

고온초전도동기모터의 부하변동에 따른 계자권선의 교류손실 해석에 관한 연구

論 文
48B-4-4

A Study on the Analysis for Ac-losses of the Field Winding considering Load Changes of High-Tc Superconducting Synchronous Motor

尹庸銖* · 宋命坤** · 張源喆*** · 張仁培[§] · 洪啓源^{§§} · 李相鎭^{§§§} · 高太國[#]
(Yong Soo Yoon · Myung Kon Song · Won Kap Jang · In Bae Chang · Gye Won Hong · Sang Jin Lee · Tae Kuk Ko)

Abstract - The use of high-Tc superconducting synchronous motor in power machinery has many advantages such as reduced power dissipation, size and weight. This paper presents the ac loss simulation in the rotor having a high-Tc superconducting field winding using Ag sheathed Bi-2223. The analysis was conducted with an equivalent model of the high-Tc superconducting motor with flux damper under transition condition during which the load varies from 0 watt to 250watts and from 250watts to 500watts. The simulation results show that the transient state lasts for about 3 seconds, and the ac losses decreased exponentially from the initial value above 20mW.

Key Words : high-Tc superconducting synchronous motor, ac-losses, Ag sheathed Bi-2223

1. 서 론

고온초전도동기모터는 일반동기모터와는 다르게 효율 향상을 위하여 회전자의 계자권선으로 고온초전도테이프선재를 사용한다. 일반적으로 초전도체에 직류를 저항 없이 흘릴 수 있다. 그러나 교류 및 시변자계 하에서는 손실이 발생하게 된다 [1,2]. 고온초전도동기모터는 정상상태에서는 전기자의 회전자계를 제외하고는 시변자계가 발생하지 않으나 과도상태에서 외부의 부하가 증감할 때 회전자와 전기자에 시변자계가 발생한다고 할 수 있다. 이와 같이 외부에서 계자권선으로 침투하는 시변자계에 따라 발생하는 초전도테이프의 손실을 최소화하기 위해서는 외부의 시변자계가 초전도테이프에 영향을 미치지 않도록 적절하게 차단하여야 한다.

따라서 본 모터에서는 전기자와 계자인 회전자 사이에 시변자계의 차단을 위하여 플럭스댐퍼(flux damper)를 사용하였다. 그러나 플럭스댐퍼를 사용하여 전기적 특성을 해석한 결과 시변자계의 크기 및 주파수에 따라 차단할 수 있는 데는 한계가 있다 [3]. 본 연구는 모터의 실제 운전 중에서 부하가 변동할 때 발생하여 플럭스댐퍼를 투과하여 침투한 외부의 시변자계에 따른 고온초전도 은피복Bi-2223테이프 선재의 손실인 와류손

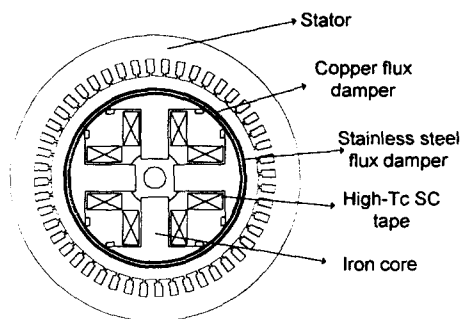


그림 1 고온초전도동기모터의 구조

Fig. 1 Structure of the high-Tc superconducting motor

과 히스테리시스손을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 결과를 예상하고 이에 따른 모터의 안정 적인 운전 조건을 제시하고 설계할 때 필요한 파라메타를 제시하는데 목적이 있다.

2. 전기적 모델 및 등가회로

고온초전도동기모터의 동작은 전기자 및 계자권선에 의해 발생된 자계의 상호작용에 의해 구동된다. 모터가 정상상태로 운전하고 있을 경우는 전기자 및 계자권선에 의한 자계가 일정 각을 유지하며 회전한다. 그러나 부하변동이 생기면 일정각을 유지하며 회전하던 계자권선 및 전기자권선에 의한 자계 사이의 각의 크기가 증가 또는 감소한다. 이 순간 모터의 내부(철심 및 공극)에 시변자계가 발생하게 된다. 이러한 조건 아래서 고온초전도동기모터 운전 중 플럭스댐퍼에 의한 시변자계의 차폐정도 및 전체시스템의 특성에 미치는 영향을 알기 위해서는 고온초전도동기모터의 전기적인 등가회로가 필요하다. 그림 2

