

전도 냉각을 이용한 고온 초전도 회전기용 모델 코일의 특성 평가

이재득*, 백승규**, 손명환**, 이연용**, 김영춘***, 권영길**, 박민원*, 유인근*
 창원대학교*, 한국전기연구원**, 두산중공업(주) 기술연구원***

Evaluation of a model coil characteristics for HTS rotating machine using conduction-cooled

J. D. Lee*, S. K. Baik**, M. H. Sohn**, E. Y. Lee**, Y. C. Kim***, Y. K. Kwon**, M. W. Park*, I. K. Yu*
 Changwon National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**, Doosan Heavy Industries & Construction Co.***

Abstract - In large scale superconducting rotating machine, HTS field coils are constructed with many stacks of single or double pancake coils connected in series. In spite of its higher thermal stability, HTS field coil experiences some quench, which results in some part of burn-out in the field coils. Thus in the view point of the HTS rotating machine field coil design and testing, it was very important to predict the possibility of quench occurrence in the designed field coils. In this paper, a HTS racetrack coil constructed with two single pancake coils and one double pancake coil was tested in LN2 and cooling by GM refrigerator. It is wound using the Bi-2223 tape. The experimental details and results are presented in this paper.

1. 서 론

1986년 고온초전도체의 발견 이후 초전도 전력기기의 연구 개발은 전 세계적으로 빠른 속도로 진행되고 있다. 초전도 회전기의 경우 플라야휠, 초전도 발전기, 초전도 모터 등 많은 분야에서 연구 개발이 이루어지고 있다. 초전도 모터는 상용모터에 비해 높은 효율을 가지고 크거나 무게를 줄일 수 있는 장점을 가지므로 현재 선박이나 플랜트용으로 연구 개발이 진행 중에 있다.[1]

장선의 테이프의 형상을 가지는 초전도 선재의 특성으로 인하여 초전도 회전기의 계자코일은 일반적으로 레이스트랙 형태로 제작된다. 레이스트랙을 한 층씩 적층하는 방식으로 제작되는 초전도 회전기의 계자코일은 불가피하게 접합이 필요하게 되며, 이러한 접합부분은 초전도 계자코일의 층수에 따라 존재하게 되고 전체 코일에서 저항체로 존재하게 된다. 초전도 모터 운전시 이러한 부분에서 발생하는 열로 인해 계자코일의 퀴치전류(I_q) 및 운전전류에 영향을 미치게 되며, 코일의 안정성과도 관계된다. 따라서 본 논문에서는 초전도 회전기용 계자 코일의 제작에 있어 코일간의 접합이 전체 코일에 미치는 영향과 냉각 온도 변화에 따른 코일의 퀴치 전류 변화와 일정한 전류 공급시 모델코일에서 발생하는 온도변화와 퀴치발생 여부에 대하여 테스트한 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 모델코일의 구성

모델 코일은 2개의 싱글 팬케이크 코일과 1개의 더블 팬케이크 코일로 구성하였다. 모델코일에 사용된 초전도 선재는 AMSC 사의 고강도 High-I_c 선재를 사용하였으며, 사용된 선재의 길이와 턴 수는 표1에 나타내었다. 보빈과 코일사이의 절연은 Nomax paper를 이용하여 절연하였으며, 코일간의 절연은 Kapton 테이프를 이용하였다. 권선 방식은 epoxy를 이용한 wet-winding 방식을 이용하였다.

두개의 싱글팬케이크 코일과 하나의 더블팬케이크 코일사이의 접합은 SUS lamination이 되어 있지 않는 SUMITOMO 사의 초전도 선재 조각을 이용하여 두개의 코일 간에 다리를 놓는 방식으로 10cm를 접합하였다.[2]

전류도입부는 입력단과 코일사이의 접합으로 인한 발열로 초전도 모델코일에 미치는 영향을 줄이기 위하여 초전도 선재 3개를 이용하여 모델코일과 접합한 후 코일과의 거리를 두고 외부로부터 들어오는 입력단과 연결하였다.

