

고온초전도벌크형 전동기의 특성시험

Performance Evaluation of the HTS Bulk type Motor

심정욱*, 임형우**, 차귀수***

Jungwook Sim*, Hyoungwoo Lim**, Gueesoo Cha***

Abstract : The high temperature superconducting bulk can be used as the rotor of an ac motor. This paper presents the fabrication and test results of a ac motor with HTS bulk rotor. The rotor of a conventional squirrel cage induction motor was replaced with cylinder type YBCO bulk. Height and outer diameter of the HTS bulk was 15mm and 46mm, respectively. Eddy current brake using aluminium disk was used to measure the torque of the HTS motor. No load test, locked rotor test and load test were performed to examine the characteristics of the HTS motor. Test results show the motor can rotate at synchronous speed without any special starting circuit. Maximum output power of the constructed HTS motor was 408W.

Key Words : HTS bulk, rotating field, eddy current break system, load cell

1. 서 론

최근에 들어서 고온초전도체를 이용한 전력기기로는 크게 고온초전도선재와 초전도벌크를 이용한 기기 구분할 수 있다. 고온초전도선재를 이용한 기기로는 변압기나 사고전류제한기 등의 정지기와 대전류를 전송할 수 있는 고온초전도전력케이블을 들 수 있고, 회전기기로는 동기기의 계자권선 등에 사용되고 있다. 초전도벌크는 플라이휠 에너지저장장치에 사용되는 부상 시스템, 비접촉식으로 회전해서 고속회전이 가능한 초전도 자기베어링 등이 있다. 이것은 초전도 벌크에 외부자장을 인가할 경우 벌크의 내부와 표면에서 차폐전류가 발생하는데, 이 차폐전류와 외부자장 사이에 발생하는 부상력을 이용하여 접촉손실이 없는 회전력을 얻을 수 있는 장치이다.

본 논문에서는 이러한 벌크의 특성을 이용하여 유도전동기의 회전자 부분을 고온초전도벌크로 대체한 고온초전도전동기를 제작하고 특성실험을 하였다. 여기서 고정자에서 발생하는 회전자계로 인하여 초전도벌크에서 발생하는 현상은 크게 회전자계에 대해 벌크표면에서 발생하는 차폐전류에 의한 비동기속도회전과

벌크의 착자로 인한 동기속도 회전을 들 수 있다. 이것은 고온초전도벌크회전자가 히스테리시스 현상에 의해 회전하게 되는데 이것은 유도전동기의 자기기동원리와 비슷하지만, 회전자가 동기속도 근처로 회전함에 따라 회전자계에 의해 벌크가 착자됨으로서 동기속도를 낼 수가 있게 되는 것이다.

2. 고온초전도전동기 사양 및 실험장치 구조

기존의 3상 유도전동기에 회전자를 초전도벌크로 대체한 고온초전도전동기를 제작하여 무부하시험, 회전자 구속시험, 부하시험 등을 하였다. 여기서 고온초전도벌크 회전자의 냉각을 위해 전동기가 소형인 것을 감안하여 전동기 전체를 액체질소 내에서 동작하는 구조를 취하였고 전동기의 속도와 토오크를 측정하기 위하여 와전류 브레이크 시스템을 이용하였다. 이것은 전동기의 회전축에 알루미늄 원판을 설치하고 원판에 자장을 인가하게 되면 알루미늄 원판을 통해 전동기의 축에 전달되는 토오크를 로드셀을 이용하여 측정하는 방법이다.

토오크를 측정하기 위해 알루미늄 원판에 인가하는 자장은 Nd계열 자석을 사용하였고, 토오크의 크기를 조절하기 위해 자석을 원판 위에서 수직으로 이동할 수 있게 설치하였다. 그리고 축의 중심으로부터 토오크를 측정하기 위한 로드셀 간의 거리는 114mm이다. 여기서 사용된 로드셀은 약 6kg까지 측정할 수 있는 굽힘형 로드셀로, 상부베어링이 위치하고 있는 판에 고정되어 영구자석에 의해 전달되는 힘을 측정하게 되어있다. 그림 1은 실험에 사용된 토오크-속도 측정기의 구조이다.