* 正 會 員 : 案山工科大學 工大 專任講師

** 正 會 員 : 延世大 電氣·컴퓨터工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 三星電子 半導體事業部 研究員

§ 正 會 員 : 江原大 精密機械工學科 助教授·工博

§§ 正 會 員 : 韓國原子力研究所 機能性材料研究室長·工博

§§§ 正 會 員 : 위덕대 電氣工學科 專任講師·工博

正 會 員 : 延世大 電氣·컴퓨터工學科 教授·工博

接受日字 : 1998年 12月 2日

最終完了 : 1999年 2月 28日

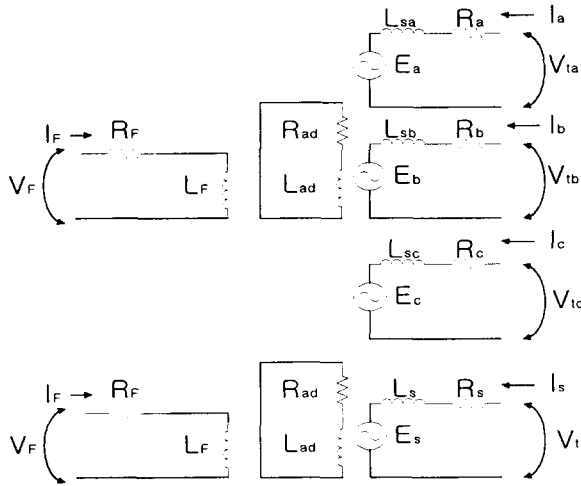


그림 2 플럭스댐퍼를 고려한 전기적 등가회로
Fig. 2 Electrical equivalent circuit including the flux damper

중 위의 회로는 그림 1의 구조를 가지는 고온초전도동기모터의 계자와 3상 전기자 및 플럭스댐퍼를 포함한 전기적인 등가회로이고 그림 2 중 아래의 회로는 3상의 전기자회로를 하나의 회로로 가정한 고온초전도동기모터의 전기적인 등가회로이다. 다음은 그림 2의 전기적인 파라미터들이다.

- R_F = 계자권선 저항
- L_F = 계자권선 인덕턴스
- V_F = 계자권선 입력전압
- R_S = 전기자권선 저항
- L_S = 전기자권선 인덕턴스
- V_T = 전기자권선 입력전압
- R_{ad} = 플럭스댐퍼의 저항
- L_{ad} = 플럭스댐퍼의 인덕턴스

그림 2의 전기적 등가회로를 이용하여 고온초전도동기모터의 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{I} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{R}\mathbf{I} + \frac{d\mathbf{A}}{dt} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \mathbf{I}\frac{d\mathbf{L}}{dt} + \mathbf{L}\frac{d\mathbf{I}}{dt} \\ &= \mathbf{R}\mathbf{I} + \mathbf{I}\dot{\mathbf{L}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}} \end{aligned} \tag{2}$$

식(2)을 유한차분법을 적용하기 위해 $\dot{\mathbf{I}}$ 에 관해서 풀면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{L}^{-1}[\mathbf{V} - [\mathbf{R} + \mathbf{I}\dot{\mathbf{L}}]\mathbf{I}] \tag{3}$$

식(3)을 유한차분법을 적용하면 다음과 같다.

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

식(4)에 쓰인 전기적 파라미터들의 행렬은 다음과 같다.

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

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{ad} \end{bmatrix} \tag{6}$$

r_a, r_b, r_c, r_f = 전기자 각상의 저항 및 계자의 저항
 r_{ad} = 플럭스댐퍼의 저항

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

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

- L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} = 전기자축 자기인덕턴스
- $L_{ab}, L_{ba}, L_{bc}, L_{cb}, L_{ac}, L_{ca}$ = 전기자축 상호인덕턴스
- L_{ff} = 계자축 자기인덕턴스
- $L_{af}, L_{fa}, L_{bf}, L_{fb}, L_{cf}, L_{fc}$ = 계자축 전기자 각상과의 상호인덕턴스
- L_{adad} = 플럭스댐퍼의 자기인덕턴스
- $L_{aad}, L_{bad}, L_{cad}, L_{fad}$ = 플럭스댐퍼측 전기자 및 계자와의 상호인덕턴스

부하가 증감할 때의 특성을 해석하기 위하여 동기기준선과 회전자 사이의 전기각 δ 에 의한 특성 해석이 가능한 스윙방정식(swing equation)을 도입하면 다음과 같다[5].

$$\frac{2}{P} J \omega_s \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{mech} - P_d \frac{d\delta}{dt} - P_s \delta \tag{9}$$

- P = 계자의 극수
- J = 관성모멘트
- ω_s = 회전자 동기속도
- P_{mech} = 기계적 출력
- P_d = 단위 유니트당 감쇠 출력
- P_s = 동기 출력

식(9)의 스윙방정식을 전기적 등가모델에 적용하여 부하 증감에 따른 기계 전기적인 전체 해를 구할 수 있다.