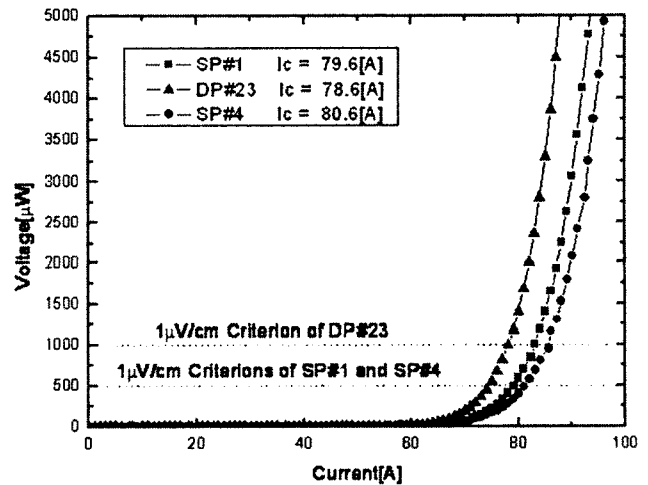
〈표 1〉 모델코일의 spec

	Turn	Length(cm)
SP Coil #1	10	500
DP Coil #23	coil#2	500
	coil#3	500
SP Coil #4	10	500
Total	40	2000

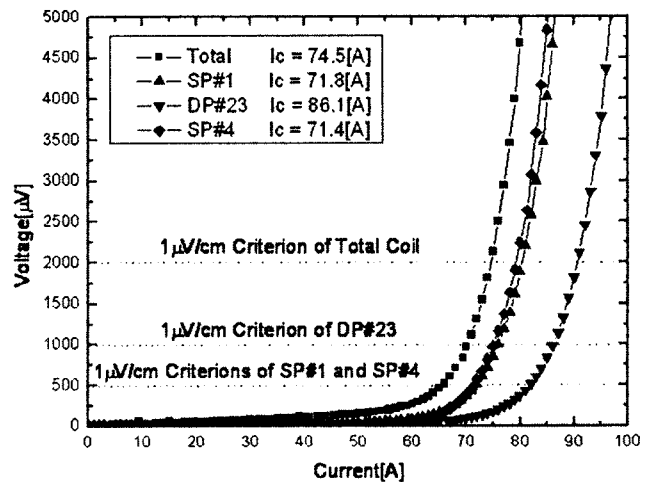
2.2 모델코일 특성 평가(@77K)

그림 1은 액체질소 상에서 각각의 코일을 테스트 한 I-V 특성곡선이다. SP#1과 SP#4의 I_q는 1μV/cm 기준에서 약 79.6[A]와 80.6[A]이었으며, DP#23은 약 78.6[A]이었다.

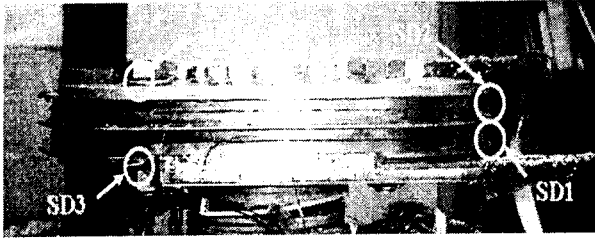
그림 2는 조립된 모델코일을 액체질소에서 테스트한 I-V 특성곡선이다. 전체 코일의 I_q 값은 74.5[A]였으며, SP#1과 SP#4는 각각 71.8[A]와 71.4[A]였으며, DP#23은 86.1[A]로 측정되었다. 여기서 개별 코일 테스트 결과와 비교하면, 개별 코일 테스트의 경우 SP#1과 SP#4가 DP#23 보다 높은 I_q 값을 측정 하였으나, 조립된 모델코일의 경우 DP#23이 SP#1과 SP#4보다 높은 I_q 값이 측정되었다. 이것은 각각의 코일의 수직 자장 값과 조립된 코일의 수직 자장 값이 틀리고, 조립된 모델코일의 경우 두개의 싱글 팬케이크가 가운데 위치한 더블 팬케이크에 비해 수직자장의 영향을 많이 받기 때문에 낮은 I_q 값이 측정되는 것으로 사료된다.