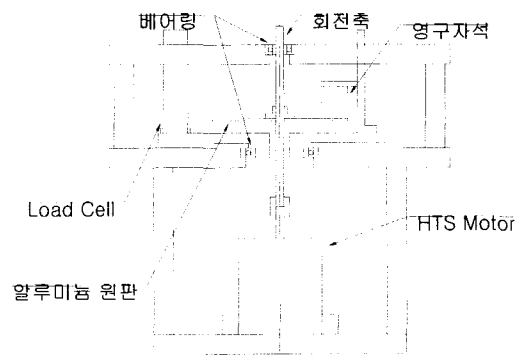


그림 1. 초전도전동기와 토오크 측정장치
Fig. 1. HTS Motor and Torque Measurement System

* 정 회 원 : 순천향대 대학원 전기전자공학과 박사과정

** 비 회 원 : 순천향대 대학원 전기전자공학과 석사과정

*** 정 회 원 : 순천향대 정보기술공학부 교수

원고접수 : 2000년 10월 25일

심사완료 : 2000년 11월 15일

전동기의 고정자는 3상, 4극으로 동작 전압은 208 V, 정격전류는 0.44A인 일반 전동기의 고정자를 사용하였다. 고정자의 높이는 41mm, 고정자 내경은 49mm이다. 회전자에 부착하는 벌크의 재질은 YBCO로서 최대 트랩 자장은 77K에서 축방향일 경우 약 0.6T이고 횡방향에 대해서는 실험에 의해 트랩 자장을 측정하였는데 외부자장을 0.3T와 0.35T로 인가할 경우 각각 0.07T, 0.09T로 트랩되었다.

초전도전동기에서 초전도벌크회전자는 고정자 축방향 길이를 고려하여 직경 46mm, 높이 15mm, 내경 8mm인 2개의 벌크를 접합하여 사용하였다. 여기서 벌크의 직경이 46mm이므로 고정자와 회전자 사이의 공극은 약 1.5mm가 된다. 이것은 기존의 전동기의 공극에 비해 매우 큰 것이지만 극저온상태의 극한 상황에서 기계적인 제약을 감안하여 공극의 크기를 결정한 것이다. 구동부에 해당하는 베어링부의 윤활제는 상온상태에서 회전을 원활하게 주지만 극저온에서는 오히려 윤활제가 냉각되는 관계로 구동에 도움이 되지 않는다. 따라서 각 베어링부의 윤활제를 완전히 제거한 상태에서 실험을 하였다.

그림 2는 전동기의 회전자구조이고, 그림 3은 고온초전도벌크형 회전자이다. 그리고 그림 4는 고온초전도전동기를 고정자와 회전자를 분해한 그림이고, 표 1은 전동기 사양이다.

