고온초전도단락봉을 사용한 농형유도전동기의 안정영역 특성

論 文
52B-9-3

Performance of the Squirrel Cage Induction Motor with High Temperature Superconducting Rotor Bars at Stable Operating Region

沈 政 煜* · 車 貴 守** · 李 志 光***
(Jungwook Sim · Gueesoo Cha · Jikwang Lee)

Abstract - Motors with HTS wires or bulks have been developing recently. Those are large synchronous motor with HTS wires at the field winding in the rotor, hysteresis and reluctance motors with HTS bulk in the rotor.
This paper presents the fabrication and test results of an HTS induction motor. Conventional end rings and short bars were replaced with HTS wires in the motor. Stator of the conventional induction motor was used as the stator of the HTS motor. Rated capacity and rpm at full rotor of the conventional motor were 0.75[kW] and 1,710[rpm]. Two HTS wires are used in parallel to make the end rings and bars. The critical current of the BSCCO-2223 HTS wire which was used in the bars and end rings were 115[A]. Electrodynamometer was coupled directly to the shaft of the rotor with HTS wires.

Key Words : High Temperature Superconductor, Induction Motor, Critical Current. Quench

1. 서 론

최근 개발되고 있는 초전도전동기는 크게 계자코일에 초전도체를 적용한 고온초전도 동기전동기와 비교적 소형의 간단한 구조로 고출력을 얻을 수 있는 고온초전도벌크형 전동기로 분류할 수 있다[1],[2].

일반적으로 농형 유도전동기의 회전속도, 효율, 운전슬립과 같은 특성은 회전자 권선의 저항에 따라 결정된다. 기존의 농형 유도전동기의 회전자권선 부분은 일반적으로 알루미늄이나 구리로 된 단락봉과 단락환으로 구성되어있고, 회전자 저항의 크기는 권선형 유도전동기와는 달리 고정된 값으로 정해져 있다. 만약, 회전자 저항의 크기가 매우 작을 경우 부하 운전 시 슬립이 낮게 되어 효율이 증가하지만 기동토크가 매우 낮게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 단락봉과 단락환이 BSCCO-2223 고온초전도테이프로 구성된 회전자를 제작하고 이를 기존 유도전동기의 고정자에 설치하여 특성시험을 하였다. 회전자 권선부분을 초전도 상태에서 운전할 경우 회전자측 저항은 접합저항을 제외하고 거의 0이 된다. 따라서 부하 운전시 극히 낮은 슬립상태에서도 높은 회전자 전류가 통전하여 부하가 변동하여도 슬립이 0에 가까워 정속운전이 가능하고 회전자 손실이 없게 되므로 효율이 증가한다.

또한 기존 농형유도전동기의 기동특성을 향상시키기 위해 슬롯이 깊이 패인 단락봉을 갖는 심구형 회전자나 상하 도전율의 차이를 이용한 이중 농형회전자를 사용하는 방안이 있지만 이 두 경우 운전 중의 슬립은 크게 향상되지 않는다. 하지만 고온 초전도 농형 회전자의 경우 초전도체로 구성된 회전자 회로에 부하운전일 때의 회전자 주파수보다 높은 주파수를 갖는 큰 전류가 흐름으로써 퀜치가 발생하고 이에 따라 회전자 저항이 증가하게 된다. 따라서 회전자 회로의 실효저항이 증가하여 기동토크를 향상시키는 효과를 얻을 수 있게 되고, 속도가 증가하면 회전자주파수 및 회전자전류의 크기가 감소되어 회전자는 초전도상태로 회복되고 정상운전이 가능하게 된다.

아직까지는 고정자측을 저온초전도체로 적용한 유도전동기의 사례는 있지만[3], 국내외를 막론하고 회전자를 고온초전도체를 사용한 유도 전동기에 대한 연구개발은 아직 발표된 것이 없다.

