

## 초전도 동기기용 BSCCO-2223 계자코일의 설계 및 제작

백승균\*, 장현만, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식<sup>+</sup>  
한국전기연구원 전략기술연구단 초전도응용연구그룹  
창원대학교 전기공학과<sup>+</sup>

### Design and Fabrication of BSCCO-2223 Field Coils for Superconducting Synchronous Rotating Machine

S.K. Baik\*, H.M. Jang, M.H. Sohn, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, Y.S. Jo<sup>+</sup>  
Korea Electrotechnology Research Institute  
Changwon National University<sup>+</sup>

skbaik@keri.re.kr

**Abstract** - Racetrack coils are used in many areas of superconductivity applications such as generators, motors, maglev, wiggler magnets and so on. Especially now a days a few 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 BSCCO-2223 are manufactured with PIT(Power In Tube) process, so the shape of the wire looks like tape different from LTS wire with round cross-sectional appearance like normal conductors. Generally HTS racetrack coils are composed of a few partial double-pancake coils and then the double-pancakes are jointed each other according to their applications.

## 1. 서 론

소용량 고온초전도 동기기(Synchronous Rotating Machine)에 사용할 레이스트랙(Racetrack) 형의 계자코일을 설계 및 제작하는 과정을 설명하고자 한다. 각각의 레이스트랙형 계자코일은 고온초전도 선재가 저온초전도 선재와는 달리 테이프의 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 각각의 팬케이크의 개선된 배치법과 규소강판을 이용한 코일의 특성향상법 및 권선과정과 방법 등을 설명하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 고온초전도 동기기의 설계

고온초전도 동기기의 설계 방법은 기본적으로 그 전자기적 이론 및 내부 배치 방법은 공심 및 원통형의 전자기적 구조를 같은 저온초전도 동기기와 동일하나 계자코일에 사용되는 선재의 모양이 테이프 형태이고 금속계 저온선재와는 달리 기계적인 강도가 매우 약하여 코일제작시에 여러 가지 제약조건들이 발생한다. 이러한 고온초전도 선재로는 현재 대부분 BSCCO 선재를 전력기기 등에 적용하고 있으며, 판매되는 BSCCO 선재들은 거의 테이프 형태를 띠므로 일반적으로 팬케이크 형태로 권선을 하게된다. 특히 고온초전도 테이프를 팬케이크 방식으로 배치할 경우, 원형의 저온금속계 선재를 사용하여 권선되는 레이스트랙 형태의 계자코일의 단면형상을 직사각형의 모양에서 변형할 수 있는 장점이 있어서, Fig.1에서와 같이 2차원 원통좌표계의 라플라스 방정식로부터 얻어지는 이론상의 계자코일 배치선에 근접하게 코일을 배치시킬 수 있는 장점이 있으며 공심형의 레이스트랙코일의 양단부에서 고온초전도코일을 계단형상으로 배치시킬 수 있으므로 자장의 집중현상을 다소 완화할 수 있어서 초전도코일로의 자장집중에 의한 퀘칭전류 감소의 영향을 줄일 수 있다[1].

제작하고자하는 고온초전도발전기의 재원을 Table 1에 나타낸다. 발전기의 용량은 3kW로 설계되었고, 1800 rpm 의 4극 레이스트랙으로 구성이 된다. 발전기 내부의 횡단면 배치를 Fig.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 비동기 교번자계에 의한 계자코일의 켄치를 막는 역할을 하는 댐퍼를 극저온용기 내측에 배치하여 그 동작온도를 낮춤으로써 상온에 배치할 때보다 훨씬 더 높은 도전율을 갖도록 하였다. 이에 따라 구리원통으로 제작하는 댐퍼의 두께를 줄일 수 있었다[2].