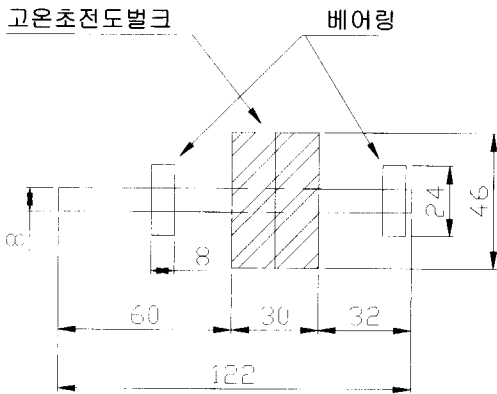


그림 2. 고온초전도전동기의 벌크형 회전자 구조
Fig. 2. Bulk type Rotor of HTS Motor

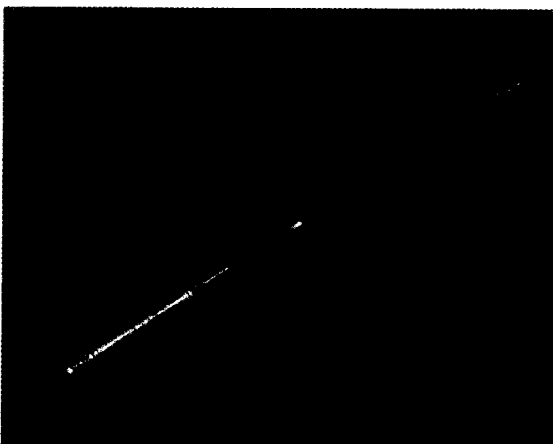


그림 3. 고온초전도벌크형 회전자
Fig. 3. HTS Bulk Type Rotor

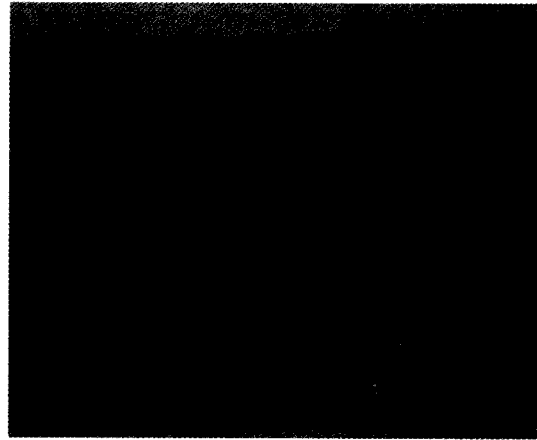


그림 4. 고온초전도전동기의 고정자 및 회전자
Fig. 4. Stator and Rotor of the HTS Motor

표 1. 실험에 사용된 고온초전도전동기 사양
Table 1. Specifications of the HTS Motor

전동기 높이	96mm	회전자 높이	30mm
전동기 외경	86mm	회전자 외경	46mm
고정자 높이	41mm	극수	4극
고정자 내경	49mm	한상당 저항	53.4Ω (10.4Ω at 77K)

3. 고온초전도전동기의 실험

3.1. 회전자계

초전도벌크를 자화시키는 방법으로는 초전도벌크에 자장을 인가한 후에 초전도상태로 만든 경우인 field cooling과 초전도벌크를 초전도상태로 만든 다음에 자장을 인가한 경우인 zero field cooling으로 나눌 수 있다. 고온초전도전동기 실험은 초전도벌크 회전자에 회전자계를 인가하기 전에 액체질소로 냉각시킨 후 회전자계를 인가하는 zero field cooling으로 하였다.

그림 5는 고온초전도전동기의 실험 장치이다. 그림에서 보듯이 회전자측에 연결된 알루미늄원판에서 발생된 토오크를 로드셀로 전달하여 측정할 수 있게끔 제작하였다. 그림 6은 고온초전도전동기의 회전자계를 측정하여 회전자계의 크기가 입력전류에 대해 선형적으로 증가한다고 보고 계산한 것이다. 이것은 고온초전도전동기는 회전자의 재질이 일반전동기와는 달리 초전도체이므로 회전자계가 공급되는 공간은 기존의 회전자의 재료인 철이 차지하고 있는 부분과는 달리 자기저항이 큰 공기 중과 다름이 없으므로 입력 전류의 증가에 따른 회전자계의 포화는 없다고 가정하고 선형적으로 계산하였고, 5A일 때 0.22T가 발생하였다.

3.2. 무부하 시험 및 회전자 구속시험

그림 7은 무부하실험 결과로 고온초전도전동기에 30V부터 208V까지 30V씩 변화를 시키면서 전류와 유효전력, 무효전력을 측정된 결과이다. 이 경우 각 전압에 대해 전동기의 속도는 동기속도인 1800rpm을 유지하여 제작된 고온초전도전동기가 동기속도로 회전

합을 확인하였다.