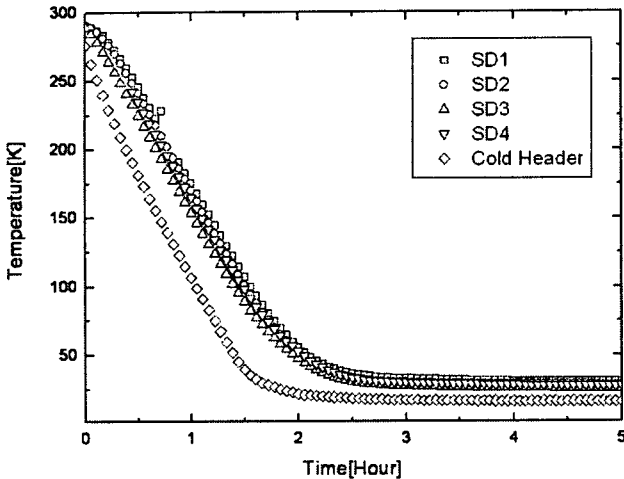
〈그림 1〉 SP#1, SP#4, DP#23의 I-V 특성곡선(@77K)



〈그림 2〉 초전도 모델코일의 I-V 특성곡선(@77K)



〈그림 3〉 모델코일에 부착된 온도 센서 위치



〈그림 4〉 전도냉각시의 모델코일의 온도변화 그래프

〈표 2〉 온도변화에 따른 모델코일의 퀀치전류 변화

Temp	30K	40K	53K	58K	62K	70K
I _q	N/A	208[A]	178[A]	121[A]	93[A]	74[A]

2.3 전도냉각을 이용한 모델코일의 특성 평가

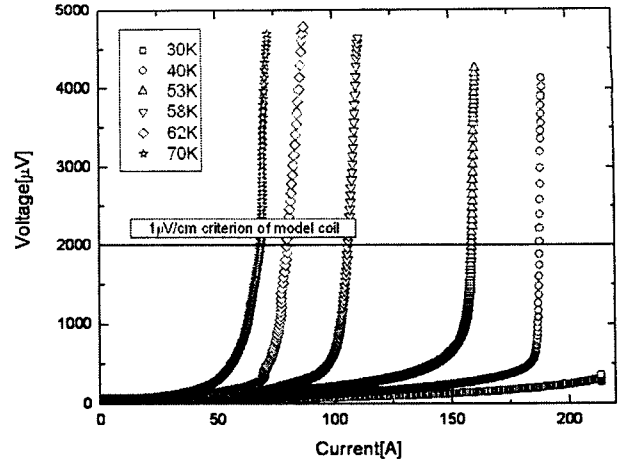
액체 질소에서 모델코일의 특성 평가 후 전도냉각을 이용하여 특성 평가를 실시하였다. 모델코일의 온도를 측정하기 위하여 그림3에서와 같이 총 4개의 온도센서를 부착하였으며, SD1은 SP#1에 SD2는 SP#4에 부착하였으며, SD3과 SD4는 각각 모델코일 보빈의 밑부분과 윗부분에 하나씩 붙였다. 전압 탭의 위치는 각각의 접합 부분과 양 쪽 전류도입부 끝단에 하나씩 위치 시켰다. 코일과 Cold header 사이의 냉각효율을 높이기 위하여 Indium을 삽입하여 열전도율을 높였다.

그림 4는 모델코일의 냉각 곡선 그래프이다. 냉동기를 켜 후 약 3시간 만에 냉동기에 부착된 모델코일의 전체 온도는 안정되었으며, 온도는 SD1이 28.5K, SD2가 27.7K, SD3이 23.7K, SD4가 26K 이었으며 Cold header의 온도는 14.4K 이었다.