3. 고온초전도모터 회전자 내부의 시변자계

고온초전도모터가 정상상태에서 동작할 때는 전기자의 회전자계를 제외하고는 모터 내부에 시변자계가 발생하지 않는다. 그러나 모터에 부하가 증감하는 순간마다 전기자에서 발생하는 자계와 계자 축에서 발생하는 자계 사이에 슬립이 생겨 모터가 정상상태로 회복할 때까지 모터 내부에는 시변자계가 발생하게 된다. 이 시변자계는 전기자 및 회전자의 철심부분에 손실을 발생시킬 뿐 아니라 계자권선인 고온초전도테이프선재에도 교류손실을 발생시켜 모터가 안정하게 동작하는데 나쁜 영향을 미친다. 따라서 이 시변자계를 플럭스댐퍼를 통해 어느 정도 차폐를 시켜 모터의 동작을 안정화시킬 수 있다. 실제 제작된 고온초전도동기모터는 그림 1의 단면도와 같은 구조를 가진다. 전기자권선에는 60Hz의 주파수를 가지는 3상교류가 흐르고 전기자전류에 의해 만들어진 자계는 전기자권선이 3상 결선으로 되어 있기 때문에 자계의 크기는 일정하고 모터 중심을 축으로 하여 회전하는 형태를 가진다. 즉 전기자권선의 한 상에 대해 만들어지는 자계는 전기자전류와 마찬가지로의 60Hz를 가지지만 전체적인 3상 구조에 대하여서는 일정 크기의 회전자계를 가진다. 또한 계자전류에 의해 생성되는 자계는 계자전류가 직류이기 때문에 이 또한 일정크기를 가지는 자계이다. 따라서 모터가 정상상태로 운전하고 있을 경우는 시변자계가 발생하지 않는다. 그러나 모터의 축에 부하가 걸리면 계자 쪽의 자계 및 전기자 축의 자계가 일정각을 유지하며 돌다가 이 각의 크기가 증감한다. 이 순간 모터의 회전자 내부의 철심 및 공극에 시변자계가 존재하게 된다. 따라서 본 모터의 시변자계의 차폐를 위해 2mm 두께의 동 및 1mm 두께의 스테인레스강을 재질로 하는 진공층 겸용 플럭스댐퍼를 설치하였다. 자속밀도를 구하기 위하여 먼저 암페어의 법칙을 도입하면 다음과 같다.

$$NI = \oint H dl \quad (10)$$

N, I = 코일의 턴수 및 인가전류

본 모터에 사용된 전절권 형태에서 공극길이 g 가 일정하고 회전자의 반지름보다 상대적으로 크게 작다면 공극에서의 자계의 세기는 반지름방향으로 일정하게 분포된다고 생각할 수 있다. 또한 자기저항은 철심보다는 대부분이 공극에 의한 것이므로 P 극 구조를 가진 경우에 식(10)을 이용하여 공극에서 자

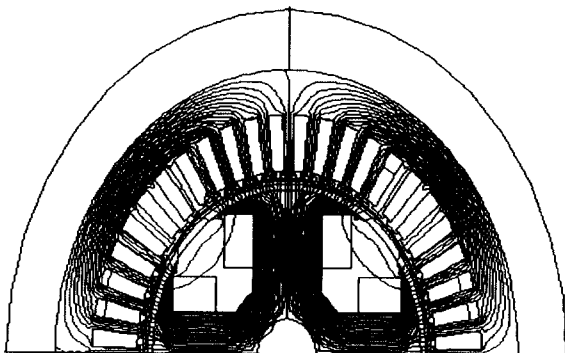


그림 3 무부하시의 자장 분포

Fig. 3. Magnetic field distribution at no load

기분포각 θ 에 걸친 자계의 세기 H 를 구하면 다음과 같다(4).

$$H = \frac{F}{g} = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{Pg} \cos \theta \quad (11)$$

식(11)에서 공극에서의 기자력을 구하면 다음과 같다.

