초전도모터 쇄교자속 향상을 위한 계자권선 최적 설계

강준선, 이준호, 박일한, 나완수, 주진호*, 권영길**, 손명환**, 김석환**
성균관대학교 정보통신공학부, *성균관대학교 금속재료공학부,
**한국전기연구원 초전도응용연구팀

Field Winding Optimization of Superconducting Motor for Flux-linkage Enhancement

Joonsun Kang, Joon-Ho Lee, Il-Han Park, Wansoo Nah, Jinho Joo*, Young-Kil Kwon**, Myung-Hwan Sohn**, Seog-Whan Kim**
School of Information and computer Eng., SungKyunKwan University
*School of Metallurgical and Materials Eng., SungKyunKwan University
**Department of Materials Processing, Korea Institue of Machinery and Materials

bigbear@ece.skku.ac.kr

Abstract - To enhance the performance of superconducting motor, the flux which links the stator windings needs to be increased as much as possible. In this paper we redistributed the field winding to increase the flux-linkage. This paper introduces an algorithm that modifies the rotor winding shape to increase the flux-linkage to stator winding, satisfying both the constant superconductor volume and HTS tape characteristic (I_c-B curve) constraints. To check the validness of the proposed algorithm, it was applied to the 100 Hp HTS motor model, and about 21 % increse of flux-linkage was confirmed depending on the initial winding shape.

1. 서 론

초전도모터는 같은 출력의 일반모터에 비하여 부피가 작고 가벼운 이점으로 선박과 같은 대용량 구동에 매우 유용하다. 계자코일에 HTS 테이프 선재를 사용하는 초전도모터의 경우, 선재의 자장 특성(I_c-B 곡선)을 고려한 효율적인 코일 형상 설계가 필요하다. 본 논문에서는 선재의 자장 특성을 포함하면서 모터의 성능을 향상 시킬 수 있는 계자코일 설계 기법을 소개하였다. 모터의 성능을 향상 시키기 위해 전기자에 쇄교하는 자속이 증가하도록 목적함수를 정의하였다. 또한 이를 실제 개발 중인 100마력급 초전도모터(KERI)를 기본으로한 해석모델에 적용하였으며, 최적 형상의 쇄교 자속이 증가하였음을 보였다. 더블어 형상 설계 후 전기자 쇄교 자속이 정현파를 유지함을 확인하였다.

2. 쇄교자속 증가를 위한 형상 설계 민감도법

쇄교 자속을 증가하기 위해, 목적함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F=(\Lambda-\Lambda_o)^2 \tag{1}$$

여기서 Λ는 고정자 권선에서의 쇄교 자속 그리고 Λ_o는 목적 쇄교자속이다. 2차원 모델의 경우 각 권선의 쇄교 자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Lambda=\frac{N\cdot l}{S}\int A\,ds \tag{2}$$

여기서 N는 권선의 감은 수, S는 권선의 단면적, l는 직선부 길이, 그리고 A는 자기벡터포텐셜이다.

목적함수 식 (1)에 대한 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{dF}{d\mathbf{p}}=2(\Lambda-\Lambda_o)\frac{d\Lambda}{d\mathbf{p}} \tag{3}$$

초전도 특성 (I_c-B 곡선)을 고려하여 쇄교자속 Λ를 설계 변수 $\mathbf{p}$에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\Lambda}{d\mathbf{p}}=\frac{\partial\Lambda}{\partial\mathbf{p}}+\bar{\lambda}^T\{-\mathbf{P}-\mathbf{R}\} \tag{4}$$

여기서 $\bar{\lambda}$는 보조 변수이며, 다음과 같은 보조변수 식으로 정의할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{K}}^T\bar{\lambda}=\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial\mathbf{A}}\right)^T \tag{5}$$

여기서 $\bar{\mathbf{K}}$와 $\partial\Lambda/\partial\mathbf{A}$는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\mathbf{K}} = \mathbf{K} - \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{A}}\Big|_{\mathbf{p}=\mathbf{c}} = \mathbf{K} - \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial J_c}\frac{\partial J_c}{\partial B_m^2}\frac{\partial B_m^2}{\partial \mathbf{A}}\Big|_{\mathbf{p}=\mathbf{c}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\mathbf{A}^{\mathrm{T}}} = \frac{N \cdot l}{S}\int N_i ds \quad (7)$$

