

고온초전도 농형유도전동기의 특성

심정욱, 이광연*, 차귀수*, 이지광**

한국전력공사 전력연구원, 순천향대학교*, 우석대학교**

Characteristics of an HTS Squirrel Induction Motor

Jungwook Sim, Kwangyeon Lee*, Gueesoo Cha*, Jikwang Lee**

Korea Electric Power Research Institute, Soonchunhyang Univ.*, Woosuk Univ.**

Abstract - The speed-torque characteristics of the squirrel cage induction motor is determined by the rotor resistance. This paper presents the fabrication and test results of an HTS induction motor. Conventional end rings and short bars were replaced with HTS tapes in the rotor.

Test result shows that the speeds of the HTS induction motor were the same with synchronous speed and the starting torque was about 19Nm.

1. 서 론

유도전동기의 회전자 저항은 전동기 특성에 큰 영향을 준다. 회전자 저항이 작을 경우 운전 중 슬립이 낮아져서 효율이 증가하지만 기동토크가 감소하는 단점이 있고, 회전자 저항이 클 경우 기동 시 토크를 증가시킬 수 있으나 정격운전 시에 효율이 낮아지는 단점이 있다. 권선형 유도전동기의 경우는 회전자 저항의 크기와 외부에서 조절하여 기동특성 및 운전특성을 향상시킬 수 있지만, 농형유도전동기의 경우 보통 회전자 저항이 고정되어 있기 때문에 농형유도전동기의 제작 시 회전자저항의 크기에 따라 전동기 특성이 결정된다.

기존 농형유도전동기의 특성을 향상시키기 위한 회전자 저항 가변 기술에는 회전자 철심에 슬롯이 깊게 파인 단락봉을 가지는 심구형 회전자와 회전자 철심에 상하로 도전율의 차이를 갖는 단락봉이 설치된 이중 농형회전자 가 있다. 이러한 회전자의 경우 기동 시 회전자 저항이 커져서 기동토크가 증가하게 되며 운전 시에는 회전자 저항이 작아져 농형유도전동기의 운전특성이 향상된다. 그러나 이 두 경우에도 운전 중의 슬립은 크게 향상되지 않는 않는다.

농형 유도전동기의 회전자 회로에 기존의 상전도체 대신 고온초전도체를 사용하면, 초전도상태에서의 유도전동기는 부하운전 시 극히 낮은 슬립상태에서도 높은 회전자 전류가 통전하여 부하가 변동하여도 슬립이 0에 가까워 정속운전이 가능하고 회전자 손실이 거의 없게 되므로 효율이 증가한다. 또한 기동 시에는 초전도체로 구성된 회전자 회로에 부하운전일 때의 회전자 주파수보다 높은 주파수를 갖는 큰 전류가 흐름으로써 펜치가 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.

본 논문에서는 0.75[kW] 일반 농형유도전동기의 고정자에 단락봉 및 단락환이 BSCCO-2223 고온초전도테이프로 이루어진 농형회전자를 제작, 설치하여 특성시험을 하였고, 운전 조건이 다르지만 어느정도 비교 기준

을 마련하기 위해 실험에 사용된 초전도유도전동기의 고정자와 동일한 사양의 일반 0.75(kW) 농형유도전동기의 특성을 같이 비교하였다.

2. 고온초전도 농형유도전동기의 제작

고온초전도 농형유도전동기의 고정자는 3상, 4극, 220[V], 0.75[kW] 농형유도전동기의 고정자를 사용하였다. 초전도유도기의 고정자로 사용된 전동기의 기존 사양은 표 1과 같다.

기존 농형회전자의 구조는 그림 1(a)와 같이 구리나 알루미늄 같은 상전도체로 제작된 단락봉 및 단락환이 회전자 슬롯에 삽입된 형태이지만 실험에 사용되는 전동기는 초전도체를 적용해야 하므로 임계전류가 115[A]인 고온초전도테이프를 사용하여 그림 1(b)와 같이 각 슬롯에서 나온 초전도테이프를 또 다른 초전도테이프로 접합하는 방식으로 제작하였다(1)(2). 그림 1(a)의 ①은 회전자 철심, ②, ③은 기존 상전도체로 제작된 단락봉과 단락환이며, ④는 조립된 형태이다. 그림 1(b)의 ⑤는 고온초전도테이프를 삽입할 수 있도록 테이프 형상에 맞춰 슬롯을 낸 회전자 철심이고 ⑥, ⑦은 고온초전도테이프로 제작된 단락봉과 단락환이다.