Table 1. Specifications of HTS Synchronous Machine

정격용량	3[kW]
정격속도	1800[rpm]
정격전압	220[V]
극수	4
주파수	60[Hz]
역률	0.9

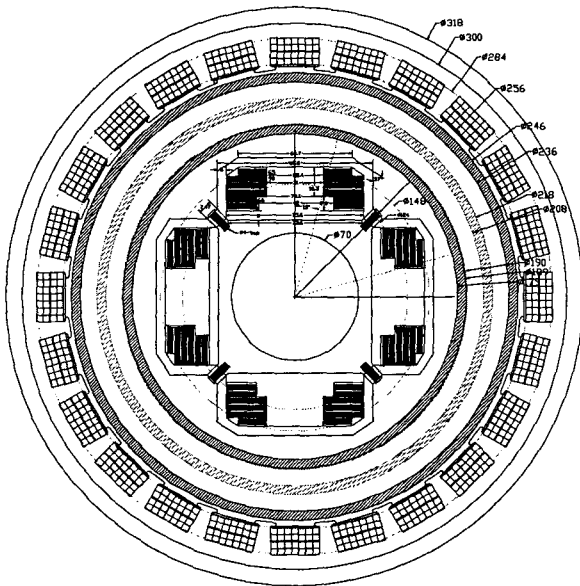


Fig.1. Designed Cross-section of 3kW HTS Synchronous Machine(mm dimensions)

고온초전도 계자코일의 동작온도는 20~30K에서 운전하도록 설계하였고, 이때의 동작전류는 46A이며 사용하고자하는 초전도 테이프의 동작전류밀도는  $60.6A/mm^2$  으로 하여 계자코일의 점적율이 60%가 될 수 있도록 하였다. Fig.1에서와 같이 최외층 기계실드의 바로 내측에 배치되는 전기자코일은 상전도코일로서 동작전류밀도는  $1.85A/mm^2$  이며 이는 공기냉각이 가능한 값으로서 Y결선의 전절편으로 24개의 슬롯에 배치된다[3].

## 2.2 고온초전도 계자코일의 구조

계자코일 제작을 위해 사용되는 선재는 Bi(Pb)-2223의 테이프형 선재로 77K, 0T에

서의 임계전류값이 32A 정도로 세라믹 절연코팅을 포함하여 그 폭은 3mm 이고 두께는 0.25mm 정도이다.

Table 2. Specifications of HTS Racetrack coil

팬케이크 수	3/pole
극당 턴수	477
동작전류	46[A]
도체규격	0.25tx3w[mm]
보빈재질	알루미늄

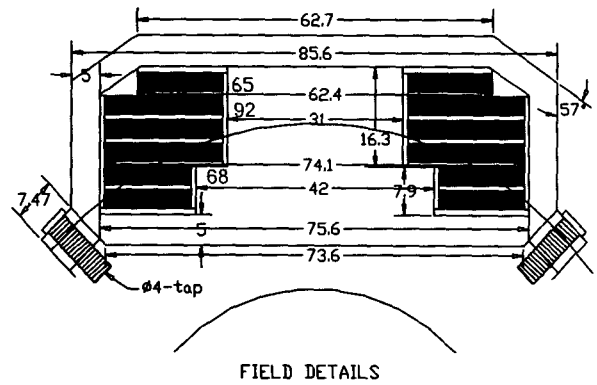


Fig.2 Cross-section of Field coil Details

Fig.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. 계자한국당의 전체 코일턴수는 설계시의 계산결과 477 턴이며, 최하층에서부터 팬케이크 코일의 턴 수는 68,68,92,92,92,65 으로 Fig.2에서와 같이 배치된다. 또한 각 더블팬케이크 코일에 사용되는 선재의 길이는 선재 Joint 시의 여유를 고려하여 아래층부터 70m, 91m, 78m이며 1,2층의 더블팬케이크 코일은 동일한 길이로 분배가 되며 최상층의 더블팬케이크는 위층 팬케이크는 32m, 아래층은 46m 가 되도록 하였다.

