

고온초전도동기모터의 시변자계에 따른 회전자의 손실 해석에 관한 연구

송명곤 · 윤용수\* · 장원갑 · 장인배\*\* · 이상진\*\*\* · 고태국

연세대학교 전기공학과, \*안산공업전문대학 전기과, \*\*강원대학교 정밀기계공학과, \*\*\*위덕대학교 전기공학과

A Study on the Analysis for Electrical Losses of the Rotor considering Time Varying Field of High Tc Superconducting Synchronous Motor

Myung Kon Song · Yong Soo Yoon\* · Won Kap Jang · In Bae Chang\*\* · Sang Jin Lee\*\*\* · Tae Kuk Ko\*  
 Dept of Electrical Engineering, Yonsei University · \*Dept of Electrical Engineering, \*Ansan Technical College · \*\*Dept of Precision Mechanical Engineering, Kangwon National University · Dept of Electrical Engineering, Uiduk University

Abstract - This paper presents the ac losses simulation in the rotor having an high-Tc superconducting field winding using Ag sheathed Bi-2223. The analysis was conducted with an equivalent model of the high-Tc superconducting motor under transition condition during the load that varies from 250watt to 500watt. The simulation results show that the transient state lasts for about 2 seconds, and the ac losses decreased exponentially from the initial value above 2 watts.

1. 서 론

고온초전도체동기모터는 회전자 내의 초전도테이프가 외부의 시변자계에 따른 영향을 최소화하기 위하여 전기자와 회전자 사이에 flux damper를 사용한다. 그러나 부하가 변동할 때 저주파로 침투하는 시변자계는 skin depth를 고려할 때 한계가 있다고 볼 수 있다. 본 연구는 모터의 실제 운전 중에서 부하가 변동할 때 발생하는 외부의 시변자계에 따른 고온초전도용 BSCCO테이프 선재의 손실을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 결과를 예상하고 이에 따른 모터의 안정적인 운전 조건을 제시하고 설계할 때 필요한 파라메타를 제시하는데 목적이 있다.

2. 본 론

일반적으로 초전도체에 직류를 저항없이 흘릴 수 있다. 그러나 교류 및 시변자장 하에서는 손실이 발생하게 된다. 고온초전도모터가 정상상태에서 동작할 때는 모터 내부에 시변자장이 발생하지 않는다. 그러나 모터에 부하가 증가하는 순간마다 전기자에서 발생하는 자장과 계자 축에서 발생하는 자장사이에서 slip이 생겨 모터가 정상상태로 회복할 때까지 모터내부에는 시변자장이 발생하게 된다. 이 시변자장은 전기자 및 회전자의 철심부분에 손실을 발생시킬 뿐 아니라 계자권선인 고온초전도테이프 선재에도 교류손실을 발생시켜 모터가 안정하게 동작하는데 나쁜 영향을 미친다. 따라서 이 시변자장을 플럭스댐퍼를 통해 어느 정도 차폐를 시켜 모터의 동작을 안정화시킨다.[5] 본 연구에서는 부하 증가시 발생하는 시변자장에 따른 고온초전도테이프 선재에서의 교류손실을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 알아보겠다.

2.1 고온초전도모터 회전자 내부의 시변자계

실제 제작된 고온초전도모터는 그림 1의 단면도와 같은 구조를 가진다. 모터의 동작은 전기자 및 계자권선에

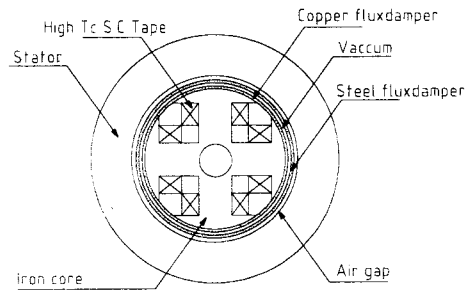


그림 1 회전자의 구조

Fig. 1 The structure of the rotor

의해 발생한 자계의 회전에 의해 구동된다. 전기자권선에는 60Hz의 주파수를 가지는 교류가 흐르고, 전기자 권선에 의해 만들어진 자장은 전기자의 구조가 3상이기 때문에 자계의 크기는 일정하고 모터중심을 축으로 하여 회전하는 형태를 가진다. 즉 전기자권선의 한 상에 대해 만들어지는 자계는 전기자전류와 마찬가지로 60Hz를 가지지만 전체적인 3상 구조에 대하여서는 회전하는 일정크기의 자장 값을 가진다.