일반적인 소형 전동기에서는 공극이 0.3~0.5[mm] 정도로, 공극이 작을수록 여자전류가 감소하고 효율이 우수하지만 설계된 회전자는 극저온이라는 극한 조건에서 운전하는 관계로 기계적 뒤틀림 등을 고려하여 1[mm]정도로 결정하였다. 그림 2(a)는 고온초전도 농형회전자이고 그림 2(b)는 제작된 고온초전도 농형유도전동기이다.

Table 1. Specifications of the conventional induction Motor.

정격전력	0.75[kW]	정격전압	220(V)
정격전류	3.5[A]	정격속도	1710[rpm]
고정자외경	140[mm]	고정자내경	80[mm]
전부하용량	4.1[Nm]	극수	4

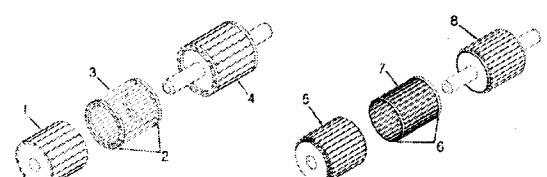


Fig. 1 Squirrel cage rotor of induction motors
(a) Conventional motor (b) HTS Motor

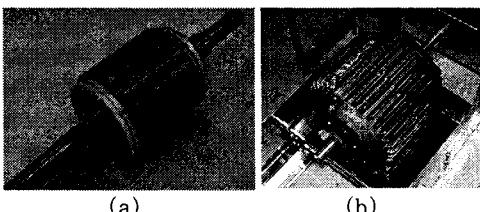


Fig. 2 Rotor and assembled HTS induction motor
(a) rotor (b) assembled motor

3. 특성시험 및 분석

고온초전도 농형유도전동기의 특성시험은 무부하시험, 회전자 구속시험, 부하 시험, 속도-토크 측정 등 4가지로 나누어서 수행하였고, 표 1의 초전도유도전동기의 고정자와 동일한 사양을 갖는 0.75[kW] 농형유도전동기의 특성시험을 통하여 비교하였다. 실험에서 전동기 자체를 액체 질소 속에 넣는 관계로 기존의 고정자 저항은 상온상태에서 $8.1[\Omega]$ 이지만 대략 $1/7$ 수준으로 감소하게 되어 한 상당 $1.16[\Omega]$ 으로 측정되었다.

3.1 무부하 시험 및 회전자 구속시험

표 2는 무부하 시험과 회전자 구속시험의 결과이다. 무부하 시험은 부하가 없는 상태에서 217[V]의 입력전압을 인가하여 수행하였다. 이 경우 초전도유도전동기의 속도는 1800[rpm]을 유지하였고, 일반유도전동기는 1799[rpm]으로 측정되었다.

실험 결과 무부하 상태에서 전전압을 인가할 경우 초전도전동기의 경우 무부하 손실 P_{NL} 은 175[W]로 측정되었다. 여기서 식(1)을 이용하여 철손은 무시한다고 보고 무부하 회전손실 P_{rot} 를 계산하면 131.65[W]이다.

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

여기서 I 와 R 은 1차측 상전류와 고정자의 한 상당 저항이다.

동일한 방법으로 측정한 일반유도전동기의 무부하손실은 133[W]이고 이 경우 무부하 회전손실은 46.1[W]이다. 회전손실을 비교하면 초전도유도전동기의 경우가 일반유도전동기에 비해 3배정도 크게 나온다. 이것은 초전도 유도전동기의 회전자를 재조립하는 과정에서 베어링과 브라켓 부분에서 맞물려 마찰손이 기존전동기에 비해 크게 발생하고 회전자가 액체질소 내에서 회전하기 때문이다.

회전자 구속시험의 경우 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 허르드록 입력전압을 최대한 낮은 전압부터 단계별로 증가시키면서 측정하여 각각의 회전자 구속시험의 측정값에 대하여 속도-토크곡선을 구했다. 그림 3은 각 구속시험 결과에 따라 계산한 속도-토크 곡선이다. 무부하 시험과 각각의 구속시험의 결과에 따라 회전자저항 R_2' 이 변화한다고 예측했으므로 각 경우에 대한 R_2' 을 구하여 각 경우에 따라 속도-토크 곡선을 그렸다. 결과를 보면 R_2' 이 가장 적은 $0.004[\Omega]$ 은 구속시험의 입력이 가장 낮은 $7.4[V]$, $0.97[A]$, $1.53[W]$ 의 경우이고, $5.059[\Omega]$ 은 입력이 가장 큰 $22.4[V]$, $2.79[A]$, $18.1[W]$ 이다.

Table 2. No-load test and blocked rotor test of the HTS Induction motor and conventional induction motor.