2. 고온초전도 농형유도전동기의 설계 및 제작

고온초전도 농형유도전동기의 고정자는 3상, 4극, 220[V], 0.75[kW], 일반농형유도전동기의 고정자를 사용하였다. 고정자 프레임의 외경은 140[mm], 내경은 80[mm]이고 슬롯수는 36, 2층권, 정수슬롯이다. 초전도유도기의 고정자로 사용된 기존농형유도전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 기존유도전동기의 사양

Table 1 Specifications of the conventional induction motor

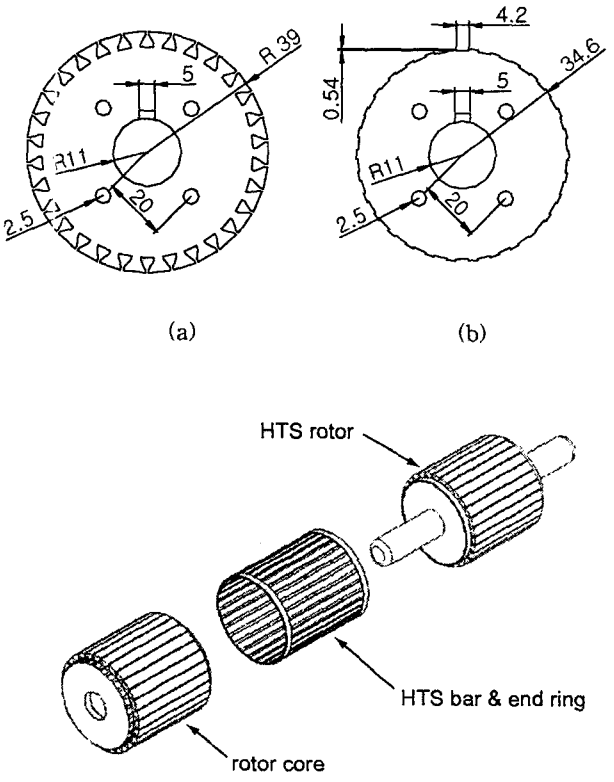
Power	0.75kW	Voltage	220V
Current	3.5A	Speed	1710rpm
Outer diameter	140mm	Inner diameter	80mm
Full load torque	4.1Nm	No. of poles	4

* 正 會 員 : 韓電 電力硏究院 委囑硏究員 · 工博
** 正 會 員 : 順天鄕大學 電氣工學科 敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 又石大學 電氣工學科 副敎授 · 工博
接受日字 : 2003年 3月 10日
最終完了 : 2003年 7月 3日

기존의 농형 회전자는 일반적으로 회전자 내측 슬롯 안에 알루미늄으로 주조시켜 제작되지만 실험에 사용되는 전동기는 초전도체를 적용해야 하므로 회전자 슬롯의 크기를 고온초전도테이프의 폭에 맞추어서 설계하고 각 슬롯에 초전도테이프를 삽입하는 방식으로 하였다. 단락환 부분 역시 일반적으로 알루미늄으로 주조되어 고정되지만 실험에 사용되는 회전자는 고온초전도테이프를 사용하기 때문에 회전자에 지지하기가 어렵다.

이를 해결하기 위해서 단락환 부분으로 10[mm]정도 철심을 늘리고 그 위에 각 슬롯에서 나온 초전도테이프를 또 다른 초전도테이프로 접합하는 방식으로 제작하였다. 접합방식은 회전자 철심의 열용량이 큰 관계로 기존의 인두와 납으로 접합하기 어렵고, 장시간 사용할 경우 선재의 열화가 발생하여 초전도테이프의 성능이 저하된다. 이러한 점들을 고려하여 녹는점이 낮은 인듐을 사용하여 짧은 시간동안 접합하였다[4].

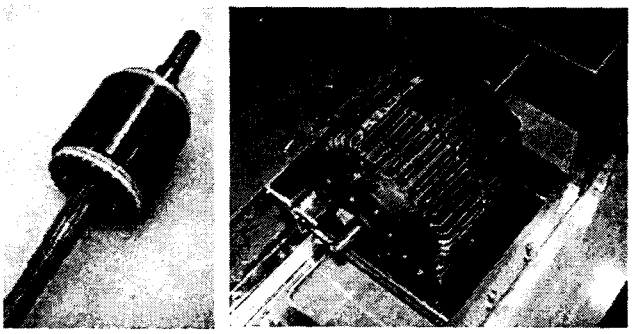
그림 1과 그림 2는 고온초전도체를 적용한 회전자 구조와 제작된 회전자이다.