또한 계자에 의해 생성되는 자장은 계자전류가 직류이기 때문에 이 또한 일정크기를 가지는 자장이다. 따라서 모터가 정상상태로 운전하고 있을 경우는 전기자 및 계자 축의 직류자장이 일정한 각을 유지하며 돌기 때문에 시변자계가 발생하지 않는다. 그러나 모터의 축에 부하가 걸리면 계자 쪽의 자계 및 전기자 축의 자계가 일정 각을 유지하며 돌다가 이 각의 크기가 증가 또는 감소한다. 이 순간 모터의 회전자 내부의 철심 및 공극에 시변자계가 존재하게 된다. 따라서 모터의 시변자장의 차폐를 위해 설치한 동 및 스테인레스강을 재질로 하는 플럭스댐퍼를 설치하였다.

계자전류에 의한 공극에서 자계  $B_{air}$  는 다음과 같다.

$$B_{air} = \frac{4\mu_0 N_i f}{\pi Pole g} \quad (1)$$

$N$  = 여자권선 turn수

$g$  = air gap 길이

초전도모터의 특성해석프로그램에서 초전도모터의 출력을 구하였다. 일반적으로 모터의 출력을 이용하여 전기자 부분에 의한 자계는 다음과 같은 식으로 나타낸다

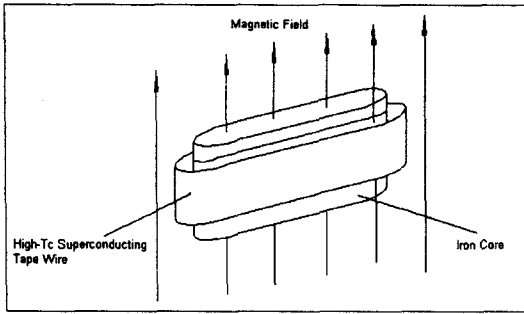


그림 2 계자권선에 가해진 자계 모델의 개략도  
Fig. 2 Schematic drawing of field winding applied magnetic flux

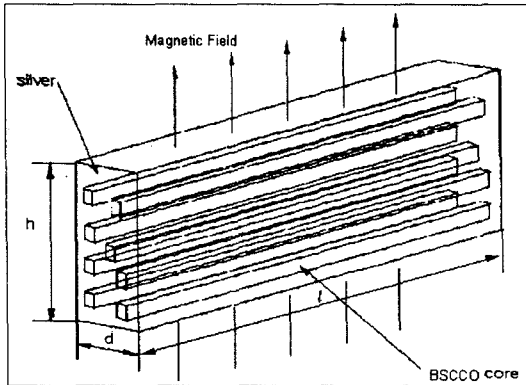


그림 3 초전도테이프선재에 가해진 시변자계의 개략도  
Fig. 3 Schematic drawing of superconducting taped winding applied time varying field

$$B_{sair} = \frac{T}{\left(\frac{Pole}{2}\right)^2 \frac{\mu_0 \pi D l}{2} B_{rair} \sin \delta_{sr}} \quad (2)$$

$T$  = 출력 토크

$\delta_{sr}$  = 부하각

$Dl$  = 철심의 단면적

위의 식에서 출력토크와 계자전류에 의한 공극의 자계를 안다면, 전기자권선에 의한 공극에서의 자계를 구할 수 있다. 공극 내에서의 자계의 세기는 다음과 같다.

$$B_{air} = B_{rair} + B_{sair} \quad (3)$$

초전도모터의 flux shield를 통과하는 시변자계가 플럭스댐퍼에 의해 어느 정도 차폐가 되는 지를 알기 위해서는 맥스웰방정식(maxwell equation)이용한 wave equation을 해석하면 차폐정도를 알 수 있다. 플럭스댐퍼를 통과한 후의 자계의 크기는 감쇄계수를 구한 다음 공극에서의 자계에 곱해 주면 된다. 플럭스댐퍼를 통과한 자계의 크기는 다음과 같다.

$$\text{amp}(B_{shield}) = \text{amp}(B_{air}) e^{-\alpha_{copper} x} e^{-\alpha_{stian} x} \quad (4)$$

$\alpha_{copper}$  = 동의 감쇄계수 [ $N_p/m$ ]

$\alpha_{stian}$  = 스테인레스강의 감쇄계수 [ $N_p/m$ ]