	전압 [V]	전류 [A]	P [W]	ρf
초전도유도전동기				
무부하	217	4.7	175	0.034
회전자구속	7.4 ~22.4	0.97 ~2.79	1.53 ~18.1	0.12 ~0.16
일반 유도전동기				
무부하	217	2.43	133	0.146
회전자구속	47.8	3.19	180	0.686

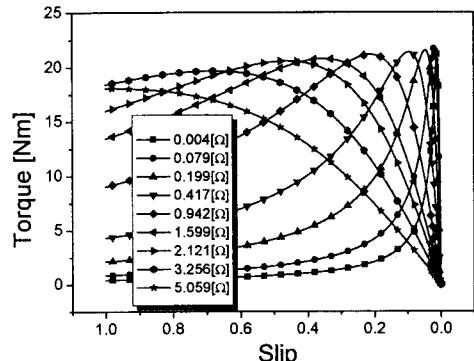


Fig. 3 Calculated speed-torque curve.

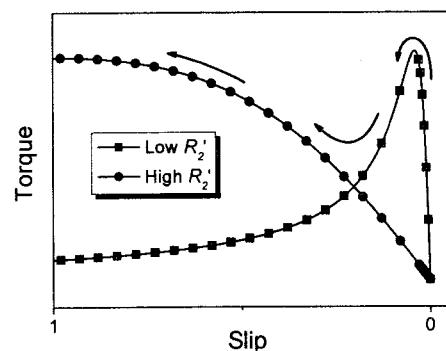


Fig. 4 Speed-torque curve of HTS induction motor with high R_2' at starting and low R_2' at full load.

그림 3에서 R_2' 이 작을 경우는 회전자 단락봉 역할을 하는 초전도테이프가 초전도상태라고 예측되는 부분으로 부하에 대하여 슬립이 매우 작음을 알 수 있고, R_2' 이 클 경우는 회전자측 초전도테이프가 초전도상태를 잃고 상전도상태로 전이된 상태이다. 따라서 실제 초전도유도전동기의 운전은 이러한 회전자 저항의 변화에 따른 합성된 형태의 곡선을 가지게 되어 그림 4와 같은 형태로 나타나게 된다.

3.2 부하 시험 및 속도-토크 측정

그림 5는 기존 유도전동기와 초전도유도전동기의 입력전압을 217[V]로 인가할 경우 부하의 변화에 따른 속도를 비교한 그림이다. 초전도유도전동기의 가장 큰 특징으로는 회전속도를 볼 수 있는데 그림 6을 보면 0~2.6[Nm]의 부하 변화에 대해 기존 전동기에 비해 초전도유도전동기의 회전속도가 거의 변하지 않음을 알

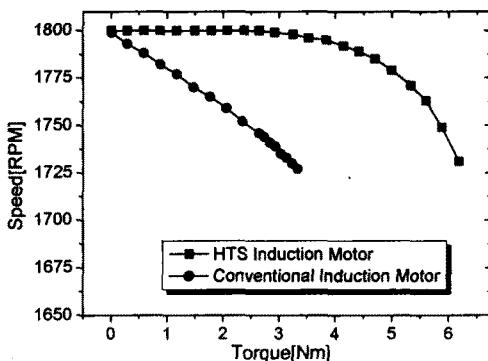


Fig. 5 Comparison of the conventional induction motor and HTS induction motor

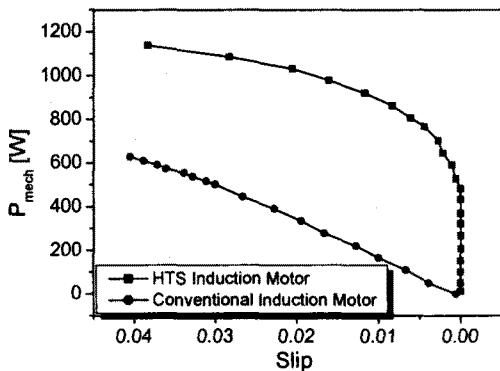


Fig. 6 Mechanical power P_{mech} versus slip

수 있다. 이 경우 회전속도는 1800[rpm]으로 동기속도와 거의 동일하게 측정되었고, 2.6[Nm]는 기존 0.75[kW] 농형유도전동기의 전부하용량인 4.1[Nm]의 63[%]정도이다. 동일한 2.6[Nm]의 부하에서 기존전동기의 속도는 1735[rpm]으로 측정되었고 부하의 증가에 따라 속도가 감소함을 알 수 있다.