실험에서 전동기 자체를 액체 질소 속에 넣는 관계로 기존의 고정자 저항은 상온에 비해 대략 1/5 수준으로 감소하게 되고, 회전자측 저항 R_2' 은 초전도체이므로 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 기존의 상온상태에서의 전동기의 상수와 비교해 볼 때 상당히 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 표 2는 초전도전동기의 무부하시험 결과와 회전자 구속시험 결과이다. 유효전력과 무효전력은 2전력계법을 이용하여 측정했다. 고정자 철심에 인가되는 자장의 세기가 0.22T로서 낮으므로 고정자 철심에서 발생하는 철손을 무시하고 초전도벌크형 회전자는 초전도 상태를 유지하고 있기 때문에 저항이 발생하지 않았다고 가정하면 구속시험 시에 발생한 손실 575W는 모두 고정자의 권선에서 발생하는 동손이라고 볼 수 있다.

이로부터 액체질소에 잠긴 상태에서 1상의 권선저항을 계산하면 10.4Ω이다. 고정자가 액체질소에 잠겨 있으므로 고정자권선의 저항이 상온에서의 저항에 비해서 크게 작아지기 때문에 고정자에 기존의 상전도유도전동기 상태에서의 정격전류보다 약 10배에 해당하는 전류가 흘렀고 이 때문에 구속시험시 고정자에서 상당히 큰 손실이 발생했다.

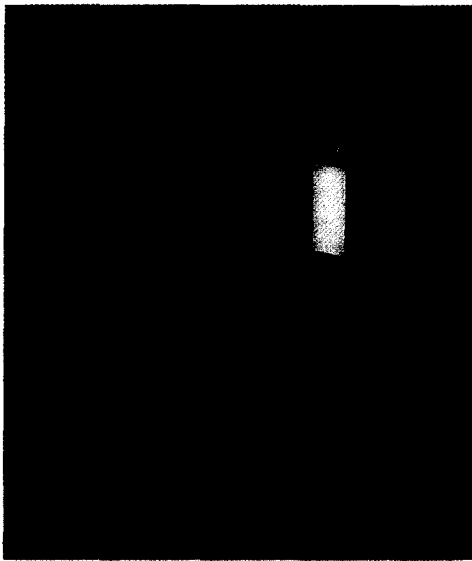


그림 5. 고온초전도전동기의 토크-속도 측정장치
Fig. 5. Torque-Speed meter of the HTS Motor

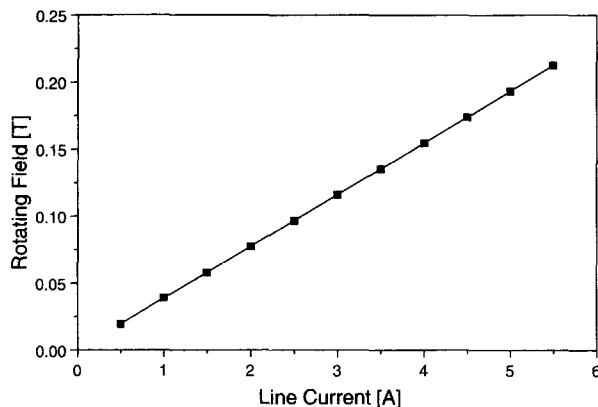


그림 6. 고정자 전류 변화에 따른 회전자계
Fig. 6. Rotating Field for stator current variation

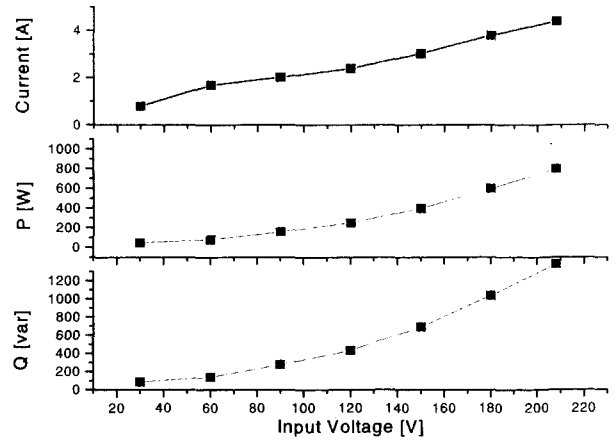


그림 7. 고온초전도전동기의 무부하시험
Fig. 7. Noload Test of the HTS Motor

표 2. 고온초전도전동기 무부하 및 회전자 구속시험
Table 2. Noload and blocked rotor test of the HTS Motor