$$F = \frac{4Ni \cos \theta}{\pi P} \quad (12)$$

공극에서의 최대 자속밀도는 식(12)에서 자기분포각이 $\theta=0$ 인 경우이므로 계자전류 i_f 에 의한 자속밀도 B_{rair} 를 구하면 다음과 같다(3.4).

$$B_{rair} = \mu_0 \frac{F}{g} = \frac{4\mu_0 Ni_f}{\pi P g} \quad (13)$$

그림 5에서 보여지는 고온초전도동기모터의 특성해석프로그램에서 초전도모터의 출력을 구할 수 있다. 일반적으로 모터의 출력을 이용하여 전기자 부분에 의한 자속밀도 B_{sair} 를 구하면 다음과 같다(3.4).

$$B_{sair} = \frac{T}{\left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{\mu_0 \pi D l}{2} B_{rair} \sin \delta} \quad (14)$$

T = 출력 토크

δ = 전기각

Dl = 철심의 단면적

식(14)에서 출력토크와 계자전류에 의한 공극의 자계를 안다면, 전기자권선에 의한 공극에서의 자계를 구할 수 있다. 공극 내에서의 자속밀도 B_{air} 는 다음과 같다.

$$B_{air} = B_{rair} + B_{sair} \quad (15)$$

플럭스댐퍼를 통과하는 시변자계가 플럭스댐퍼에 의해 어느 정도 차폐가 되는 지를 알기 위해서는 전계 및 자계의 세기를 각각 z 및 y 축의 함수라고 하고 맥스웰방정식을 해석하면 다음과 같은 파동방정식 및 전파계수(Propagation constant) γ 를 얻을 수 있다(5).

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon)E_y \quad (16)$$

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon \quad (17)$$

ω = 각주파수

σ, μ, ϵ = 물질의 도전율, 투자율 및 유전율

식(17)은 도체에 대하여 $\gamma^2 \approx j\omega\mu\sigma$ 이다. 그리고 전파계수를 $\gamma = \alpha + j\beta$ (α = 감쇄계수, β = 상계수)라 하면 식(16)

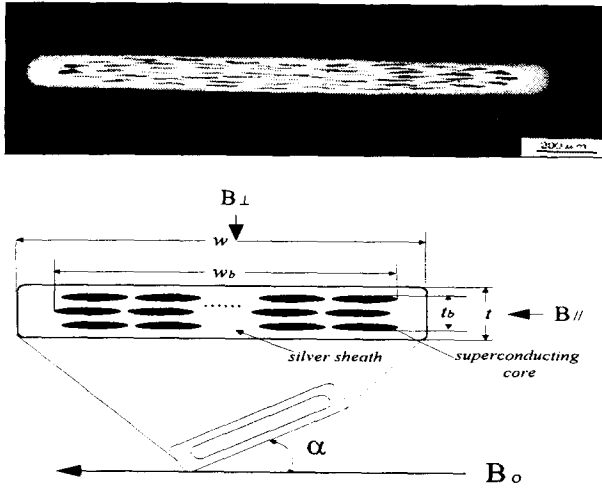


그림 4 초전도테이프선재의 단면 및 시변자계 인가시 파라메타
Fig. 4 Cross-sectional area and structure parameters of the superconducting taped winding applied time varying field

을 이용하여 +x 방향에 대하여 전계세기의 해를 구할 수 있으며 또한 동일하게 자계의 세기를 구하면 다음과 같다.

$$E_y = E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (18)$$

$$H_z = H_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (19)$$

식(19)을 이용하여 동과 스테인레스강 2층으로 구성된 플럭스덤퍼를 통과한 자속밀도의 크기 $amp(B_{shield})$ 는 다음과 같다.

$$amp(B_{shield}) = amp(B_{air}) e^{-\alpha_{copper}} e^{-\alpha_{stain}} \quad (20)$$

α_{copper} = 동의 감쇄계수

α_{stain} = 스테인레스강의 감쇄계수

여기서 감쇄계수는 $\alpha = \sqrt{\omega\mu\sigma}$ 로 구할 수가 있다.