그림 6은 각 전동기의 슬립의 변화에 따른 기계적 출력 P_{mech} 의 변화이다. 그림을 보면 초전도 유도전동기의 경우 기계적 출력이 약 470(W)정도에서도 슬립이 거의 0을 유지함을 알 수 있고, 0.025일 때 초전도유도전동기의 P_{mech} 은 일반전동기에 비해 2.5배정도 큼을 알 수 있다.

그림 7은 그림 3의 무부하시험과 회전자 구속시험에 의해 각각 계산된 속도-토크 곡선과 측정된 초전도유도전동기의 속도-토크 곡선을 비교한 그림이다. 여기서 보면 슬립이 0근처에서의 값에서 차이가 발생하는데 이것은 초전도유도전동기에 토크가 크게 증가하면서 회전자 측 저항의 값이 슬립의 변화에 따라 증가되기 때문으로 보여진다. 여기서 보면 슬립이 1근처로 갈수록 토크값이 계산값과 근접함을 알 수 있다.

그림 8은 초전도유도전동기와 동일한 고정자를 사용한 0.75(kW) 일반 농형유도전동기의 속도-토크 곡선을 비교하였다. 실현에 사용된 초전도유도전동기의 공극의 크기는 동일한 고정자를 사용하는 기존유도전동기의 공극보다 더 크기 때문에 여자전류의 증가로 말미암아 전체 사용되는 전력소모량이 증가된다. 따라서 동일한 여자전류 및 공극 조건을 주기 위해 기존 유도전동기의 회전자를 초전도유도전동기와 같은 1[mm]의 공극을 가지도록 가공하였다. 물론 기존의 농형회전자의 구조에 따라서 전류분포가 어느 정도 다를 수도 있지만 크게 차이가 적지 않는다는 가정 하에 비교하였다. 그림을 보면 기존전동기와 동일한 전압조건에서 출력이 더 증가함을 알 수 있다.

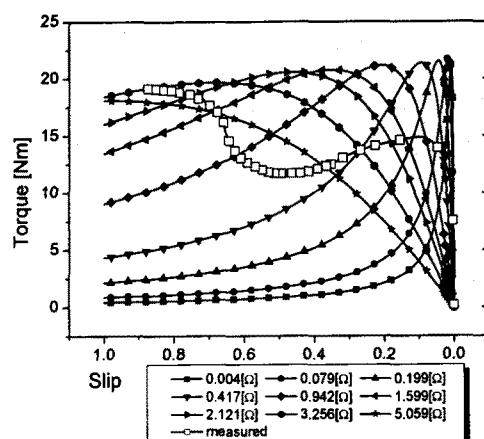


Fig. 7 Comparison of calculated and measured speed-torque curve.

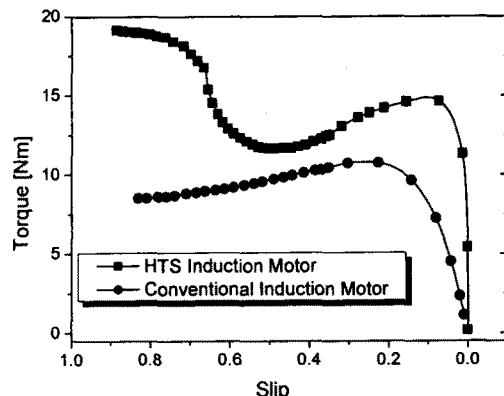


Fig. 8 Comparison of the HTS Induction motor and conventional induction motor

3. 결 론

회전자 회로를 초전도체로 대체할 경우 기존의 상전도 유도전동기에 비해 슬립이 0근처에서 부하증가가 증가하더라도 속도변화가 거의 없음을 확인하였고 슬립이 1근처로 갈수록 토크가 크게 증가함을 실험을 통하여 확인하였다. 이것은 초전도 유도전동기가 운전 중에는 회전자 회로가 초전도상태를 유지하여 어느 정도 부하가 변하더라도 회전자 회로에는 속도를 유지할 수 있는 충분한 전류가 통전하여 슬립이 0근처를 유지하게되고, 슬립이 1근처에서 토크가 크다는 것은 슬립의 증가에 따라 회전자 회로가 초전도상태를 잃어 저항이 증가하기 때문으로 심구형이나 이중농형 회전자와 마찬가지로 기동특성을 향상시킬 수 있게된다.

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

참 고 문 헌

- [1] 심정욱, 임형우, 차귀수, “고온초전도체를 이용한 농형유도전동기 특성시험”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환 시스템학회 추계학술대회 논문집, pp.68-70, 2001.
- [2] J. Sim et al., “Test of an Induction Motor with HTS wire at end ring and bars,” The Applied Superconductivity Conference, Huston, Texas, August 6, 2002