(a) (b) (c)

그림 1 고온초전도농형유도전동기의 구조
(a) 회전자 철심 (b) 단락환 철심
(c) 회전자 구조

Fig. 1 Construction of the HTS squirrel cage induction Motor
(a) Rotor core (b) End ring core
(c) Construction of rotor



(a) (b)

그림 2 (a) 고온초전도 농형회전자
(b) 제작된 고온초전도 농형유도전동기

Fig. 2 (a) HTS squirrel cage rotor
(b) Manufactured HTS squirrel cage induction motor

그림 1(a)는 회전자중심부 철심의 단면이고 (b)는 회전자 끝부분에 위치한 단락환 철심의 단면으로 단위는 [mm]이다. 그림 1(c)는 회전자의 구조를 나타낸 그림으로 회전자 철심, 단락봉과 엔드링 그리고 이 두가지와 축을 결합한 모습이다.

일반적인 소형 유도전동기에서는 공극을 0.3~0.5[mm] 정도로 제작한다. 공극이 작을수록 여자전류가 감소하고 효율이 좋게 되지만 설계된 회전자는 극저온이라는 극한 조건에서 운전하는 관계로 기계적 뒤틀림 등을 고려하여 1[mm]정도로 결정했다.

기존 농형전동기의 고정자와 위와 같이 초전도체를 사용할 회전자는 액체질소의 온도인 77[K]에서 사용되고 회전자 권선부분에 흐르는 전류는 단락봉에는 90[A], 단락환에는 205[A]로 계산되었다. 회전자에 설치한 고온초전도선은 Bi-2223 선재로 단락봉과 단락환에 임계전류 I_C가 115[A]급 선재를 사용했고, 전류량의 여유분과 접합 등의 문제를 고려하여 각각 두 가닥씩 병렬로 연결하여 제작했다.

표 2는 단락봉과 단락환으로 사용된 고온초전도테이프의 사양이다. 그림 3은 저온용기에 결합된 고온초전도 농형유도전동기와 전기동력계이다. 초전도전동기는 저온용기의 액체 질소 내에서 운전하게 되고 전동기의 축은 진동 등을 고려하여 최대한 짧게 제작하였다.

표 2 고온초전도테이프의 사양

Table 2 Specifications of the HTS tape

Material	BSCCO-2223
Width	4.1mm
Thickness	0.28mm
Matrix	Silver alloy
Twist	No
Critical current	115A at 77K. self-field