그리고 **P**와 **R**는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\mathbf{P} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}}(\mathbf{K}\cdot\mathbf{A}-\mathbf{Q})\Big|_{\mathbf{A},J_c=c} \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = -\frac{\partial \mathbf{Q}}{J_c}\Big|_{\mathbf{A},\mathbf{p}=\mathbf{c}} \cdot \frac{\partial J_c}{\partial B_m^2}\frac{\partial B_m^2}{\partial \mathbf{p}} \quad (9)$$

초전도모터의 2차원 정자장 시스템에서 식 (6)의 항들은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial J_c} = \sum_e \frac{\partial \mathbf{Q}^e}{J_c} = \sum_e \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^e dxdy \quad (10)$$

$$\frac{\partial B_m^2}{\partial \mathbf{A}} = 2B_m\frac{\partial B_m}{\partial \mathbf{A}} = 2(B_{mx}, B_{my})\cdot\left(\frac{\partial B_{mx}}{\partial \mathbf{A}}, \frac{\partial B_{my}}{\partial \mathbf{A}}\right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial B_{mx}}{\partial A_{ie}} = \frac{d_{ie}}{2\Delta}, \quad \frac{\partial B_{my}}{\partial A_{ie}} = -\frac{c_{ie}}{2\Delta} \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{N}^e$는 하나의 요소에 대한 일차 형상 함수이며, c_{ie}와 d_{ie}는 일차 형상 함수에 대한 계수, 그리고 Δ는 한 요소의 면적이다. 또한 위 식들의 각 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial B_m^2}{\partial \mathbf{p}} = 2B_m\frac{\partial B_m}{\partial \mathbf{p}} = 2(B_{mx}, B_{my})\cdot\left(\frac{\partial B_{mx}}{\partial \mathbf{p}}, \frac{\partial B_{my}}{\partial \mathbf{p}}\right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial B_{mx}}{\partial \mathbf{p}} = (\alpha, \beta)\cdot\left(\frac{\partial B_{mx}}{\partial x_1}, \frac{\partial B_{my}}{\partial y_1}\right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial B_{mx}}{\partial x_1} = \frac{(A_{2e}-A_{3e})}{2\Delta} - \frac{(\sum d_{ie}A_{ie})}{2\Delta^2}\frac{\partial \Delta}{\partial x_1} \quad (15)$$

$$\frac{\partial B_{mx}}{\partial y_1} = -\frac{(\sum d_{ie}A_{ie})}{2\Delta^2}\frac{\partial \Delta}{\partial y_1} \quad (16)$$

$$\frac{\partial B_{my}}{\partial \mathbf{p}} = (\alpha, \beta)\cdot\left(\frac{\partial B_{my}}{\partial x_1}, \frac{\partial B_{my}}{\partial y_1}\right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial B_{my}}{\partial x_1} = \frac{(\sum c_{ie}A_{ie})}{2\Delta^2}\frac{\partial \Delta}{\partial x_1} \quad (18)$$

$$\frac{\partial B_{my}}{\partial y_1} = \frac{(A_{2e}-A_{3e})}{2\Delta} + \frac{(\sum c_{ie}A_{ie})}{2\Delta^2}\frac{\partial \Delta}{\partial y_1} \quad (19)$$

여기서 (α, β)는 움직이는 설계변수 마디의 방향 코사인 벡터이다.

Fig. 1은 최대 쇄교 자속을 얻기 위해 쇄교 자속에 대한 민감도를 구하고 목적 쇄교 자속을 찾아가는 최적화 계산 과정을 나타낸 것이다.

