

회전자 저항변화에 따른 고온초전도 단락봉을 사용한 농형유도전동기의 속도-토크 특성

Speed-torque Characteristics of the Squirrel Cage Induction Motor with High Temperature Superconducting Rotor Bars by the Variation of the Rotor resistance

심정욱*, 이광연**, 차귀수***, 이지광#

Jung-wook Sim*, Kwang-youn Lee**, Guee-soo Cha***, Ji-kwang Lee#

Abstract: This paper presents the construction and test results of an HTS induction motor. End rings and short bars were made of HTS tapes. To increase the efficiency and starting torque, HTS tapes can be used as the rotor bars. Because large current is induced in the rotor circuit, HTS tapes quench and high starting torque can be obtained. As the speed of rotor builds up, HTS tapes which are used as short bars become superconducting state again. After the HTS tapes recover from quench, resistance of the rotor circuit is nearly zero. In that case, power loss in rotor circuit is eliminated. Stator of the conventional induction motor was used as the stator of the HTS motor. Rated capacity of the conventional motor was 0.75 kW. Performances of the HTS induction motor were compared with those of the conventional motor with same volume and specification. Test result showed that the speeds of the HTS induction motor were the same with synchronous speed up to 2.6 Nm and 1,788 rpm at 9.7 Nm. It guarantees the high efficiency of the HTS motor. Starting torque of the HTS motor was more than twice of the conventional motor.

Key Words: HTS induction motor, HTS tapes, quench, HTS rotor bar.

1. 서 론

최근 개발되고 있는 초전도전동기는 계자코일에 초전도체를 적용한 대형의 고온초전도 동기전동기와 비교적 소형의 고온초전도벌크를 회전자에 적용한 고온초전도 벌크형 전동기로 분류할 수 있다[1,2].

기동토크와 효율과 같은 농형 유도전동기의 특성은 회전자권선의 저항에 따라 결정된다. 기존의 농형 유도전동기의 회전자는 일반적으로 구리나 알루미늄으로 된 단락봉과 단락환으로 구성되어있다. 권선형 유도전

동기는 외부저항을 이용함으로써 회전자회로의 저항을 변화시킬 수 있으나, 농형 유도전동기의 회전자 저항은 고정된 값으로 정해져 있다. 만약, 회전자 저항이 매우 작을 경우 전부하 운전에서는 효율이 높지만 기동토크가 매우 낮은 단점이 있다. 반대로, 회전자저항이 클 경우 기동토크는 크기만 전 부하 운전시 효율이 낮은 단점이 있다. 이러한 양쪽 모두의 단점을 개선하기 위하여, 기동시에는 회전자 저항이 증가하고 전부하시에는 회전자 저항이 감소하는 특성이 필요하다. 이러한 운전 상황에 따라 회전자 저항의 변화를 주는 방안으로 심구형과 이중농형 유도전동기가 사용되어져 왔다. 그러나 심구형과 이중농형 유도전동기의 사용은 기동토크를 증가시키는 효과적인 방법이지만, 전부하 운전시에 효율을 증가시키는데 있어서는 효과적이지 못하다.

만약 기존의 농형 유도전동기의 구리나 알루미늄으로 구성된 회전자 단락봉과 단락환을 고온 초전도체로 대체한다면, 회전자 저항을 광범위하게 변화시킬 수 있다. 고온 초전도 농형 유도전동기의 기동시에 슬립이 1이기 때문에, 회전자회로에 높은 주파수를 갖는 큰 전류가 흐르게 됨으로써 고온초전도 테이프에 퀸치가 발생하게 된다. 따라서 기동토크를 향상시키는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 속도가 증가함에 따라 회전자주파수와 회전자전류가 감소되어 단락봉으로 사용된 고온초전도 테이프는 초전도상태로 회복된다. 만약 단락봉과 단락환 사이의 접촉저항을 무시하면, 회전자회로의 저항은 완전히 영이 된다. 그러한 경우에 있어서, 유도전동기에서 발생하는 회전자 회로의 전력손실은 없어진다. 따라서 고온초전도 농형 유도전동기의 회전자 저항은 0으로 볼 수 있으므로 매우 낮은 슬립 상태에서 큰 전류가 회전자 회로에 흐르게 되고, 넓은 범위의 부하 운전조건에서 거의 0에 가까운 슬립을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 기존의 0.75 kW 농형유도전동기의 고정자에 단락봉과 단락환을 고온초전도 테이프로 제작된 회전자를 설치하여 특성시험을 하였고, 제작된 고온초전도 유도전동기의 고정자와 동일한 사양의 기존 유도전동기와 비교하였다.