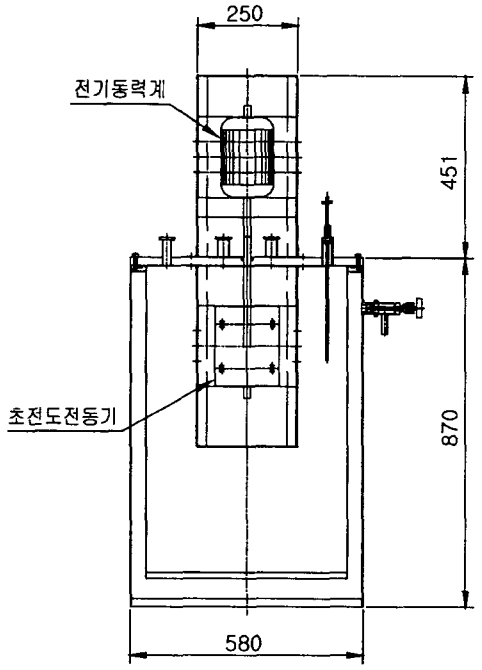


그림 3 고온초전도 유도전동기 실험 장치
Fig. 3 Experimental apparatus of the HTS induction motor

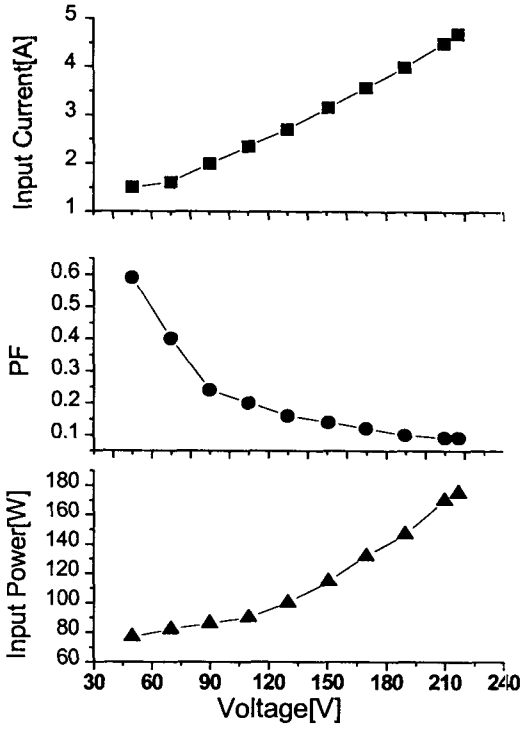


그림 4 고온초전도 유도전동기의 무부하시험
Fig. 4 No-load test of the HTS induction motor

3. 특성실험 및 결과분석

특성실험은 무부하시험, 회전자 구속시험, 부하시험 등 3가지로 나누어서 수행하였고, 실험에 사용된 초전도유도전동기의 고정자와 동일한 사양의 일반 0.75[kW] 농형유도전동기의 특성을 같이 비교하였다. 이 경우 기존의 농형유도전동기는 운전 조건이 다르지만 일반적인 상태의 전동기 비교를 위해 상온상태에서 운전하였다.

기존의 고정자 저항은 상온상태에서 8.1[Ω]이지만 고온초전도 유도전동기의 경우 전동기 자체를 액체 질소 속에 넣는 관계로 대략 1/7수준으로 감소하게 되어 한 상당 1.16[Ω]으로 측정되었다.

3.1 무부하 시험 및 회전자 구속시험

무부하 가변실험은 무부하 상태에서 전압을 80~220[V]까지 20[V]씩 단계별로 증가시키면서 실험을 하였다. 그림 4는 각 전동기의 무부하 실험에서 측정한 전류, 유효전력, 역률이다. 이 경우 인가전압에 대해 초전도유도전동기의 속도는 1,800[rpm]을 유지하였고, 일반유도전동기는 1,799[rpm]이다.

그림 4의 실험 결과 무부하 상태에서 전전압 220[V]를 인가할 경우 초전도전동기의 경우 무부하 손실 P_{NL}은 175[W]로 측정되었다. 여기서 식 (1)을 이용하여 철손은 무시하고 무부하 회전손실 P_{rot}를 계산하면 회전손실은 131.65[W]로 계산된다.

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I^2R \qquad (1)$$

I와 R은 1차측 상전류와 고정자의 한 상당 저항이다.

동일한 방법으로 측정한 일반유도전동기의 무부하손실은 133[W]이고 이 경우 무부하 회전손실은 46.1[W]가 되었다. 회전손실을 비교하면 초전도유도전동기의 경우가 일반유도전동기에 비해 3배정도 크게 나온다. 이것은 일반유도전동기는 제작 공정에서 마찰손을 최대한 줄여서 제작된 반면에 초전도유도전동기의 경우는 재조립과정에 생기는 베어링과 브라켓부분이 맞물려 생기는 마찰손과 액체 질소에 의한 마찰손, 그리고 극저온상태에서 운전하는 관계로 발생되는 기계적 뒤틀림 등에 의한 손실부분이 크기 때문으로 보인다.

표 3은 기존의 전동기와 초전도전동기의 무부하시험과 회전자 구속시험의 결과이다.