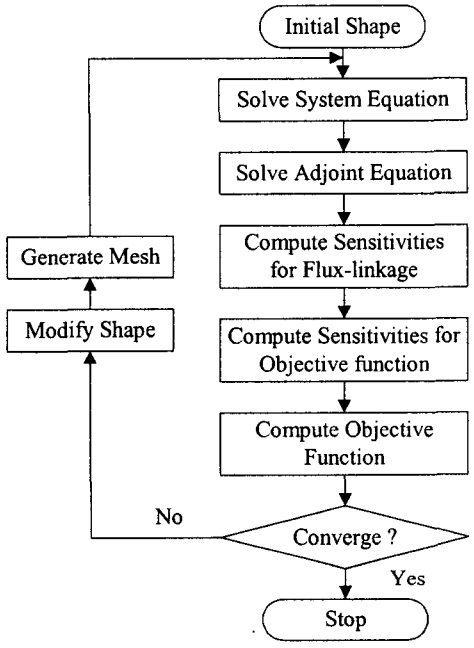


Fig. 1. Flow chart of the calculation procedures

3. 모터 모델

본 연구에서는 현재 개발 중인 100마력급 초전도 모터를 해석 모델로 이용하였다(Fig. 2). 100마력급 초전도 모터에 대한 사양은 TABLE I에 나타나있다.

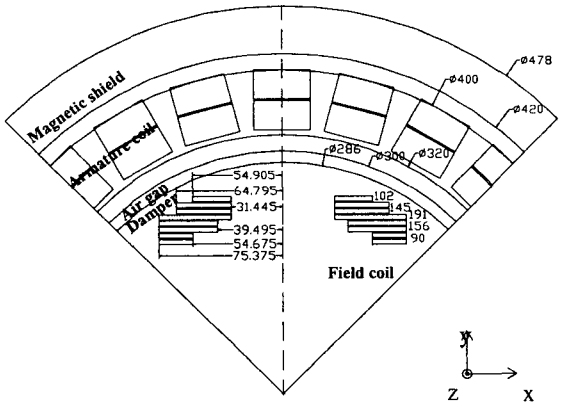


Fig. 2. 1/4 part of HTS motor cross section

TABLE I. Specification of HTS Motor

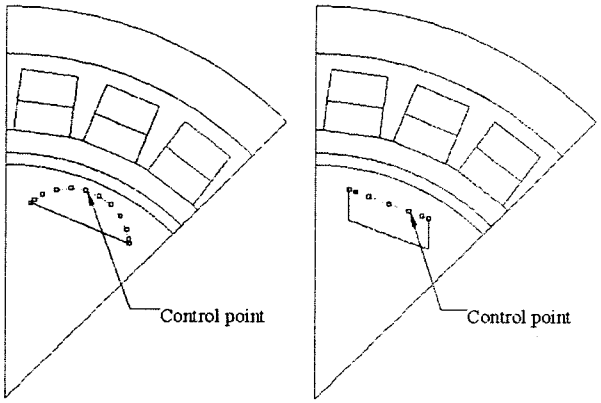
Motor Parameter	Value
Output Power	100 Hp
Rated Speed	1800 rpm
Input Voltage	380 V
Input Frequency	60 Hz
Operating Temperature of Field Coil	30 - 35 K
Number of Poles	4
Number of Turns per Pole	1075
Superconducting Tape	Bi-2223/Ag

4. 해석 결과 및 토의

해석을 위한 초기 모델은 Fig. 2의 실제 모델을 바탕으로 다음 Fig. 3과 같이 부피가 같은 두 개의 모델을 설정하였다. 계자 코일의 점선 부분은 설계 변수이며, 설계 변수 부근에 위치한 점들은 제어 변수로써 B-spline 기법을 이용하여 설계 변수가 부드럽게 움직이도록 한다. 각각의 제어변수는 12개, 7개로 설정하였고, 설계변수는 46개, 41개로 지정하였다. 설계변수는 계자코일의 부피가 일정한 조건에서 설계곡선의 법선 방향으로 움직일 수 있다.

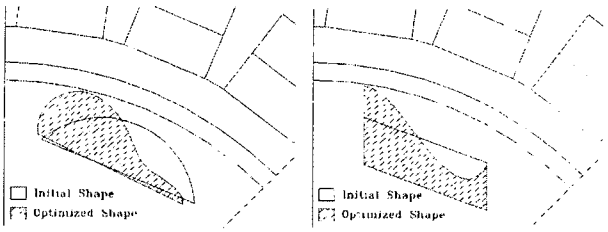
다음 Fig. 4의 빗금친 부분은 Fig. 3의 초기 모델에 대한 최적 형상을 나타낸다. 두 모델 모두 코일의 분포가 왼쪽 부분으로 집중되도록 형상이 변하였다.