2. 고온초전도 농형유도전동기의 설계 및 제작

실험에 사용된 고온초전도 농형유도전동기의 회전자는 기존의 알루미늄으로 된 단락봉과 단락환을 BSCCO-2223 고온초전도 테이프를 사용하여 제작하였다. 고정자는 3상, 0.75 kW, 일반농형유도전동기의 고

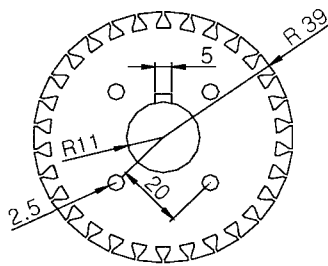
* 정 회 원:한전 전력연구원 위촉연구원
 ** 정 회 원:순천향대학교 전기전자공학과 박사과정
 *** 정 회 원:순천향대학교 정보기술공학부 교수
 # 정 회 원:우석대학교 전기공학과 교수
 원고접수:2004년 7월 5일
 심사완료:2004년 9월 13일

정자를 사용하였다. 초전도유도전동기의 고정자로 사용된 기존농형유도전동기의 사양은 Table. 1과 같다.

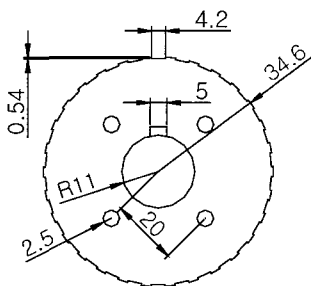
초전도체로 제작된 단락봉과 단락환은 높은 기동토크를 제공할 수 있도록 기동시에는 켄치가 발생하고, 효율을 높이기 위해 정상 운전시에는 켄치로부터 회복되어야 한다. 이러한 높은 효율과 큰 기동토크 특성을 만족하기 위해 고온초전도 테이프를 제작된 단락봉과 단락환의 임계전류, 즉 서로 병렬로 연결된 테이프의 수를 신중하게 결정해야만 한다. 만약, 임계전류가 너무 높으면 고온초전도 테이프는 기동시에 켄치가 발생하지 않을 것이며, 이와는 반대로 임계전류가 너무 낮으면 기동 후 정상운전시 켄치로부터 회복하지 않게 될 것이다. 이를 해결하기 위해서 한 개의 단락봉으로 두 개의 고온초전도 테이프를 병렬로 연결하여 사용하였다. 여기서 사용된 고온초전도 테이프 하나의 임계전류는 자기장계 하에서 115 A이다.

납작한 고온초전도 테이프를 삽입하기 위하여 회전자의 슬롯을 기존유도전동기의 슬롯형상과는 다르게 제작하였다. 초전도유도전동기의 회전자 단면 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (a)와 (b)는 각각 회전자 중심부 철심의 단면과 단락환 철심의 단면이다. 단락환 철심은 회전자 철심에서 나온 각 초전도 단락봉을 결선하기 위해 사용되는 철심이다. 회전자의 외경과 내경은 각각 78 mm, 22 mm이다. Fig. 2는 기존유도전동기와 초전도유도전동기의 농형회전자 구조이다. 단락봉에 배치된 각 고온초전도 테이프는 단락환의 고온초전도 테이프와 접합하였다.