실험에 사용된 초전도유도전동기의 경우 공극의 길이를 기존의 전동기에 비해 2~3배정도 더 크게 제작하였고 이 때문에 여자전류가 증가했다. 실험 결과를 보면 무부하전류의 크기가 기존전동기의 경우 2.43[A]인데 반하여 초전도유도전동기의 경우 4.7[A]로 크게 나타났다.

회전자 구속실험은 일반적으로 회전자를 구속시킨 상태에서 전부하전류에 근사한 전류를 인가해야 한다. 하지만 초전도유도전동기 구속시험의 경우 낮은 크기의 구속전류를 인가하여도 초전도 회전자에 임계치 이상의 전류가 유도되어 저항이 성장하게 된다. 또한 인가된 구속전류의 크기에 따라 회전자측 초전도테이프에 발생되는 저항의 크기가 다르게 되어 정확한 특성을 알아볼 수 없게 된다. 그러므로 회전자측 도봉에 임계전류 이하 값이 흐르도록 입력전압을 최대한 낮은 전압부터 단계별로 증가시키면서 측정하여 각각의 회전자 구속시험의 측정값에 대하여 속도-토크곡선을 구했다.

표 3 고온초전도 유도전동기와 기존유도전동기의 무부하시험과 회전자구속시험

Table 3 No-load test and blocked rotor test of the HTS induction motor and conventional induction motor

	Voltage [V]	Current [A]	Power [W]	pf
HTS induction motor				
no-load test	217	4.7	175	0.034
blocked-rotor test	7.4 ~22.4	0.97 ~2.79	1.53 ~18.1	0.12 ~0.16
Conventional induction motor				
noload test	217	2.43	133	0.146
blocked-rotor test	47.8	3.19	180	0.686

3.2 부하 시험

그림 5는 초전도유도전동기의 입력전압을 217[V]로 인가하고 0~6.2[Nm]의 부하를 변화시키면서 속도-토크특성의 안정영역에서 측정한 결과이다. 여기서 안정영역이라 함은 슬립이 0근처로 임의의 부하에 대하여 일정속도를 유지하는 영역으로 속도-토크곡선에서 음의 기울기를 갖는 영역이다. 제작된 초전도유도전동기의 가장 큰 특징으로는 회전속도를 볼 수 있다. 그림을 보면 0~2.6[Nm]의 부하 변화에 대해 초전도유도전동기의 회전속도가 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 회전속도는 1,800[rpm]으로 동기속도와 동일하게 측정되었고, 2.6[Nm]는 기존 0.75[kW] 농형유도전동기의 전부하 용량인 4.1[Nm]의 63[%]정도이다. 동일한 2.6[Nm]의 부하에서 기존전동기의 속도는 1,735[rpm]으로 측정되었고 부하의 증가에 따라 속도가 감소함을 알 수 있다.