표 1 고온초전도 계자선재의 제원

Table 1 Specifications on high- $T_c$  superconducting field wire

재 질	Ag 피복 Bi-2223
Bi-2223 점적율	전체단면에서 약 70%
두께	0.23mm
폭	2.5mm
필라멘트 외경	10-30 $\mu$ m
필라멘트 개수	55
1극 당 턴수	123 Turn

표 2 플럭스댐퍼의 재질 제원

Table 2 Material specifications on flux damper

공극 길이	6mm	
동의 도전율 ( $\sigma_{copper}$ )	$1.5 \times 10^8$	at 100K
동의 투자율 ( $\mu_{copper}$ )	$4\pi \times 10^{-7}$	at 100K
스테인레스강의 도전율 ( $\sigma_{stain}$ )	$1.8 \times 10^6$	at 100K
스테인레스강의 투자율 ( $\mu_{stain}$ )	$12.67 \times 10^{-7}$	at 100K

## 2.2 고온초전도 tape선재의 교류손실 해석

제작한 고온초전도동기모터의 구조는 4극의 형태를 가진다. 각 극(pole)에 설치된 선재의 턴수 및 성질 그리고 침투한 시변자계가 같다고 가정하고 한국에 대하여 그림 1과 같이 모델을 설정한 후 교류손실을 해석하겠다. 일반적으로 철심을 사용한 동기모터의 구조에서 자로를 벗어난 누설자계(leakage flux)는 철심에서의 자장의 약 10% 정도이다. 따라서 앞에서 구한 철심에서의 시변자계 중 약 10%가 tape선재에 다음과 같은 형태로 가해진다고 가정한다. 그림 2와 같이 고온초전도테이프 선재에 수직으로 자계가 가해진다. 아래 그림은 pole에 감긴 초전도tape선재를 펼친 형태에 대하여 교류자장이 인가되는 모습이다.

그림 3에서 보는 것과 같이 초전도테이프선재에 교류자장이 인가되면 전압이 유도되고, 이 전압에 의해 선재 내부에 전류가 흐르게 된다. 길이방향으로 유도된 전류는 임계전류값을 넘지 않는 양은 BSCCO코어로 흐르고 나머지는 은을 통하여 흐르게 된다. 선재의 끝 부분에서 두께방향(silver matrix)으로 전류가 통로를 만들어 흐르게 된다. 따라서 은을 통과하는 전류에 의해 손실이 발생하게 된다. 앞의 과정을 다음과 같이 유도전압, 전체 전류경로에 대한 저항, 그리고 전류에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 유도전압  $V_{ind}$ 는 다음과 같다.

$$V_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dAB_{app}}{dt} \quad (5)$$

$A$  = 단면적

유도전류  $I_{ind}$ 는 다음과 같다.