	RPM	전압 [V]	전류 [A]	유효전력 [W]	무효전력 [var]	cos θ
무부하	1800	208	4.4	800	1385.6	0.5
회전자구속		170	4.3	575	995.93	0.45

무부하손실은 고정자 저항에서 발생하는 동손과 회전자가 액체질소에서 회전할 때에 발생하는 회전손실의 합이므로 측정된 무부하손실 800W로부터 회전손실을 계산하면 225W가 된다. 회전손실이 상당히 큰 이유는 극저온 상태의 실험으로 인하여 측정기기와 전동기 사이의 기계적인 뒤틀림 등에 의해 발생하는 손실과 회전자가 공기 중이 아닌 액체 질소 상에서 회전하기 때문에 발생하는 마찰손실 등으로 볼 수 있다.

3.3. 고온초전도전동기의 토크 및 속도 측정

토크 측정장치를 이용해서 초전도전동기의 토크를 측정한 결과가 표 3이다. 토크를 인가해도 전동기의 회전수가 1800rpm으로 일정한 것을 볼 수 있고 이로부터 초전도벌크 회전자형 전동기가 초전도벌크의 자화에 의해서 회전하는 것을 확인할 수 있다. 로드셀로 측정한 토크가 0.44Nm를 넘으면 토크를 계속해서 증가시켜도 입력전류는 오히려 계속해서 감소하는 것을 볼 수 있고 이는 역율이 증가하기 때문이다. 이와 같은 역율개선 결과로 유효전력은 증가하나 무효전력은 감소했다.

로드셀로 측정한 토크 T 와 전력계로 측정한 전력으로 구한 토크 T_p 를 비교한 것이 표 4이다. 표 4에 표시된 기계적인 출력 P_{mech} 는 식(1)과 같이 전력계로 측정한 전력에서 고정자 동손과 회전손실을 뺀 것이다.

$$P_{mech} = P - 3I^2R - P_{rot} \quad (1)$$

그림 8은 로드셀로 측정한 토크와 전력계로 측정

한 값으로부터 환산한 토오크를 비교한 것이다. 그림 8로부터 로드셀로 측정된 토오크는 입력이 증가해도 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있고 이는 토오크를 로드셀에 전달하는 알루미늄원판을 지지하고 있는 베어링 부분이 동결되어 와전류 브레이크장치가 큰 토오크에서 잘 작동하지 않았던 것으로 판단된다.

입력전압을 120V, 150V, 208V로 변화시키면서 전력계로 측정된 전력으로부터 출력토오크를 계산한 것이 그림 9이다. 그림을 보면 120V에서 0.69Nm, 150V에서 1.06Nm 그리고 210V에서 2.16Nm로 출력이 발생됨을 알 수 있다. 그림 9에서도 전력계로 측정된 값에서 회전손실과 고정자 동손은 제외했다.

표 3. 고온초전도전동기 부하 시험

Table 3. Load test of the HTS Motor

Torque [Nm]	RPM	전압 [V]	전류 [A]	유효전력 [W]	무효전력 [var]
0.028	1800	208	4.4	810	1368.3
0.33	1800	208	4.4	850	1299.0
0.37	1800	208	4.4	900	1212.4
0.44	1800	208	4.4	950	1212.4
0.46	1800	208	3.6	975	822.7
0.47	1800	208	3.45	975	736.1

표 4. 고온초전도전동기의 기계적 출력(Pmech) 및 토오크(Tp)

Table 4. Mechanical power and torque of the HTS Motor

T [Nm]	P_{mech} [W]	T_{mech} [Nm]	역률
0.03	10	0.05	0.51
0.33	50	0.27	0.54
0.37	100	0.53	0.57
0.44	150	0.80	0.60
0.46	375	1.99	0.75
0.47	408	2.16	0.78