4. 고온초전도테이프선재의 교류손실 해석

그림 1과 같이 제작한 고온초전도동기모터의 구조는 4극의 형태를 가진다. 각 극에 설치된 선재의 턴수 및 성질 그리고 침투한 시변자계가 같다고 가정하고 2극에 대하여 그림 3에 나타난 것과 같이 OPERA 프로그램을 이용하여 2차원 자계를 분석한 결과 철심을 사용한 본 초전도동기모터의 구조에서 테이프선재에 인가되는 평균자속밀도는 공극에서의 자속밀도의 약 7% 정도이다. 따라서 앞에서 구한 공극에서의 시변자계 중 7%가 테이프선재에 가해진다고 할 수 있다

은피복 고온초전도Bi-2223 테이프의 경우 은피복과 초전도 Bi-2223에서 각각 다른 손실이 발생한다. 초전도Bi-2223코아 내부로 침투된 시변자계로 인하여 초전도테이프의 표면으로 차폐전류가 발생하고 침투된 일부분의 자계에 의해 초전도 Bi-2223 코아에 히스테리시스손이 발생하게 된다. 수송전류

에 따른 자기자계에 의한 히스테리시스손은 초전도체의 내부구조 및 초전도 특성에 의하여 결정되는 손실로서 전기적등가회로의 수송전류항을 포함시켜서 별도의 계산을 할 수 없다. 초전도테이프 선재에 시변자계 B_0 가 인가되고 계자전류 i_f 를 흘렸을 때 수송전류는 외부에서 정전류를 사용하여 인가하므로 일정한 값을 유지하며 자화전류는 시변자계에 의하여 변화한다고 할 수 있다. 그림 4에서 보여지는 계자권선에 Bean의 임계상태모델을 도입하여 초전도코아에서 발생하는 4극의 전체 히스테리시스손을 구하면 다음과 같다[1,6,7,8].

$$W_{hys} = \frac{8B_0^2 \lambda_b w t l}{\mu_0} \left\{ \frac{1+i^2}{\beta} - \frac{2(1-i^3)}{3\beta^2} \right\} \text{ for } \beta > (1-i) \quad (20)$$

$$W_{hys} = \frac{8B_0^2 \lambda_b \beta w t l}{3\mu_0} \text{ for } \beta < (1-i) \quad (21)$$

$\lambda_b = w_b t_b / w t$ (w_b, t_b : 초전도코아 폭 및 두께)

w, t = 은피복을 포함한 초전도테이프의 폭 및 두께

l = 1극의 초전도테이프선재의 총길이

$i = i_f / i_c$ (i_f : 계자전류, i_c : 임계전류)

$\beta = B_0 / B_p$

외부에서 초전도체에 가해지는 자계인 B_0 에 의하여 초전도체 내부의 전영역으로 자계가 침투되는 순간의 외부자계의 크기가 완전침투자계인 B_p 이다. 수평으로 자계 $B_{||}$ 가 인가될 때의 B_p 는 다음과 같다[1,6].

$$B_p = \frac{\mu_0 J_c t_b}{2} \quad (22)$$

테이프 폭에 비하여 두께가 얇으므로 수직으로 자계 B_{\perp} 가 인가되면 4극 전체의 히스테리시스손을 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다[8].

$$W_{hys} = 4B_0 J_c \lambda_b w^2 t l \quad (24)$$

J_c = 임계전류밀도

$z_b = w_b / t_b$: 초전도테이프의 형상계수

각각의 필라멘트 사이의 와류에 따라 고온초전도Bi-2223테이프에서 초전도코아를 제외한 은피복에 손실이 발생하게 된다. 은피복에 발생하는 와류 손실을 분석하면 그림 4와 같이 외부에서 시변자계 B_0 가 인가되었을 때 교류손실은 주파수의 양의 계수를 가지며 인가자계의 크기에 따라 와류손이 증가한다. 테이프 전체가 은피복이라고 가정하면 4극의 전체 와류손은 다음과 같다[8].

$$W_{ed} = \frac{4\pi^2 B_0^2 f w_{\perp}^2 w t l}{6\rho_{silver}} \quad (25)$$

ρ_{silver} = 은의 고유저항

w_{\perp} = 인가자계와 수직 방향의 테이프폭

f = 인가자장의 주파수

그림 3에서 보여 주는 것과 같이 자계 해석 결과 계자 권선 인 초전도테이프선재에 인가되는 자계의 분포는 수평 또는 수직으로 일정한 방향을 갖지 않고 불균일한 것을 알 수 있다. 그림 4의 모델을 이용하여 여러 각도에서 침투하는 시변자계에 따른 손실 $W(B_o, \alpha)$ 를 해석하는 식은 다음과 같다(9).