실험에 사용되는 각 전동기에 부하운전 조건을 적용하기 위하여 전기동력계를 사용하였다. Fig. 3은 저온용기에 결합된 고온초전도 농형유도전동기와 전기동력계로 구성된 실험 장치이다. 전기동력계는 저온용기의 상부에 고정하여 연결하였다. 초전도유도전동기의 냉각시스템을 간략화하기 위하여 고정자와 회전을 포함하는 전동기 전체를 저온용기안에 넣고 액체질소에 잠기게 하였다. 실험장치의 총 높이는 1,312 mm이다.



(a) straight part

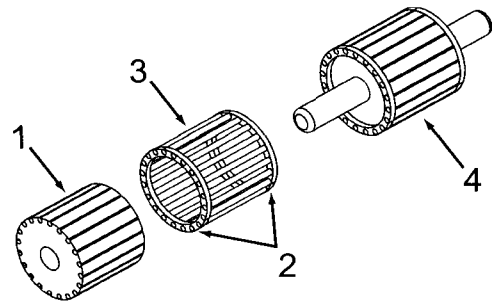


(b) end part

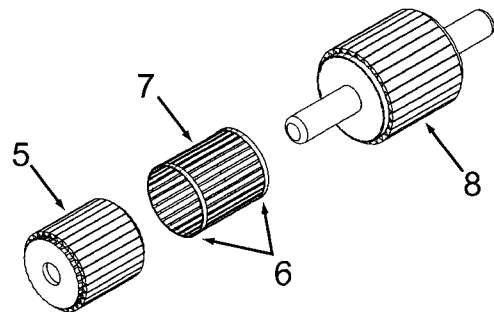
Fig. 1. Cross-section of the HTS rotor.

Table 1. Specifications of the conventional induction motor with squirrel cage rotor.

Capacity	0.75 kW	Voltage	220 V
Current	3.5 A	Rotating speed	1710 rpm
Outer diameter	140 mm	Inner diameter	80 mm
No. of slots	36	No. of poles	4



(a) Conventional motor



(b) HTS motor

Fig. 2. Construction of the conventional motor and the HTS motor.

3. 무부하 시험과 회전자 구속시험

등가회로법을 사용하여 초전도유도전동기의 속도-토크 곡선을 구하였다. 등가회로 상수값을 얻기 위하여, 무부하시험과 회전자구속시험을 수행하였다.

초전도유도전동기의 회전자 구속시험의 경우 회전자에 사용된 고온초전도 테이프에 켄치가 발생한다. 만약 회전자 구속시험 동안 큰 전압을 인가하면 고온초전도 테이프 전체에 켄치가 발생하게 된다. 반면에 작은 전압을 인가하면 부분적으로 켄치가 발생하게 된다. 켄치의 정도에 따라 회전자회로의 저항이 다르기 때문에 각기 다른 속도-토크 곡선을 구할 수 있다. 다

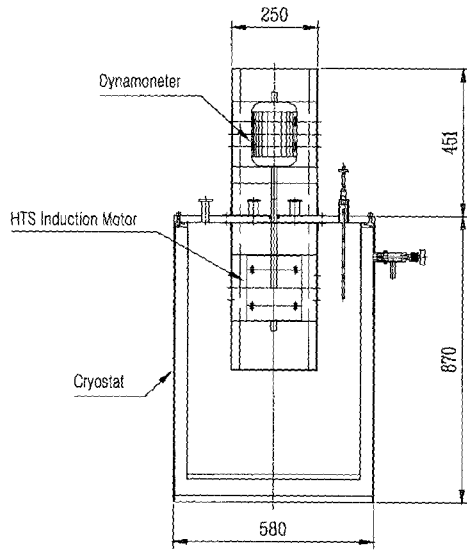


Fig. 3. HTS induction motor coupled with electro dynamometer.

양한 켄치정도에서의 속도-토크 특성을 조사하기 위해서 회전자 구속시험의 경우 낮은 전압부터 전압을 단계별로 인가하였다.

