

소용량 고온초전도동기모터의 제작 및 특성 실험에 관한 연구

송명곤 · 윤용수* · 홍계원** · 장인배*** · 고태국
 연세대학교 전기공학과, *안산공과대학, **한국원자력연구소, ***강원대학교 정밀기계공학과

The Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Small-Scaled High-Tc Superconducting Synchronous Motor

Myungkon Song, YongSoo Yoon*, GyeWon Hong**, InBae Jang***, Taekuk Ko
 Yonsei University, *Ansan College of Technology, **KAERI, ***Kangwoon University

Abstract - This paper describes a series of experiments investigating the operational characteristics of high-Tc superconducting synchronous motor of five to six hundred watts capacity. In this experiment, ac 220V stator phase voltage and DC 4A excitation current are used, and the synchronous speed runs at 1800rpm. Hall Sensors are installed on the pole face and at the side of the Ag/Bi-2223 high-Tc superconducting tape in order to analyze the effect of the time-varying magnetic field on the motor performance when the load changes its value. The experimental observations are compared with the theoretical predictions.

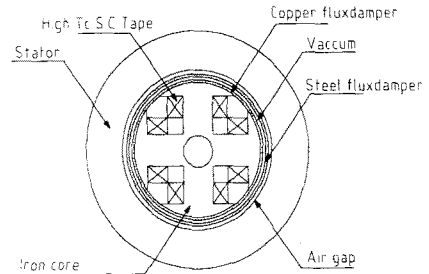


그림.1 고온초전도동기모터의 구조
 Fig.1 The structure of the motor

1. 서 론

본 논문은 목적은 상용화 급과 같은 구조를 가지는 500-600와트급 고온초전도동기모터의 설계 및 제작기술의 습득에 있다. 첫째로 설계프로그램을 이용하여 500와트 4pole의 고온초전도동기모터를 설계하였다. 또한 설계프로그램의 결과에 따른 각 부분의 파라미터 값들을 적용하여 특성해석 프로그램을 이용하여 고온초전도동기모터의 특성을 분석하였다. 마지막으로 4pole 중 1pole을 tape 선재로 나머지 pole을 동선으로 권선하여 부하를 변화시키면서 예비특성실험 한 결과를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 고온초전도동기모터의 설계 및 제작

실제 제작한 고온초전도동기모터는 설계프로그램의 결과를 토대로 하여 제작되었다. 다음은 고온초전도동기모터 각 부분을 설명한 것이다.[1]

2.1.1 전기자

전기자는 기존의 상전도동기모터의 것을 사용하였다. 결선은 Y결선을 하였으면 각 상당 전압은 220V로 공급하였다. 전기자의 내·외경, 슬롯 개수, 폭 및 피치는 설계프로그램의 결과에 따라 출력 500와트를 예상하여 도출하였다. 전기자 및 회전자의 구조는 다음 그림.1과 같다.

2.1.2 회전자

설계한 모터의 회전자는 순동 및 스테인레스-스틸을 재료로 flux damper를 회전자 외부에 가진다. 또한 이 두 flux damper 사이의 진공층을 1mm로 하였다. 또한 여자권선으로 사용되는 고온초전도tape선재의 안정성을 고려하여 공극에서의 자계의 크기를 0.1T로 하여 설계프로그램의 결과를 얻었다.[2]

2.1.3 설계 프로그램의 결과

표.1은 고온초전도동기모터 설계프로그램결과의 각 파라미터 값들을 나타낸다.

2.2 고온초전도동기모터의 특성해석

2.2.1 특성해석을 위한 모델

고온초전도동기모터의 동작은 전기자 및 여자권선에 의해 발생된 자계의 상호작용에 의해 구동된다.

모터가 정상상태로 운전하고 있을 경우는 전기자 및 여자권선에 의한 자계가 일정 각을 유지하며 회전한다. 그러나 부하변동이 생기면 일정 각을 유지하며 회전하던 여자권선 및 전기자권선에 의한 자계사이의 각의 크기가 증가 또는 감소한다. 이 순간 모터의 내부에(철심 및 공극)에 시변자계가 발생하게 된다.