$$W(B_o, \alpha) = W_{\perp}(B_{\perp}, \alpha) + W_{\parallel}(B_{\parallel}, \alpha) \quad (26)$$

$$= W_{\perp}(B_o \sin \alpha) + W_{\parallel}(B_o \cos \alpha)$$

W_{\perp} = 수평으로 가해진 자계로 인한 손실

W_{\parallel} = 수직으로 가해진 자계로 인한 손실

초전도 필라멘트가 거의 밀착되어 있다고 하면 커플링손실이 없다고 할 수 있다(9). 따라서 초전도테이프에서 발생하는 전체 교류손실은 초전도코어손실인 히스테리시스손과 은피복에서 발생하는 와류손의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$W_{ac} = W_{ed} + W_{hys} \quad (27)$$

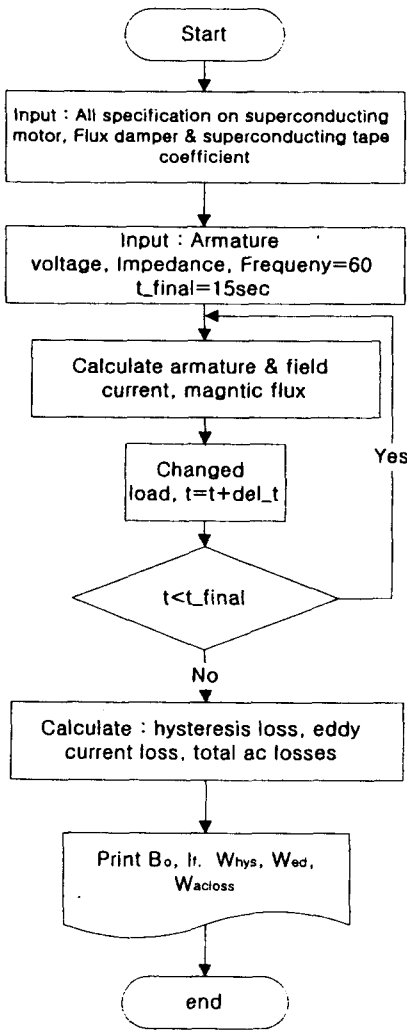


그림 5 특성해석 프로그램의 흐름도
Fig. 5 Flow chart of characteristics analysis program

표 1 고온초전도Bi-2223테이프선재의 파라메타
Table 1 Basic parameter of the high-Tc superconducting Bi-2223 tape

재질	은피복 55심 Bi-2223
치수	2.5×0.23 mm ²
초전도체의 비율	30 %
임계전류(Ic)	10 A
임계온도(Tc)	110 K
필라멘트 폭	0.1-0.3 mm
필라멘트 두께	10-20 μm

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

고온초전도동기모터의 교류손실 특성을 도출하기 위한 시스템흐름도는 그림 4에 있다. 본 논문에 사용된 고온초전도테이프는 한국원자력연구소에서 제작된 선재를 사용하였으며 제원은 표 1에 나타나 있다. 모터의 기동시나 부하가 변동할 때의 플럭스샘플러를 고려한 시뮬레이션은 전기자에 3상 220V, 계자에 4A의 정전원의 직류전류를 인가한 다음 무부하로 기동한 후 5초를 경과한 후 250W의 부하를 인가하고, 다시 5초가 경과한 뒤 500W로 부하를 증가시키는 형태로 시뮬레이션을 하였다. 그림 6은 전기자권선 및 계자권선에 의해 공극에 유입된 자계의 변화를 보여준다. 기동할 때에 최대 0.2T가 발생하

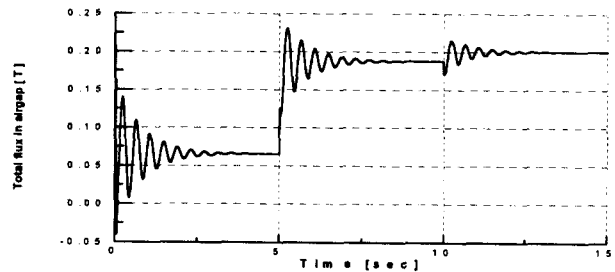


그림 6 부하변동시 공극에서의 평균자계의 변화
Fig. 6 The average flux density change in the air gap with load changes