Fig. 4는 각각 다른 인가전압에 따른 속도-토크 곡선들이다. 이러한 곡선을 얻기 위해 무부하시험과 회전자구속시험을 수행하였다. 그림에서 가장 낮은 회전자 저항 0.004 옴은 인가전압 7.4 V에서 얻은 값이며, 가장 큰 회전자 저항 5.059 옴은 인가전압 22.4 V에서 얻은 값이다. 실제 속도-토크 곡선은 이 두 저항값 사이에 존재하게 될 것이다. 또한 고온초전도 테이프는 낮은 회전자 저항곡선에서 초전도상태에 있으며 높은 회전자 저항곡선에서 상전도상태가 되거나 부분적으로 상전도상태가 될 것이다.

4. 속도-토크 곡선

Fig. 5는 초전도유도전동기의 속도-토크에 대한 측정값과 계산 값을 비교한 결과이다. 빈 사각형 기호는 전기동력계를 사용하여 측정한 토크 값이다. 그 밖의 다른 곡선들은 다양한 회전자회로 저항에서 계산된 토크 값들이다. Fig. 5에서 나타난 것처럼 측정된 곡선은 하나의 계산된 곡선과 일치하지 않는다. 실제로 저항은 회전속도가 증가함에 따라 큰 폭으로 변화한다. 기동의 초기에 단락봉과 단락환에 사용된 고온초전도 테이프에는 큰 전류가 흐르게 됨에 따라 켄치가 발생하게 되고 큰 폭으로 저항이 성장하게 된다. 속도가 증가하게 되면 고온초전도 테이프가 켄치로부터 회복되기 시작하기 때문에 저항값은 점차적으로 감소하게 된다. 기동을 마친 후에 고온초전도 테이프는 초전도상태가 되어 저항이 영이 되고 슬립은 완전히 0이 된다.

초전도유도전동기의 속도-토크 경향은 기존유도전동기와 매우 다르다. 기존유도전동기에서 토크는 속도가 증가함에 따라 한 방향으로 증가하고 최대토크에 도달한 후에 0으로 감소하기 시작한다. 잘 알려진 대로 기존유도전동기는 동기속도 하에서 토크가 발생하지 않는다. 회전자저항의 변화는 두 영역으로 간략화 할 수

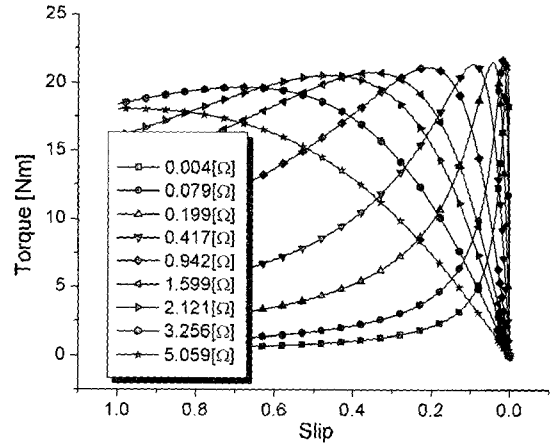


Fig. 4. Speed-torque curves with different secondary resistances.

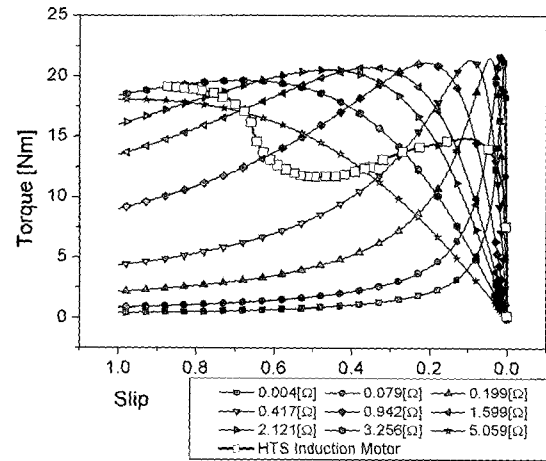


Fig. 5. Comparison of calculated and measured speed-torque curve.

