체자장에서의 각 마그네트의 퀘치전류

마그네트 팬케이크	C	D	E	F
#1	10.7A	10.5A	11.44A	11.54A
#2	15.5A	15A	15.02A	14.72A
#3	12.75A	12.41A	12.40A	12.5A
전 체	11.70A	11.86A	12.14A	11.96A

3차원 유한요소법을 이용하여 계자코일용 마그네트에 대한 전자계해석을 하였다. 고온초전도체의 면에 수직한 자장 성분 (B_{\perp})에 대한 자장해석결과를 회전자의 수직 단면에 대해 그림 7에 나타내었다. 자장의 수직성분 크기가 큰 영역이 상부와 하부의 팬케이크에 집중되어 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 상하부 팬케이크에서의 낮은 I_q 는 코일내부의 곡률반경보다는 전류를 인가할 때 자체적으로 발생하는 자장분포에 의존하는 것을 확인할 수 있었다.

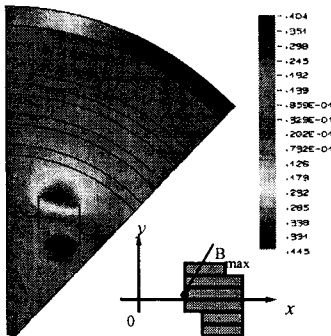


그림 7. 회전자에 수직한 단면에서의 자장 B_{\perp} 의 분포

조립이 끝나 계자권선이 완성되면 초전도 회전자에 조립이 되어진다. 그 전에 실제 운전할 수 있는 운전전류의 범위를 먼저 확인하여야 한다. 먼저 성능에 치명적인 오류가 없는지 액체질소 속에 담아서 마그네트의 퀘치전류를 측정하였다. 그림 8에 77K에서 측정된 계자권선의 I-V 곡선을 나타내었다. 계자권선 전체의 I_q 는 약 12A이었다.

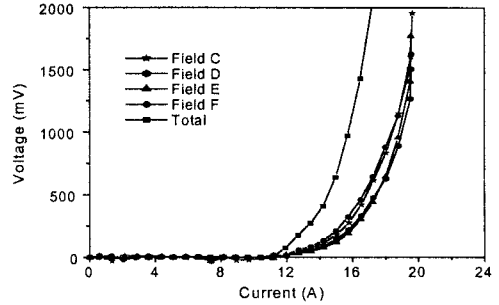


그림 8. 조립된 계자권선의 I-V 특성(77K, self field)

4. 결 론

소용량 동기기의 계자권선용으로 사용할 수 있는 레이스트랙형 고온초전도 마그네트를 제작하고 특성평가 및 자장분포해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온초전도체의 brittle한 성질로 충격에 매우 약하며, 선재가 굽혀지거나 손상을 입으면 그 통전능력이 급격히 저하되기 때문에 권선시 세심한 주의가 요구된다.
2. 고온초전도 마그네트의 설계시에는 고온초전도 테이프의 자장에 대한 이방성을 때문에 테이프 면에 수직한 자장성분을 줄이는 권선배치를 고려하는 것이 좋으며, 필요시 규소강판을 사용하여 퀘치전류의 향상을 꾀할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [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] J.F.Picard et al., "Technologies for High Field HTS Magnets", IEEE Trans. on Applied Supercon, Vol. 9, No. 2, pp. 535-540, 1999
- [6] 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).