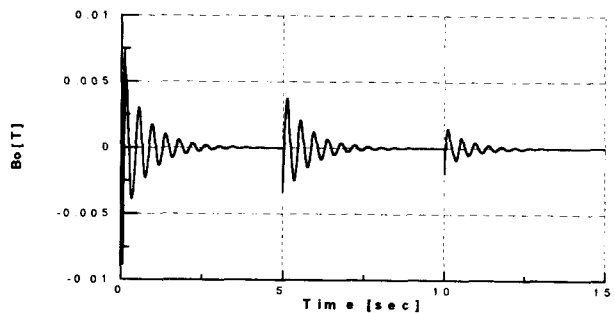


그림 7 부하변동시 계자권선의 평균자계의 변화
Fig. 7 The average flux change in the field winding with load changes

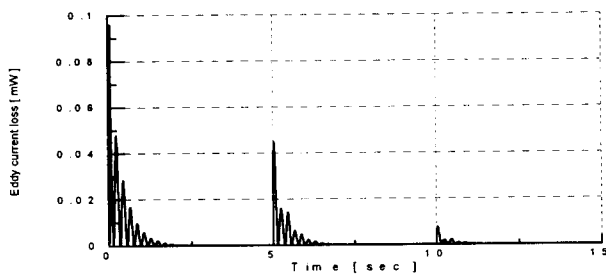


그림 8 부하변동시 계자권선의 와류손
Fig. 8 Eddy current loss in the field winding with load changes

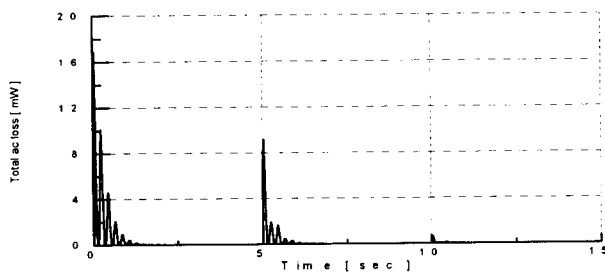


그림 9 부하변동시 계자권선의 총교류손
Fig. 9 Total ac loss in the field winding with load changes

며 약 3초의 과도상태를 거친 후 모터가 정상상태로 회복됨을 알 수 있으며 5초, 10초 후에 부하를 증가한 경우도 과도현상이 발생하는 최대 값의 절대치는 적어나 거의 동일한 과도현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 7을 보면 플럭스샘퍼를 통과하여 계자권선에 인가되는 자계의 변화를 알 수 있으며 공극에서 발생하는 자속의 약 7% 정도가 되는 것을 알 수 있으며 무부하에서 250W로 부하가 변동할 때 약 0.003T가 인가 되는 것도 알 수 있다.

그림 8은 그림 7에서 구하여 진 시변자계에 의한 와류손을 보여주고 있으며 기동시에 최대 0.1mW 임을 알 수 있다. 그림 9는 전체 교류손실을 보여주고 있으며 기동할 때에 최대 20mW에서 서서히 감소하는 것을 보여주고 있다. 식(11)에 따라 전체손실과 와류손의 차이가 히스테리시스손이므로 교류손실의 대부분이 히스테리시스손 임을 알 수 있다.

본 모터에서는 사용된 고온초전도Bi-2223테이프소재의 임계온도가 110K 이고 냉매로 액체질소를 사용하므로 교류손실이 수W에서 켄치가 발생한다[10]. 따라서 본 모터의 계자권선의 교류손실의 최대치가 20mW이므로 본 모터와 같은 소형의 시스템에서는 시변자계에 의한 켄치의 문제가 없다는 것을 알 수 있다.

그러나 상용화 급의 대용량의 시스템의 경우에는 전류 및 이에 따른 시변자계 등의 크기가 크게 증가하므로 이에 따라 효과 적으로 시스템을 안정시키기 위해서는 고온초전도테이프의 임계전류의 지속 적인 증가와 적절한 플럭스샘퍼의 설치가 필요하다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 고온초전도동기모터의 시변자계에 따른 전기적 특성 및 교류손실을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하였

다. OPERA 프로그램을 이용하여 플럭스샘퍼를 통과하여 계자권선인 고온초전도Bi-2223테이프소재에 침투되는 시변자계를 분석한 결과 공극의 전체 자계의 약 7%정도인 것을 알 수 있었다.

모터 운전시에 부하 변화할 때 전기적 특성 및 교류손실을 유한차분법을 이용하여 해석하였다. 그 결과 고온초전도동기모터에 4A의 계자전류 공급하고 기동시와 동기속도인 1800rpm에서 부하를 각각 250W, 500W로 변동할 때 과도현상이 약 3초 동안 지속되며 시변자계의 주파수가 약 2.5Hz 인 것을 알 수 있었다.