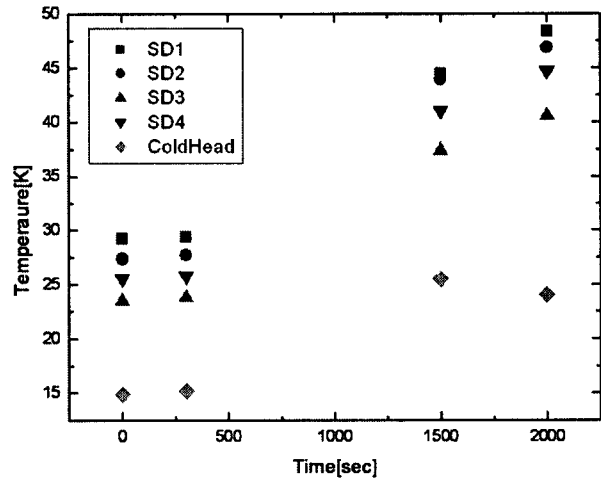
그림 5는 온도변화에 따른 모델코일의 퀀치전류 변화를 나타낸 I-V 특성곡선이다. SD1의 온도를 기준으로 측정하고, 전원 공급 장치의 용량의 제한으로 인하여 30K에서의 퀀치전류 값을 측정하지 못했다. 30K에서 모델코일의 I_q값은 220[A] 이상일 것으로 추정된다. 전체코일 중에서 퀀치가 발생한 부분은 SP#1이었으며, DP#23이나 SP#4보다 특성이 좋지 않은 것을 알 수 있었다. 각 온도별 퀀치전류의 크기는 표 2와 같다.

30K에서 모델코일 테스트시 접합저항의 크기는 SP#1과 DP#23의 접합부분이 약 34[mΩ]이었으며, DP#23과 SP#4의 접합 부분은 약 70[mΩ]으로 아주 작은 값을 나타내었으며, 220[A]상승시 까지 일정한 기울기를 가지고 증가하는 것을 확인하였다.

회전기의 경우 정격운전전류를 가지고 동작하기 때문에 모델코일에서도 모델코일의 운전온도를 30[K], 정격운전전류를 150[A]로 두고 모델코일내의 온도변화추이를 테스트 하였다. 그림 6은 150[A]의 운전전류를 모델코일에 계속 인가 해 주었을 때의 온도변화추이를 나타내고 있다. 처음 전류를 인가하고 전원공급장치의 전류 값이 150[A] 되기까지 시간이 약 300[sec]가 걸렸으며 이 후로는 계속해서 150[A]가 인가되었다. 약 1500[sec] 부근에서 모델코일의 SP#1에서 퀀치가 발생하였으며, 퀀치 발생이후 전원공급장치의 전원이 자동으로 차단되었다. 온도센서의 온도는 SD1이 29.4K에서 44.5K로 약 15K정도 상승하였고, SD2가 27.7K에서 44K로 약 16.3K 상승하였으며, 그리고 SD3가 23.8에서 37.4K으로 14.6K정도 상승하고



〈그림 5〉 온도 변화에 따른 모델코일의 I-V 특성곡선



〈그림 6〉 150[A] 운전전류 고정 테스트시의 온도변화 추이

SD4가 25.8에서 41K으로 약 15.2K 상승하였다. Cold-Header의 온도 또한 15.1에서 25K으로 약 10K 정도 상승하였다. 전체코일의 온도는 초전도 상태일 때의 온도 보다 약 15K정도 상승하는 것으로 나타났다. 이후 Cold Header의 온도는 계속 내려가고 있지만 모델코일의 온도는 계속 상승하였으며, 500[sec]이후인 약 2000[sec]에서부터 모델코일의 온도가 내려가기 시작하였다. 퀀치 이후에도 계속 코일에서 열이 발생하여 약 5K정도 더 상승된 후 다시 냉각되는 것을 볼 수 있었다.

3. 결 론

지금까지 모델코일을 권선하고 테스트 한 결과를 나타내었다. 모델코일의 전체 온도를 30K이하로 내려 온도를 70K까지 높여 가며 퀀치전류의 변화를 테스트 하였으며, 운전전류를 150[A]로 고정시켜 모델코일의 특성테스트를 마쳤다. 모델코일에서 퀀치전류의 변화는 온도에 따라 일정하게 변했으며, 전체 코일에서 일정한 기울기 값을 가지는 접합저항의 영향보다는 권선된 각각의 코일의 특성이 전체코일의 특성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 일정 전류를 계속인가하면서 테스트시에 코일의 온도상승으로 인한 퀀치의 발생을 막을 수 있는 냉각용량을 높여 주기 위하여 Cryo-Block의 설치가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용융 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 이재득 외 10명, "고온초전도 회전기용 모델코일 제작 및 특성평가", 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, p170-173, 2005.
- [2] 손명환 외 9명, "전도냉각방식을 이용한 고온초전도 코일의 퀀치전류 측정", 2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol.B, p1252-1254, 2005