이러한 조건 아래서 고온초전도동기모터운전 중 Flux damper에 의한 시변자계의 차폐정도 및 전체시스템의 특성에 미치는 영향을 알기 위해서는 고온초전도동기모터의 전기적인 등가회로가 필요하다.

다음 그림.2 중 위의 회로는 그림.1의 구조를 가지는 고온초전도동기모터의 여자와 3상전기자 및 Flux damper를 포함한 전기적인 등가회로이고 그림.2 중 아래의 회로는 3상의 전기자회로를 하나의 회로로 가정한 고온초전도동기모터의 전기적인 등가회로이다. 다음은 그림.2의 전기적인 파라미터들이다.

표.1 설계프로그램 결과

TABLE.1 Design Program Results

| | | |
|------------|---------------------|------------------|
| δ | 공극길이 | 0.50(cm) |
| B_g | 공극에서의 자장크기 | 0.10(wb/m^2) |
| b_i | 극의 폭길이 | width5.87(cm) |
| N_{slot} | 각슬롯당도선수 | 63.4(turns) |
| AT_f | 회전자자극당amper · turns | 631.1(A · turns) |
| L | 전기자의 내경 | 17.4(cm) |

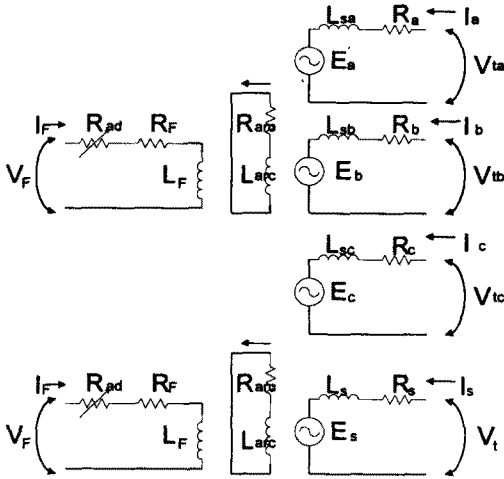


그림.2 플럭스댐퍼를 고려한 전기적 등가회로
Fig.2 The electrical equivalent circuit including the flux damper

R_F =여자권선 저항 L_F =여자권선 인덕턴스
 V_F =여자권선 입력전압 R_S =전기자권선 저항
 L_S =전기자권선 인덕턴스 V_T =전기자권선 입력전압
 R_{ad} =Flux damper 저항 L_{ad} =Flux damper인덕턴스

그림.2의 전기적등가회로를 이용하여 고온초전도동기모터의 지배방정식을 구하면 다음과 같다.(3)

$$\Lambda = LI \quad (1)$$

$$V = RI + \frac{d\Lambda}{dt} = RI + I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt} = RI + I\dot{L} + L\dot{I} \quad (2)$$

식 (2)를 유한차분법을 적용하기 위해 \dot{I} 에 관해서 풀면 다음과 같다.(4)

$$\dot{I} = L^{-1} [V - [R + \dot{L}]I] \quad (3)$$

식 (3)을 유한차분법을 적용하면 다음과 같다.

$$I[n+1] = I[n] + L^{-1} [V[n] - [R + \dot{L}]I[n]] \Delta t \quad (4)$$

식(4)에 쓰인 전기적 파라미터들의 행렬은 다음과 같다.

$$I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_{ad} \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_f \\ v_{ad} \end{bmatrix} \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \\ \lambda_{ad} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{ad} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aad} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bad} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cad} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} & L_{fad} \\ L_{aad} & L_{bad} & L_{cad} & L_{fad} & L_{adad} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\dot{L} = \begin{bmatrix} \dot{L}_{aa} & \dot{L}_{ab} & \dot{L}_{ac} & \dot{L}_{af} & \dot{L}_{aad} \\ \dot{L}_{ba} & \dot{L}_{bb} & \dot{L}_{bc} & \dot{L}_{bf} & \dot{L}_{bad} \\ \dot{L}_{ca} & \dot{L}_{cb} & \dot{L}_{cc} & \dot{L}_{cf} & \dot{L}_{cad} \\ \dot{L}_{fa} & \dot{L}_{fb} & \dot{L}_{fc} & \dot{L}_{ff} & \dot{L}_{fad} \\ \dot{L}_{aad} & \dot{L}_{bad} & \dot{L}_{cad} & \dot{L}_{fad} & \dot{L}_{adad} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2.2 시뮬레이션결과

flux damper를 고려한 특성해석시뮬레이션의 결과는 다음과 같다. 모터가 정지한 상태에서 무부하로 운전시킨 후, 5초후 약 250W의 부하를 가하고, 다시 5초가 지난 후 500W의 부하를 증가시키는 형태로 시뮬레이션을 하였다.