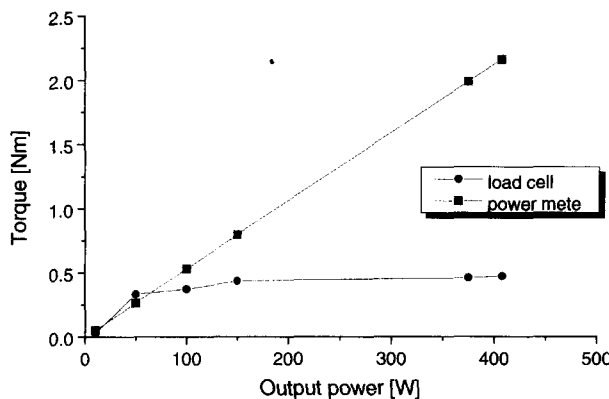


그림 8. 출력과 토오크의 관계
Fig. 8. Output Power and Torque

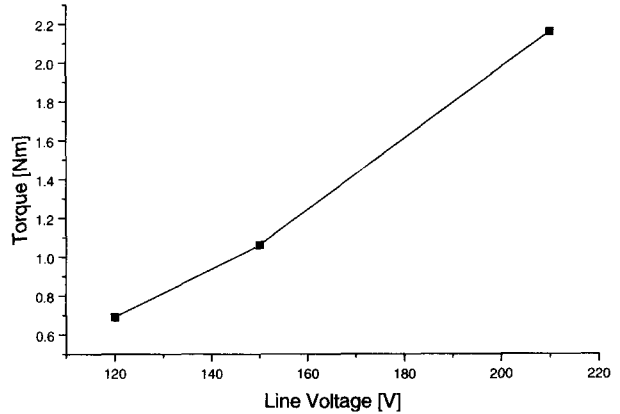


그림 9. 입력전압과 토오크의 비교
Fig. 9. Input Voltage and Torque

4. 결 론

초전도벌크를 회전자로 사용하는 초전도전동기의 제작해서 특성시험을 수행한 결과 전동기가 별도의 기동 회로가 필요없이 스스로 기동하는 것과 동기속도에서 회전하는 것을 확인했다. 이 결과로부터 초전도벌크가 비동기속도에서는 초전도벌크의 표면에 유기되는 차폐 전류에 의해서 유도전동기와 같은 원리로 회전하고 동기속도 근처에서 착자되어 동기전동기와 같은 원리로 회전하는 것을 알 수 있다. 전동기는 2.16Nm의 회전력을 발생했으나 성능은 비교적 낮았다. 그 이유는 전동기의 회전자가 액체질소 속에서 회전하기 때문에 무부하상태에서의 회전손실이 컸기 때문이다.

초전도벌크를 회전자로 사용하는 초전도전동기는 위에서 언급한 대로 비동기속도와 동기속도 모두에서 운전이 가능하고 비동기속도에서 운전할 경우에도 회전자에서 손실이 거의 발생하지 않기 때문에 운전손실이 적고 효율이 높기 때문에 응용분야가 넓을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] X. H. Jiang and A. M. Campbell, "Numerical Calculation of Magnetic Fields in Melt Processed YBCO Magnets," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp.1213-1215, 1997
- [2] J. D. Edick, R. F. Schiferl and H. E. Jordan, "High Temperature Superconductivity Applied to Electric Motors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.2, No.4, pp.189-194, 1992
- [3] John R. Hull, Suvankar SenGupta and J. R. Gaines, "Trapped-Flux Internal-Dipole Superconducting Motor/Generator." IEEE

Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1229-1232, 1999

- [4] L. K. Kovalev, et al., "Hysteresis and Reluctance Electric Machines with Bulk HTS Rotor Elements," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1261-1264, 1999
- [5] B. Oswald, et al., " Superconducting Reluctance Motors with YBCO Bulk Material," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1201-1204, 1997

저 자 소 개



심정욱 (沈政煜)

1970년 10월 19일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정



임형우 (林炯佑)

1972년 1월 18일 생. 1999년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기전자공학과 석사과정



차귀수 (車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수. 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수