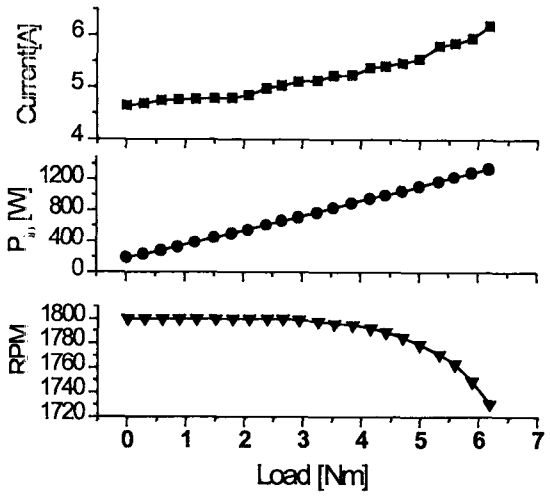


그림 5 고온초전도 유도전동기의 부하시험

Fig. 5 Load test of the HTS induction motor

그림 6은 동일한 입력전압에 대해 기존전동기와 초전도유도전동기의 부하변동에 따른 속도변화를 비교한 것이다. 부하 변동에 따라 기존의 전동기에 비해 속도의 변화가 적은 것을 알 수 있는데 이것은 운전슬립이 매우 낮다는 것을 의미한다. 특히 0~2.6[Nm]에서는 회전속도가 동기속도와 일치하는데 이것은 단락환과 단락봉을 고온초전도테이프로 사용함으로 회전자측 저항(R_2')이 0이기 때문이다. 기존의 전동기의 경우 부하가 약 3[Nm]일 경우 1,735[rpm]인 것에 반하여 초전도전동기의 경우는 1,800[rpm]을 유지함을 알 수 있다. 그림 7과 그림 8은 각 전동기의 슬립의 변화에 따른 입력전력과 기계적 출력의 변화이다. 그림을 보면 두 전동기의 부피 및 입력전압이 동일한 조건인데 반하여 슬립이 0.025일 때 초전도유도전동기의 입력전력은 일반전동기에 비해 2.2배정도 크고 기계적 출력은 2.5배정도 큼을 알 수 있다.

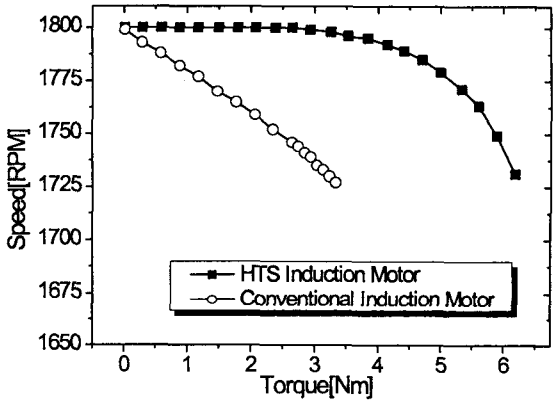


그림 6 기존유도전동기와 고온초전도유도전동기의 속도비교

Fig. 6 Speed of the conventional induction motor and HTS induction motor

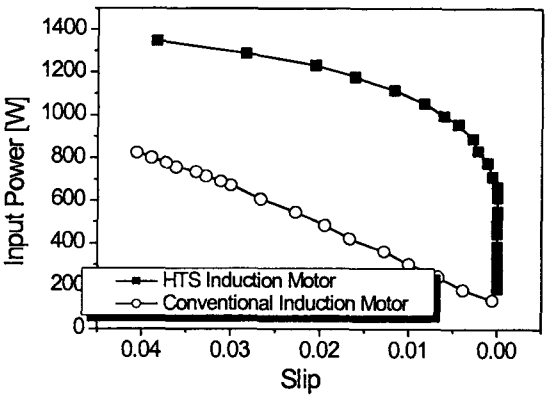


그림 7 슬립의 변화에 따른 입력전력

Fig. 7 Input power versus slip

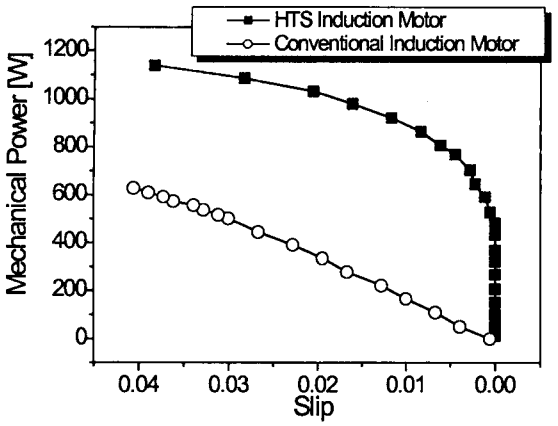


그림 8 슬립변화에 따른 기계적 출력
Fig. 8 Mechanical power versus slip

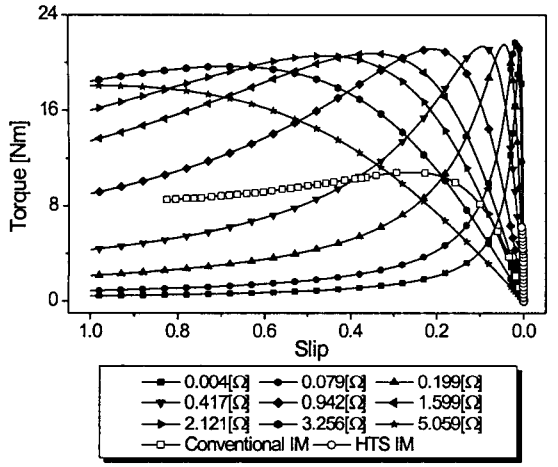


그림 9 고온초전도 유도전동기와 기존전동기의 속도-토크 곡선
Fig. 9 Speed-torque curves of the HTS induction motor and conventional motor