코일이 감기는 보빈과 지지축 및 코일의 고속 회전시 이탈방지를 위한 덮개는 모두 알루미늄으로 제작하였으며, 팬케이크코일의 층간 절연을 위하여 두께 0.5mm의 FRP 판을 이용하였다. 설계된 레이스트랙 코일의 직선부 길이는

166mm 이며 코일의 중심부와 단부에서의 자장 측정을 위하여 홀센서를 삽입할 수 있도록 하였다[4].

### 2.3 계자코일 형상 개선

이상에서 설계된 기본적인 설계결과를 바탕으로 고온초전도 계자코일의 특성향상을 위한 방법으로 각 층의 더블팬케이코일들의 배치를 FEM 해석을 이용하여 최적화시켰다. 이는 고온초전도 테이프에 작용하는 자장성분 중에서 코일의 운전전류에 가장 큰 영향을 미치는 테이프면의 수직 성분의 최대치를 유한요소해석을 이용하여 최소화시킨 것이다. 이에 따른 코일의 횡단면 재배치 결과를 Fig.3에 보인다.

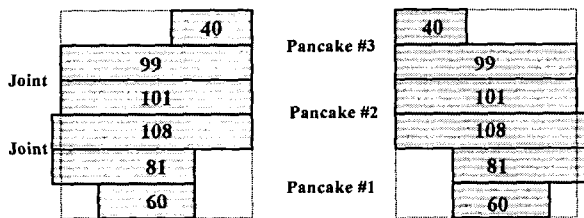


Fig.3. Cross-section of Improved HTS Field coil

개선된 계자코일의 운전특성을 더욱더 향상시키기 위해서 규소강판을 계자코일의 상·하 양쪽에 설치하였다. 사용된 규소강판은 고온초전도체에 쇄교하여 지나가는 자속의 경로를 일부 바꾸는 역할을 하여 계자코일의 임계전류를 결정하는 팬케이코일 1번과 3번의 임계전류를 향상시켜 최종 계자코일의 임계전류를 향상시킬 수 있을 것이다. Fig.4은 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 계자코일의 전류분포를 개선한 모델에 규소강판을 사용한 것이 가장 우수한 안정성을 가질 것으로 예상된다.

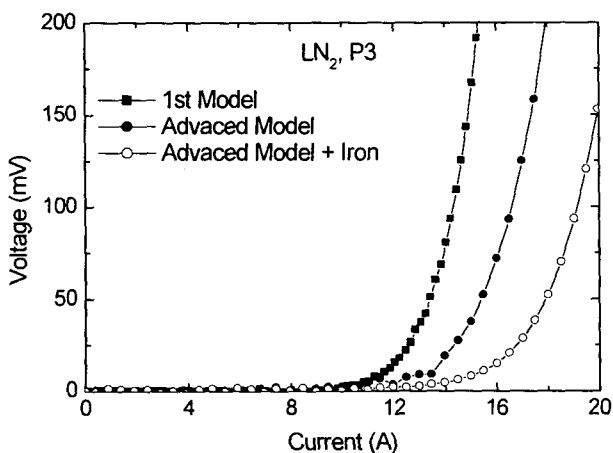


Fig.4. I-V Characteristics of Pancake 3

또한 개선한 모델과 개선하기전 모델 모두 30K에서 60A 이상의 임계전류를 얻을 수 있었고, 이는 기기의 운전온도 20~30K에서의 동작 전류 설계치인 46A를 훨씬 상회하는 값이다.

