

1MW 급 산업용 고온초전도 모터 특성 평가

백승균, 권영길, 김중무, 이재득, 이연용, 김영춘*, 문태선*, 박희주*, 권운식*, 박관수**
 한국전기연구원 초전도기기연구그룹, 두산중공업(주) 기술연구원*, 부산대학교 전자 전기 정보 컴퓨터 공학부**

Performance Test of 1MW class High-temperature Superconducting Motor for Industry Application

S. K. Baik, Y. K. Kwon, J. M. Kim, J. D. Lee, E. Y. Lee, Y. C. Kim*, T. S. Moon*, H. J. Park*, W. S. Kwon*, G. S. Park**
 Korea Electrotechnology Research Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co.*, Pusan National University**

Abstract - A 1MW class HTS(High-Temperature Superconducting) synchronous motor has been developed. This motor is aimed to be utilized for industrial application such as large motors operating in large plants. The HTS field coil of the developed motor is cooled by way of Neon thermosiphon mechanism and the stator coil is cooled by water through hollow copper conductor. This paper describes performance test results of our motor, which was conducted at steady state in generator mode and motor mode.

1. 서 론

개발된 고온초전도 동기 모터는 계자코일이 Bi-2223 고온초전도 선재로 이루어진 3600rpm의 정격속도로 회전하는 산업용을 목적으로 한다. 그 주요 사양을 <표 1>에 나타내며 부하시험을 위해서 기존의 공냉식 1.1MW 유도 모터로 구성되는 다이내모메터에 연결된 모습을 <그림 1>에 보여준다[1].

<표 1> 개발된 1MW 급 고온초전도 동기 모터의 주요 사양

정격용량	1MW	계자코일 턴 수	3348
정격속도	3600rpm	계자코일 초전도체	Bi-2223
주파수	60Hz	계자코일 동작온도	약 30K(-243℃)
극수	2극	축방향 길이 × 높이	2.4 × 1.2m
정격 단자전압	3300V	전기자 슬롯 수	36
계자 정격전류	150A	전기자 코일 턴 수	48턴/상
계자도체 전류밀도	115A/mm ²	전기자 냉각방식	수냉식



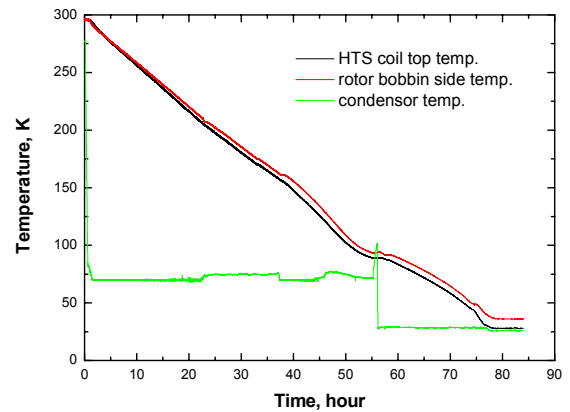
<그림 1> 1MW 급 고온초전도 모터의 부하 시험 장면

2. 본 론

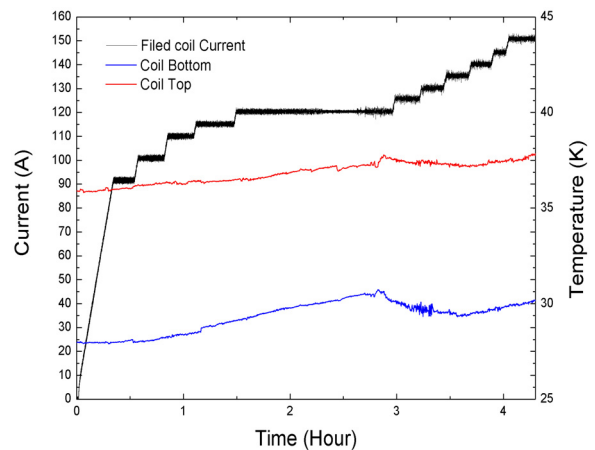
2.1 계자코일 냉각 및 통전

고온초전도 계자코일을 동작온도인 30K까지 냉각시키기 위하여 <그림 1>에서 볼 수 있는 바와 같이 모터의 외부에 위치하는 극저온 냉동장치에서 기체 상태의 냉매를 액화하여 회전자 내부로 증력에 의하여 흘러들어가게 하는 Thermosiphon 방식이 이용된다[2]. 초기 냉각시에 네온(Ne)만을 냉매로 하여 상온에서 30K까지 냉각하는데 200시간이 걸