$$I_{ind} = \frac{V_{ind}}{R_{silver}} \quad (6)$$

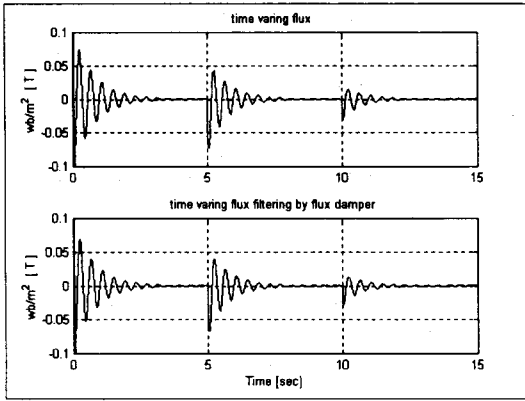


그림 4 부하변동시 공극에서의 자계 변화  
Fig. 4 The flux change in the air gap

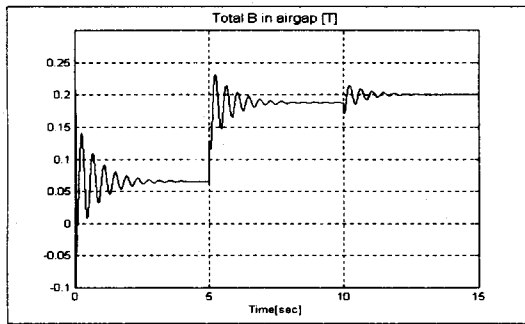


그림 5 공극에서의 전체 시변자계  
Fig. 5 Total time varying field in the air gap

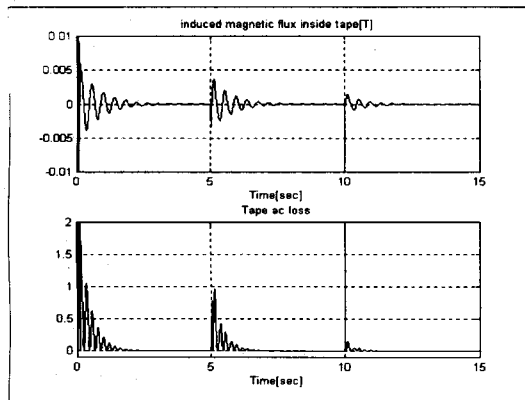


그림 6 초전도테이프선재의 시변자계와 교류손실  
Fig. 6 Time varying field and AC losses in the superconducting tape

은의 저항  $R_{silver}$  는 다음과 같다.

$$R_{silver} = 4 \cdot \rho_{silver} \left( \frac{d}{l \cdot h} + \frac{l}{d \cdot h} \right) \quad (7)$$

$\rho_{silver}$  = 은의 고유저항

선재에서 발생한 교류손실  $P_{acloss}$  는 다음과 같다.

$$P_{acloss} = I_{ind} \cdot V_{ind} \quad (8)$$

단위 면적당 선재의 교류손실  $P_{density}$  는 다음과 같다.

$$P_{density} = \frac{I_{ind} \cdot V_{ind}}{l \cdot h \cdot d} \quad (9)$$

### 2.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 시뮬레이션에 사용된 고온초전도테이프의 제원은 표 1에 나타나 있으며 공극길이 및 플럭스댐퍼에 사용된 재질의 제원은 표 2에 나타나 있다.

플럭스댐퍼를 고려한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 모터가 정지한 상태에서 무부하로 운전시킨 후, 5초 후 약 250W의 부하를 가하고, 다시 5초가 지난 후 500W의 부하를 증가시키는 형태로 시뮬레이션을 하였다. 그림 4는 전기자권선 및 여자권선에 의해 공극에 유입된 자계의 변화를 보여준다. 약 2초의 과도상태를 거친 후 모터가 정상상태로 회복됨을 알 수 있다. 공극에서의 자계 또한 부하가 변동할 때 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 플럭스댐퍼에도 수 A단위의 전류가 유기 됨을 알 수 있다. 이것은 salient pole의 경우 전압이 전류의 변화뿐만 아니라 인덕턴스의 변화에 의해서도 유기 되기 때문이다. 그림 5는 공극에서의 전체자계의 변화를 보여 주고 있다. 그림 6의 상단 그래프가 플럭스댐퍼에 의해 약 10%차폐된 시변자계의 변화 그래프이다. 그림 6의 하단 그래프를 보면 초전도테이프의 교류손실이 무부하에서 기동시 2W 이상이 발생되어 급격히 감소되는 것을 볼 수 있으며 이를 고려하여 냉각시스템에서 필요한 냉매를 충분히 공급하여야 함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 고온초전도모터의 구조에 따른 고온초전도테이프 선재의 손실을 통하여 설계 시에 필요한 파라메타 등을 알 수 있었고 초전도체의 특성으로 인하여 부하가 변동할 때 외부에서 침투하는 시변자계의 영향에 매우 민감한 것을 알 수 있었다.

플럭스댐퍼를 고려한 고온초전도동기모터의 컴퓨터시뮬레이션 결과 부하가 변동할 때 동기속도인 1800rpm에서 4A의 계자전류 공급시 무부하 상태에서 부하를 각각 250W, 500W로 변동할 때 과도 현상이 2초 동안 지속되는 것을 알 수 있었다. 테이프선재에서 발생하는 교류손실은 무부하에서 기동시 약 2W 이상이 발생되어 감쇄되므로 이를 고려하여 냉각시스템의 설계 파라메타도 알 수 있었다.

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지절약 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, Electric Machinery, McGraw Hill Book Company, New York, pp 147-310. 1992
- [2] Simon Foner and Brian B. Schwartz, Superconducting Machines and Devices, Plenum Press, New York, chap.5. 1974
- [3] Denis O' Kelly, Performance and Control of Electrical Machines, McGraw Hill Book Company, London, chap.7. 1992
- [4] W. J. Carr, Jr, AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp 128-130, 1993
- [5] 송명곤, 윤용수의 3인 "고온초전도동기모터의 부하변동시 Flux Damper의 특성해석", 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, p24-27, 1998