또한 부하 변동에 따른 고온초전도테이프소재의 손실을 해석한 결과 모터가 기동할 때에 발생하는 교류손실은 최대 값이 20mW이며 과도현상을 거치면서 감소하는 것을 알 수 있었다. 고온초전도Bi-2223의 특성으로 인하여 시변자계에 의한 교류손실 중에 히스테리시스손이 대부분을 차지하는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과를 이용하여 시변자계에 의한 교류손실을 효과 적으로 차단하기 위한 플럭스샘퍼의 재질 및 두께에 따른 설계할 수 있는 파라메타를 알 수 있었으며 제작된 시스템이 교류손실에 따라 발생하는 열에 의하여 켄치의 가능성이 없이 매우 안정되게 동작하는 것도 알 수 있었다.

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

참 고 문 헌

- [1] M. N. Wilson, *Superconducting magnet*, Clarendon Press, New York, Chap.8, 1983
- [2] Simon Foner and Brian B. Schwartz, *Superconducting Machines and Devices*, Plenum Press, New York, chap.5, 1974
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 147-310, 1992
- [4] Denis O' Kelly, *Performance and Control of Electrical Machines*, McGraw Hill Book Company, London, chap.7, 1992
- [5] J. Kraus, *Electromagnetics*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 475-499, 1992
- [6] H. Ishii, T. Hara, J. Fujikami and K. Sato, "The a.c. losses in Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x silver-sheathed superconducting wire", *Cryogenics*, Vol. 36, No. 9, 1996
- [7] S. Mench, M. Lelovic, T. Deis and N. G. Eror, "Losses in ac of BSCCO-2223 superconducting monofilament and multifilament tapes at power frequencies", *J.Mater. Res.*, Vol. 12, No. 11, Nov 1997
- [8] M. Oomen, J. Rieger, M. Legghissa & H. Kate, "Magnetic ac loss in multi-filamentary Bi-2223/Ag tapes", *Physica C* 290 pp 281-290, 1997
- [9] M. Sugimoto, A. Kimura, M. Mimura and Y.

Tanaka, "Electromagnetic interfilament coupling of silver sheathed Bi-2223 multi-filamentary tapes in transverse AC magnetic fields". Physica C 279 pp 225-232, 1996

(10) H. W. Lim, PhD thesis, "Normal zone propagation in high-Tc superconducting tape-wound coils". Massachusetts Institute of Technology, 1991

저 자 소 개

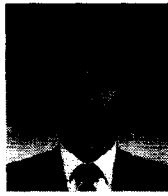


윤 용 수(尹 庸 銖)

1961년 8월 27일생. 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사과정. 1985~1996년 대우자동차 선임연구원. 1996~1998년 대우전자 개발팀장. 1998년 3월~현재 안산공과대학 전임강사

Tel : (0345) 490-6151, H·P : 016-251-6151

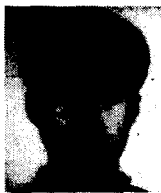
E-mail : ysyoon@intra.ansantc.ac.kr



홍 계 원(洪 啓 源)

1955년 4월 3일생. 1978년 서울대학교 요업공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사). 1983년~현재: 한국원자력연구소 기능성재료연구실장

E-mail : gwhong@nanum.kaeri.re.kr



송 명 곤(宋 命 坤)

1970년 4월 9일생. 1993년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1996년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : 02-361-2772

E-mail : superbboy@bubble.yonsei.ac.kr



이 상 진(李 相 鎭)

1962년 3월 3일생. 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년 3월~현재 현재 위덕대학교 전기공학과 전임강사

E-mail : sjlee@viro.uiduk.ac.kr



장 원 갑(張 源 岐)

1973년 6월 3일생. 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1999년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 삼성전자 반도체사업부 연구원



고 태 국(高 太 國)

1955년 7월 4일생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1983년 미국 Case Western Reserve University 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(박사). 1986~1988년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수. 현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 교수. 현재 대한전기학회 평의원. 현재 기초전력공학공동연구소 전문위원

Tel : 02-361-2772

E-mail : tkko@bubble.yonsei.ac.kr



장 인 배(張 仁 培)

1964년 10월 14일생. 1987년 서울대학교 기계설계설계학과 졸업. 1989년 서울대학교 기계설계설계학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 졸업(박사). 1995년~1997년 강원대학교 정밀기계공학과 전임강사. 1997년 10월~현재 강원대학교 정밀기계공학과 조교수

재 강원대학교 정밀기계공학과 조교수