렸다. 냉각에 걸리는 시간을 단축 시키기위해서 네온(27.1K)보다 더 높은 액화점을 가지는 질소(77K)를 이용하여 1MW 초전도모터의 회전자 냉각실험을 수행하였다. 질소를 이용하여 예냉 후 네온가스를 이용하여 냉각시킨 냉각 그래프를 <그림 2>에 나타낸다. 회전자의 온도 기울기가 완만해지는 55 시간까지 질소를 이용하여 로터를 90K 정도까지 냉각시켰다. 그 후 냉동기를 off 시킨 후 내부의 액체 질소를 증발 시킨 후 네온가스를 이용하여 퍼징 작업을 수행한 후 56 시간부터 네온을 이용하여 로터의 온도를 30 K 이하로 냉각시켰다. 냉각에 걸린 총 시간은 78시간 정도 걸렸다. 이는 네온만을 사용시 걸린 시간의 절반 이하로 냉각에 걸리는 시간적인 손실을 크게 줄일 수 있었다.



<그림 2> 1MW 급 고온초전도 모터의 회전자 냉각 곡선

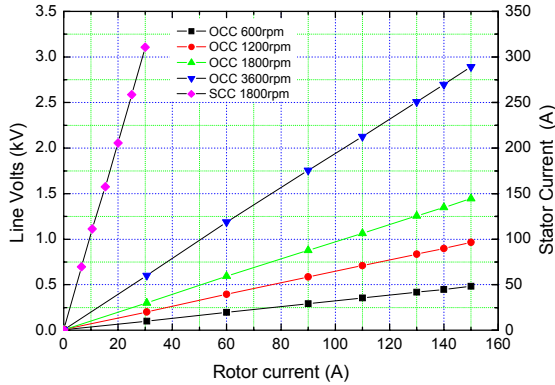


<그림 3> 역기전력 측정시의 계자코일 통전 전류 및 온도 변화

<그림 3>에 1MW 고온초전도 모터의 계자코일에 150A까지 통전시 전류 및 코일의 온도변화를 보여준다. 냉각이 완료된 고온초전도 계자코일의 온도는 상부가 36K, 보빈에 접하는 바닥 부분이 28K로 유지되었다. 4시간 동안 150A까지 상승시켰으며 150A 통전후 계자코일의 온도는 상부가 37.5K, 하부가 30.2K, 으로 각각 1.5K, 2.2K 상승하였다. 0A, 30A, 60A, 90A, 110A, 130A, 150A 통전시 초전도모터를 다이내모메터를 이용하여 전류별로 600rpm, 1200rpm, 1800rpm 회전시 발전기모드에

서의 역기전력을 측정하였다.

2.2 무부하 특성 시험 결과



<그림 4> 개방회로(OCC)와 단락회로(SCC) 특성 시험 결과

그림 4는 1MW 고온초전도 모터를 무부하에서 발전기 Mode로 운전 시의 발전 전압과 단락 전류의 측정 데이터를 보여주고 있다. 개방회로 특성(OCC) 시험에서 발전 전압은 삼상 전기자 코일의 선간 단자 전압을 측정된 것이다. 그림에서와 같이 OCC 곡선은 공심형의 초전도 모터이기 때문에 회전자 전류에 따라 비례하고, 또한 식 1에서와 같이 회전 속도에 비례하므로 600rpm에서의 단자전압 측정치의 2배가 1200rpm에서의 측정치가 됨을 확인할 수 있었으며 3배일 경우 정확히 1800rpm에서의 측정치가 되었다[3]. 본 시험시에 다이내모미터(Dynamometer)와 초전도 모터를 연결하였을 경우 진동이 문제가 되어 3600rpm에서 발생 전압을 측정하지는 못하였으나, 1800rpm에서의 측정치를 2배하여 3600rpm에서의 값을 구하였다.

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

여기서, E_{af} 는 발전 전압(역기전력),
 ω 는 회전 각속도,
 L_{af} 는 고정자와 회전자 코일 사이의 상호인덕턴스 최대값,
 I_f 는 회전자 전류(계자 전류)

위 식을 이용하여 상호인덕턴스 최대값 L_{af} 를 구하면, 회전자 전류 150A, 1800 rpm에서 전기자 선간 발전 전압이 1445.6V 이었으므로 상 전압은 이를 $\sqrt{3}$ 으로 나눈 834.62V가 된다. 이를 식 1에 대입하면 L_{af} 는 0.0417H가 된다.

$$I_{sc} = \frac{E_{ph}}{\sqrt{R_{ph}^2 + X_s^2}} \quad (2)$$

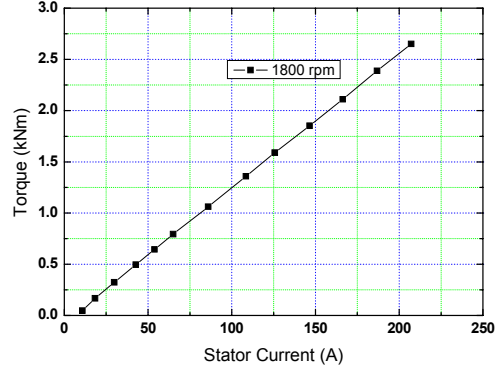
여기서, I_{sc} 는 단락전류,
 E_{ph} 는 상당 발전 전압(상당 역기전력),
 R_{ph} 는 전기자 코일 상당 저항,
 X_s 는 동기리액턴스