그림 9는 초전도전동기의 무부하시험과 각각의 회전자 구속시험의 결과 데이터에 의해 계산된 속도-토크곡선과 기존 전동기의 속도-토크곡선이다. 그림에서의 각 저항값은 회전자 구속시험에서 0.97[A]부터 2.97[A]까지의 각각의 변화에 대해 계산한 R_2'이다. 초전도유도전동기의 경우 부하증가에 따라 회전자 전류가 증가하게 되고, 회전자 전류의 크기가 임계전류값을 넘을 경우 초전도체로 구성된 단락봉 및 단락환에 저항이 증가하게 된다. 따라서 어느 정도 일정부하에서는 회전자 저항이 거의 0이기 때문에 회전자 속도는 동기속도를 유지하게 되고 일정부하 이상에서는 저항이 성장하여 운전특성이 기존 전동기와는 다르게 나타나게 된다. 그러므로 부하의 크기에 따라 R_2'이 변하여 기존의 계산식으로는 계산할 수 없고 R_2'의 변화를 고려한 새로운 계산 방식을 정립해야 한다.

그림 9에서 ○은 운전영역에서 측정한 초전도유도전동기의 속도-토오크 값으로 부하가 증가하여도 기존전동기에 비해 속도가 크게 감소하지 않고 구속시험에서 가장 낮은 R_2'에 해당하는 경우 0.004[Ω]의 경우와 거의 일치하고 있다.

4. 결 론

본 논문에는 0.75[kW] 농형유도전동기의 회전자를 고온초전도 농형회전자로 바꾸어 실험을 하였다. 실험결과 단락봉과 단락환을 초전도체로 대체함으로써 기존전동기의 전부하용량 4.1[Nm]의 63[%]정도인 2.6[Nm]의 이하에서는 거의 동기속도에 근접하고 있음을 확인하였다. 또한 회전자 구속시험의 경우 구속시험전류의 크기에 따라 회전자측 저항의 크기가 변하게 됨을 확인하였고, 이것은 일정 부하에서는 회전자 저항이 거의 0이지만 그 이상의 부하에서는 저항이 성장하게 됨을 알 수 있었다. 그리고 실험에 사용된 전동기는 극저온에서 운전하기 때문에 공극을 크게 제작하였다. 따라서 여자전류가 증가하여 역률이 나빠지는 문제점이 발생하였고 이에 따른 개선방안이 필요하다. 이것은 향후 대형기기를 연구할 경우 개선해야 할 부분이다.

감사의 글

"이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음" (KRF-2001-042-E00021)

참 고 문 헌

[1] J. D. Edick and R. F. Schiferl, "High Temperature Superconductivity Applied to Electric Motors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 2, No. 4, pp.189-193, 1992

[2] D. Aized, B. B Gamble, A. Sidi-Yekhlef and J. P. Voccio, "Status of the 1,000hp HTS Motor Development," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, No. 4, pp.1197-1200, 1999

[3] A. Ishiyama and K. Hayashi, "Design and Construction of a Superconduction Cylindrical Linear Induction Motor with AC Superconducting Primary Windings," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, No. 2, pp.1217-1220, 1999

[4] J. Sim et al., "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

심 정 욱(沈 政 煜)

1970년 10월 10일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공박), 현재 한전 전력연구원 위촉연구원

E-mail : jwsim@kepri.re.kr

차 귀 수 (車 貴 守)

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

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

이 지 광 (李 志 光)

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

E-mail : jklee@woosuk.ac.kr