그림.3은 부하변동시 전기자의 3상 권선에 흐르는 전류의 변화이다. 약 2초의 과도상태를 거친 후 모터가 정상상태로 회복됨을 알 수 있다. 그림.4는 여자권선에 흐른 전류의 변화곡선이다. 여자권선에 DC전류를 가했음에도 과도상태시에 전기자권선 및 여자권선의 인덕턴스 변화에 의해 AC전류가 유기 됨을 알 수 있다. 또한 플럭스 댐퍼에도 수 A단위의 전류가 유기 됨을 알 수 있다. 이것은 salient pole의 경우 전압이 전류의 변화뿐만 아니라 인덕턴스의 변화에 의해서도 유기 되기 때문이다.

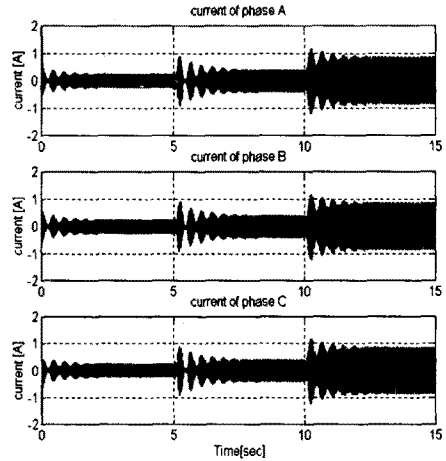


그림.3 전기자권선에 흐르는 전류변화
Fig.1 The current change in the stator winding

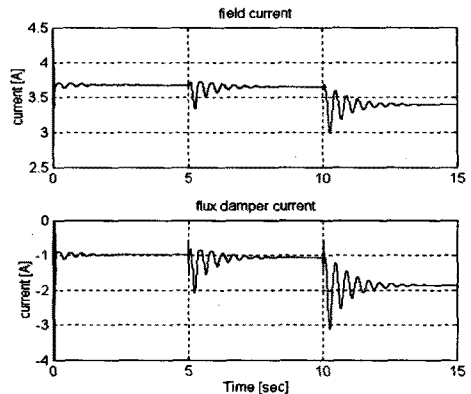


그림.4 여자권선 및 플럭스댐퍼에서의 전류변화
Fig.4 The current change in the rotor winding and flux-damper

2.3 고온초전도동기모터의 실험결과

회전자의 4 pole 중 1 pole에는 고온초전도 tape 선재를 감고, 나머지 3 pole에는 일반 구리선으로 권선을 하였다. 각 pole에서 나오는 amper·turns 가 균형을 이룰 수 있도록 유의하여 권선하였다.

이 실험의 목적은 4 pole 전부를 고온초전도 tape선재로 권선 하여 실험할 때 어떠한 문제점이 발생하는가를 미리 예상하기 위한 데 있다.

다음의 그래프들은 회전자내부의 온도가 77 K를 유지하면서 1800rpm의 속도로 각 pole에서의 amper·turns가 450일 때의 실험결과를 나타내고 있다.

부하의 크기가 350와트에서 450와트로 변동될 때의 회전자내부의 온도는 온도센서를 이용하여 측정하였는데, 75K 와 85K 사이의 온도를 유지하였다.

그림5 및 그림6은 각각 350와트 및 450와트의 부하가 모터의 축에 걸렸을 때의 전기자전류를 나타낸다. 그림7은 회전자권선 중 고온초전도 tape선재에 가해진 여자전류이다. 그림8은 출력그래프이다. 여자전류 및 출력곡선에서 보는 것과 같이 특성곡선이 0.2A 및 50와트 범위 내에서 진동하는 것을 볼 수 있다. 이는 베어링 및 전기자가 액체질소의 영향으로 냉각되어 일어나는 결과로 생각된다.