있다. 하나는 기동시의 높은 저항영역을 나타내고, 또 다른 하나는 정상 운전점에서의 낮은 저항영역을 나타낸다.

Fig. 6에서 높은 저항영역과 낮은 저항영역에서의 속도-토크 곡선은 각각 원형 기호와 사각형 기호로 나타내었다. 간단히 말해서, 토크는 먼저 원형기호로 그려진 곡선을 따르다가 사각형기호로 그려진 곡선으로 이동한다.

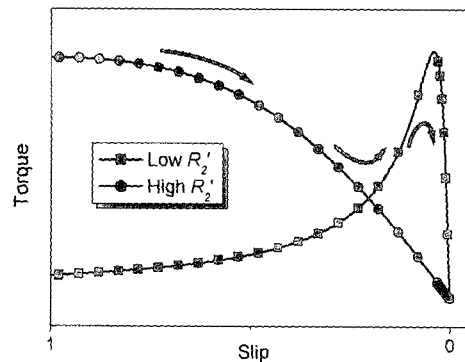


Fig. 6. Speed-torque curve of HTS induction motor with high R_2' at starting and low R_2' at full load.

Fig. 7은 정격 전압에서의 초전도유도전동기와 기존 유도전동기의 속도-토크 특성을 나타낸다. 그림을 보면 0~2.6 Nm의 부하변화에 대해서 초전도유도전동기는 일정속도를 유지함을 볼 수 있다. 반면에, 기존유도전동기는 부하가 증가함에 따라 연속적으로 속도가 감소한다. 2.6 Nm의 부하에서 기존유도전동기의 속도는 1,735 rpm으로 감소한다. 2.6 Nm의 부하는 0.72 kW 전동기 정격토크의 63 %에相当하는 값이다. 양쪽 모두의 전동기에 동일한 고정자를 사용하였으며, 반면에 초전도유도전동기는 구리나 알루미늄으로 구성된 단락봉과 단락환을 고온초전도 테이프로 대체하였다. 기존유도전동기의 정격은 0.75 kW이고 두 전동기의 토크를 측정하기 위하여 전기동력계를 사용하였다.

두 전동기의 공극을 동일한 운전조건을 제공하기 위하여 1 mm로 제작하였다. 1 mm의 공극길이는 일반유도전동기에 비해 매우 큰 값이지만, 두 전동기의 특성 비교를 위하여 동일한 공극 길이로 제작하였다.

Fig. 7을 보면 초전도유도전동기의 기동토크는 기존유도전동기의 2배 정도로 큼을 알 수 있다. 이러한 큰 기동토크로 인하여 초전도유도전동기는 빠른 속도로 가속되어진다. 슬립이 약 0.7에 이르렀을 때, 초전도유도전동기의 발생토크는 급격하게 감소하게 되고, 이는 속도가 증가함에 따라 회전자회로의 저항이 감소함을 의미한다. 회전자속도가 동기속도에 근접할 때 회전자회로의 저항은 완전히 소멸하게 되고 속도는 동기속도에 이르게 된다.

Fig. 8은 슬립 0 근처에서의 기계적 출력 대 슬립 곡선의 비교이다. 470 W까지 초전도유도전동기의 슬립은 0이다. 0.025의 동일 슬립에서 초전도유도전동기의 기계적 출력은 기존유도전동기의 약 2.5배로 측정되었다.