### 2.4 계자코일 권선과정

권선장치를 구성할 때에 일반적인 솔레노이드 코일을 권선하는 수직형의 권선기를 사용하여 더블팬케이코일들을 권선하고자 하였으나, 권선용 디스크를 이동하기 힘들고 코일층간에 에폭시를 바르기 힘들었다. 따라서 고온초전도선재를 더욱더 안전하게 다룰 수 있고 코일제작이 용이한 수평형 권선장치를 채택하게 되었다. 먼저 각 더블팬케이코일의 길이 계산에 따라 권선용 디스크에 선재를 옮긴 후에 상층 팬케이코일의 권선 분량만큼 다른 디스크에 옮긴다. 상층 팬케이코일이 감겨질 선재가 담긴 디스크는 계자코일 보빈과 보조 권선지그 위에 설치하고 고온초전도 선재가 손상을 입지안도록하여 감고자하는 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 팬케이코일을 약간의 장력을 주면서 권선을 하고, 코일이 권선이 된 후에 턴간의 밀착 및 레이스트랙 직선부에서 접착력을 강화하기 위하여 에폭시를 권선중에 연속적으로 발라준다. 아래층 팬케이코일의 권선이 끝나면 팬케이코일간의 절연을 위하여 FRP 절연판을 덮은 후, 보빈 위측에 부착된 디스크를 다른 쪽 디스크를 빼낸 자리에 고정시키고 아래층 팬케이코일 권선시의 방향과 반대로 회전시키면서 위층 팬케이코일을 권선한다. 하나의 더블팬케이코일의 권선이 완전히 끝나면 마찬가지로 FRP 절연판을 씌우고 상부의 더블팬케이코일의 Lap-Joint를 원활히 하기 위하여 절연판이 코일의 외곽과 일치하도록 잘라서 붙인다. Joint 및 전류리드에 접합시키기 위해 남겨둔 코일의 양쪽 단자들을 가지런히 정리하고, 레이스트랙 코일의 좌우 직선부를 조임틀을 이용하여 고정된 후 내부 에폭시가 완전히 경화될 때까지 하루정도 기다린다. 아래층 더블팬케이코일의 내부 에폭시가 완전히 응고되었으면 중간층의 더블팬케이코일 권선을 아래층과 마찬가지로 권선한다. 특히 상부의 더블팬케이코일은 아래층의 더블팬케이코일과는 달리 상부의 팬케이코일 턴 수가 다르므로 디스크에 선재를 옮길 때에 길이 계산을 정확히 할 필요가 있으며, 3층의 더블팬케이코일 권선이 모두 끝난 후에는 Lap-Joint를 위해 남겨둔 부분을 접합되는 팬케이코일간에 코일의 최외층 한 턴 정도를 남뱌할 수 있도록 선재표면의 절연코팅을 선재가 손상되지 않게 잘 벗긴 후 Joint 한다.

## 2.4 계자코일 조립 및 특성시험

고온초전도 동기기의 계자코일로 사용할 계자코일 C, D, E, F 코일을 제작하였다. 계자코일의 운전전류에서의 안정성을 높이기 위해 임계전류값이 높게 나타난 규소강판을 포함하는 구조로 조립하였고, 계자코일을 샤프트에 조립하는 과정과 그 후 액체질소 속에서 성능평가한 결과들을 다음과 같이 정리한다. 실제 제작 시험한 계자코일 C, D, E, F 코일을 사용하여 4극의 고온초전도 계자권선을 조립하였으며, 4개의 코일은 냉각장치가 내부에 들어갈 수 있는 공간을 가진 알루미늄 샤프트에 고정시켰다. 먼저 샤프트에 아래층 규소강판을 부착한 후 샤프트에 각 자극(pole)의 계자코일들을 서로 연결하는 조인트를 고정할 FRP 치구를 샤프트에 고정한다. 그리고 각각의 계자코일에 Cu부스바를 연결한다. 보빈 카바를 조립하여 계자코일을 완성한 후 홀센서를 계자코일 보빈 뒷면에 부착하였다. 4개의 계자코일을 샤프트의 4면에 부착하고 볼트로 조립하여, 각 코일들을 설계된 회로에 따라 조인트를 하고 액체질소에서 성능평가를 하였다.