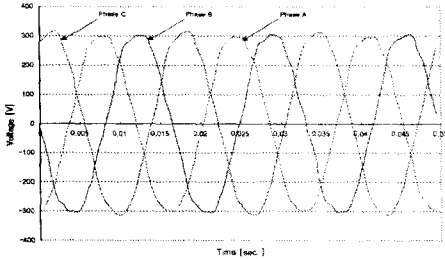


그림.5 전기자 각 상당 전압

Fig.5 The phase voltage of the stator windings

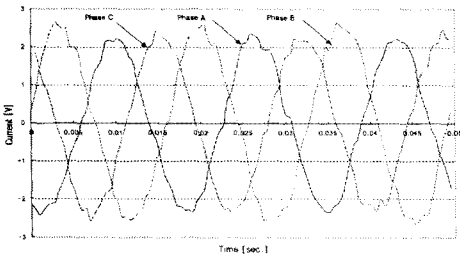


그림.6 350와트 부하시 전기자 전류

Fig.6 The current of the stator windings with 350watt load

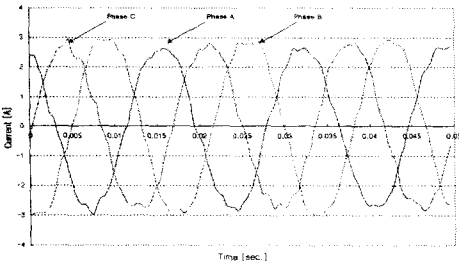


그림.7 450와트 부하시의 전기자 전류

Fig.7 The current of the stator windings with 450watt load

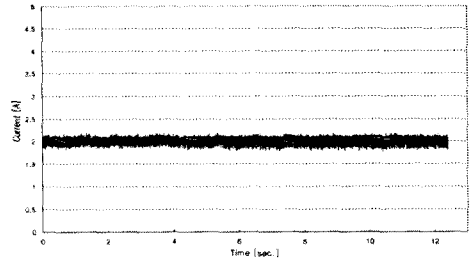


그림.8 고온초전도tape선재의 여자전류

Fig.8 The current of the high-Tc superconducting tape

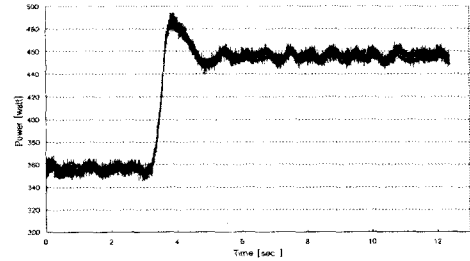


그림.9 고온초전도동기모터의 출력곡선

Fig.9 The output power of the high-Tc superconducting synchronous motor

3. 결 론

본 논문은 500와트급 고온초전도동기모터의 설계에서부터 특성해석 및 1 pole을 초전도tape선재를 이용해 권선 한 후 특성실험까지의 결과 비교 분석하였다.

전기자전류의 경우 실험에서의 전류 치가 특성해석시물레이션의 결과치 보다 크게 측정이 되었다. 이는 2층의 flux damper층사이의 진공층의 진공도가 설계치 보다 낮아 베어링 및 회전자와 고정자사이의 공극이 냉각되어 Torque Meter에서 가한 부하보다 많은 기계적인 부하가 모터에 작용한 것으로 생각된다.

이러한 문제점은 고용량의 고온초전도동기모터 개발 시에는 충분히 제거될 수 있을 것으로 예상된다. 왜냐하면 고용량 급을 설계 제작할 시에는 진공층의 진공도를 충분히 강화시켜 회전자 내부와 외부의 열 교환을 막을 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Musong Oho, Design of electrical machines, Hyungsul, pp. 60-123, 1993
- [2] J. W. Lue, M. S. Lubell, "Quenches in a high-temperature superconducting tape and pancake coil" IEEE Trans. on Cryogenics, vol. 36, no. 5, pp. 379-389, 1996
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, Electric Machinery, McGraw Hill Book Company, New York, pp 147-310, 1992
- [4] W. H. Press, S. A. Teukolsky, Numerical Recipes in C, Cambridge Univ. Press, New York, pp. 707-747, 1992.