5. 결 론

고온초전도 농형유도전동기는 큰 기동토크와 높은 효율을 제공할 수 있다. 0.75 kW 초전도유도전동기를 제작하고 전동기특성을 조사하기 위하여 특성시험을 수행하였다. 초전도유도전동기의 속도는 정격부하의 63 %까지도 동기속도를 유지함을 확인하였다. 이는 낮은 부하에서는 회전자회로 내에서 전력손실이 발생

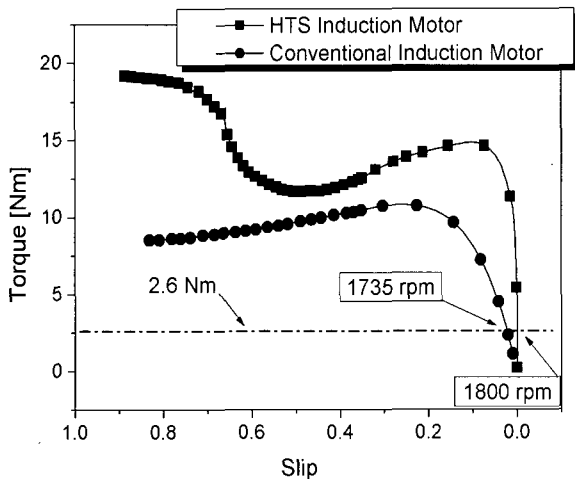


Fig. 7. Comparison of the HTS induction motor and conventional induction motor.

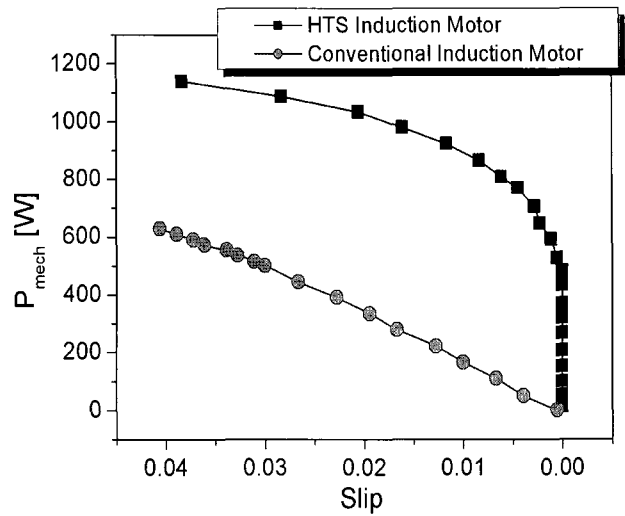


Fig. 8. Mechanical power P_{mech} versus slip.

하지 않음을 의미한다. 초전도유도전동기의 기동토크는 기존유도전동기보다 약 2배정도 더 큼을 확인하였다. 이러한 특성개선은 회전자의 단락봉과 단락환에 사용된 고온초전도 테이프의 저항변화를 이용하여 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 종합적으로 판단할 때에, 초전도유도전동기는 심구형 회전자나 이중농형 회전자를 갖는 기존유도전동기 보다 더 나은 특성을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구과제는 2003학년도 순천향대학교 학술연구조성비 일반연구과제로 지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] J.D. Edick and R.F. Schiferl, "High Temperature Superconductivity Applied to Electric Motors," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.2, No.4, pp.186-193, 1992
- [2] D. Aized, B. B Gambel, A. Sidi-Yekhlef and J.P. Voccio, "Status of the 1,000 hp HTS Motor Development," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.9, No.4, pp.1197- 1200, 1999.
- [3] L. K Kovalev, et al., "Hysteresis and Reluctance Electric Machines with Bulk HTS Rotor Elements," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.9, No.4, pp.1261- 1264, 1999.
- [4] Jungwook Sim, Myungjin Park, Hyoungwoo Lim, Guesoo Cha, Junkeun Ji, and JikwangLee, JikwangLee, "Test of an Induction Motor with HTS wire at end ring and bars," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.13, No.2, pp.2231-2234, 2003.

저 자 소 개



심정욱 (沈政煜)

1970년 10월 10일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 한전 전력연구원 연구원.



이광연 (李光淵)

1973년 2월 5일생. 1999년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



차귀수 (車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학 과졸업(공학박사), 1987년 순천향대 조교수, 1991년 영국 Bath대학 방문교수, 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수.



이지광 (李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 우석대 전기공학과 부교수.