조립이 끝나 계자권선이 완성되면 초전도 회전자에 조립이 되어진다. 그 전에 실제 운전을 할 수 있는 운전전류의 범위를 먼저 확인하여야 한다. 먼저 성능에 치명적인 오류가 없는지 액체질소 속에 담아서 임계전류 측정을 하였다. 이때 각 지점에서의 발생자장을 측정하였다. Fig.5 에 77K에서의 계자코일의 I-V 곡선을 나타내었다. 코일 전체의  $I_c$ 는 12A이었다.

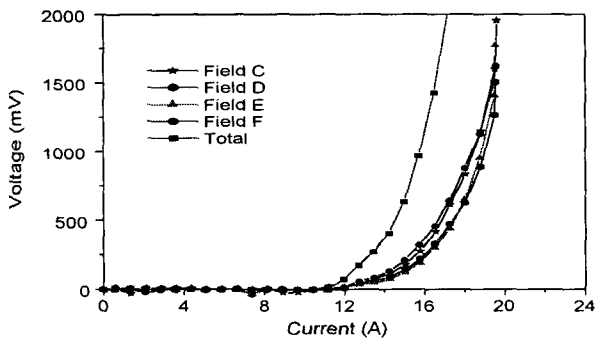


Fig.5 I-V Characteristics of Assembled Field coils (77K, self field)

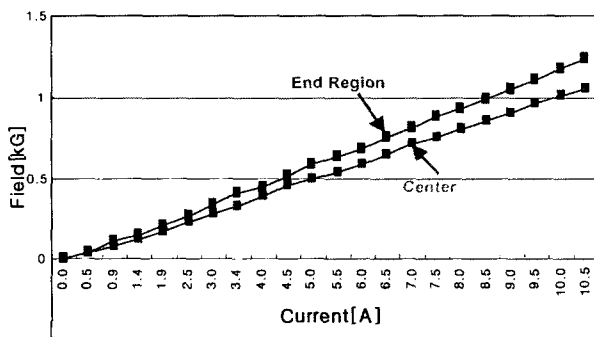


Fig. 6. Magnetic Flux Density at Center and End region

계자코일의 중심부(Center)와 원형의 단부(End Region) 중심에 설치한 자장센서로부터 측정된 자장의 세기를 Fig.6에서 보여준다. 레이스트랙 코일은 그 자장이 양쪽단부의 안쪽면에서 최대가 되므로 실제 동기기를 제작하였을 때의 자장세기는 기기의 최외층에 존재하는 자기실드로 인하여 약간 증가하게 되므로, Fig.6의 End Region 으로부터 읽어드린 값보다 약간 더 증가한 값을 가질 것으로 예측된다.

## 3. 결 론

BSCCO-2223 고온초전도 선재를 이용하여 소용량 동기기에 사용되는 레이스트랙형 계자코일을 제작하였다. 고온초전도 선재는 NbTi 와 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 구성이 되며, 각각의 더블팬케이크는 수평형 권선기를 이용하여 권선하였다. 또한 각각의 더블팬케이크는 Lap-Joint 방법으로 접합이 되며 계자코일 한 극을 제작하여 온도의 변화에 따라 특성평가를 한 결과, 3kW 용량의 시험용 고온초전도 동기기의 동작전류를 상회하는 전류를 흘릴 수 있었으며, 켄치전류 향상을 위하여 각 층의 팬케이크 코일의 배치를 조정하고 규소강판을 이용하여 HTS 테이프에 수직으로 작용하는 자장성분을 감소시킨 결과 더욱더 향상된 특성을 얻을 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [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, 이언용, 류강식, 박도영, 김용주, 안중보, 김국현, "30kVA 초전도발전기의 설계 및 성능평가", 99 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.146-149, 1999
- [4] 백승규, 장현만, 고락길, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식, "고온초전도 계자코일의 설계 및 제작", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp.775-777, 2000