단락회로 특성 시험시 전기자 전류는 식 2와 같이 표시되며 이를 이용하여 동기리액턴스 X_s 를 구하였다. 계자전류 30A, 1800rpm에서 발생되는 역기전력은 선간전압 300.7V였고 이는 상전압으로 173.6V가 되고 같은 조건에서 단락전류는 310.8A였다. 상온에서 전기자 코일 상당 저항 R_{ph} 는 0.0965Ω이였으며 이 값을 식 2에 대입하여 동기리액턴스 X_s 를 구하면 0.4643Ω이 된다. 1800rpm에서 회전 주파수는 $2\pi \times 30$ 이므로 동기리액턴스를 이 값으로 나누면 상당 동기인덕턴스는 2.4632mH가 된다. 따라서 정격속도인 3600rpm에서의 동기리액턴스 X_s 는 1800rpm의 두 배인 0.9286Ω이 된다.

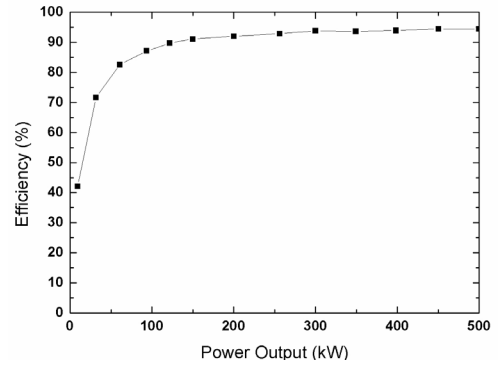
2.2 부하 특성 시험 결과

그림 5는 초전도모터를 인버터를 이용하여 계자 전류 150A, 1800rpm에서 회전시킨 상태에서 다이내모미터를 이용하여 부하를 0에서 정격 토크 2650Nm까지 인가하였을 때 전기자 전류에 따른 발생 토크의

변화를 나타낸다. 그림 6은 부하의 증가에 따른 효율을 보여준다. 시험 설비의 진동 문제 때문에 3600rpm에서 효율 측정은 못했지만 정격 토크 토오크까지 인가하였고, 동일 출력을 내기위해서 3600rpm에서는 1800rpm의 절반의 토오크만 발생시키면 되므로 전기자 전류가 감소하여 그림에서보다 효율이 높게 나올 것이다. 따라서 정격속도인 3600rpm에서는 기존 1MW 유도 모터의 효율인 95%보다 높게 나온다고 할 수 있다. 3600rpm에서 데이터는 얻지 못했지만 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 초전도 모터의 특징인 정격 이하의 부분 부하(Partial Load)에서 높은 효율 특성은 확인할 수 있다.



<그림 5> 전기자 전류에 따른 발생 토크(1800rpm)



<그림 6> 부하에 따른 효율 변동(1800rpm)

3. 결 론

1MW 급의 고온초전도 동기 모터를 최종 조립한 후 극저온 냉동기를 운전하여, 절소와 내온 냉매를 액화하여 고온초전도 계자코일을 목표한 온도인 30~35K로 냉각하여 유지시킬 수 있었다. 냉매를 내온만 사용할 때보다 냉각 시간을 1/3 정도 단축할 수 있었다. 냉각 후 계자코일에 정격 전류 150A까지 통전할 수 있었으며 정격 토크 운전시에도 전류를 유지시킬 수 있었다. 다이내모미터와 초전도모터 사이의 커플링 후 진동 문제로 인하여 3600rpm에서 시험 결과는 얻지 못하였으나, 발전 Mode에서 개방회로 특성 시험과 단락회로 특성 시험을 통하여 역기전력과 동기리액턴스 등을 도출하였다. 또한 구동 인버터를 이용하여 초전도모터를 회전시킨 후 다이내모미터를 이용하여 정격 토크 토오크까지 부하를 인가할 수 있었으며 효율을 측정하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백승규 외, "수냉식 1MW 고온초전도 동기모터의 설계", 한국초전도·저온공학회논문지, 7권 3호, pp.21~28, 2005년 9월
- [2] M. Frank et al., "Long-Term Operational Experience With First Siemens 400 kW HTS Machine in Diverse Configurations" IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 13, No. 2, 2120-2123, JUNE 2003
- [3] A.E. Fitzgerald et al., "ELECTRIC MACHINERY", McGRAW-HILL, 5th edition, pp.216-259, 1991