Fig. 5는 각각 모델의 최적설계 반복 수에 대한 전기자에서의 쇄교자속과 계자코일의 임계전류밀도를 나타낸다. 두 모델 모두 임계전류밀도의 변화는 거의 없지만, 쇄교자속은 각각 21.2%, 13.2% 증가하였다.



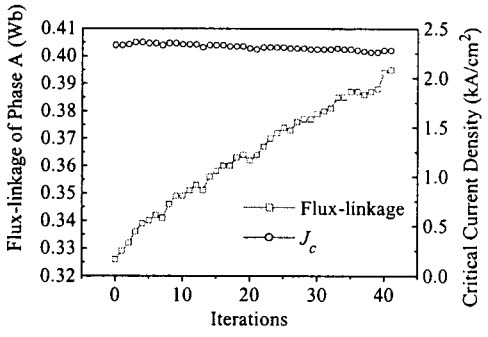
(a) (b)

Fig. 3. Initial shapes of HTS motor and control points: (a) half circle and (b) parallelogram.

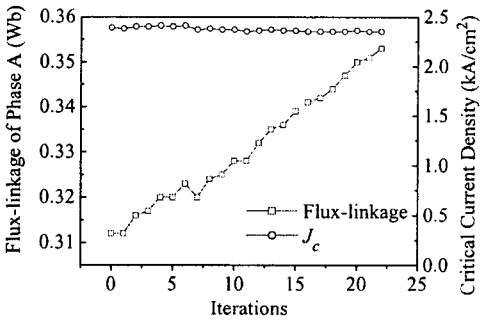


(a) (b)

Fig. 4. Optimized shapes for (a) initial shape of half circle, and (b) initial shape of parallelogram



(a)

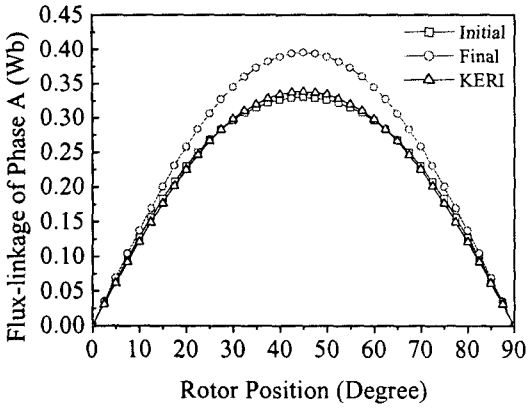


(b)

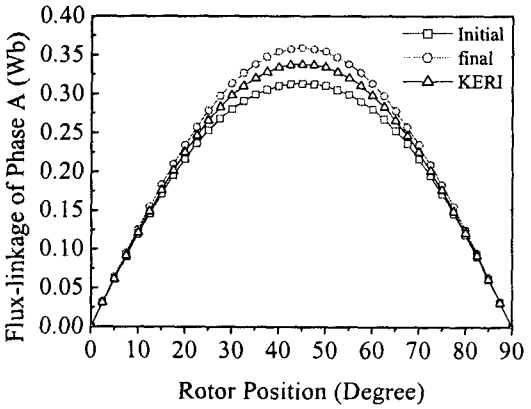
Fig. 5. Flux linkages and critical current density as the iteration number increases: (a) half circle model, and (b) parallelogram model

Fig. 6은 회전자의 회전(전기각:0°~90°, 기계각:0°~180°)에 따른 A상에 대한 쇄교자속을 나타낸다. 또한 형상의 변화에 관계없이 쇄교자속의 파형이 정현파를 유지함을 알 수 있다. 최적설계 형상의 쇄교자속은 반원형 모델의 경우 초기 형상의 21.1 %, KERI 모델의 16.9 % 증가하였으며, 평행사변형 모델의 경우 초기 형상의 14.7 %, KERI 모델의 6.21 % 증가하였다.

Fig. 7는 쇄교자속 해석 결과에 대한 FFT (Fast Fourier Transform) 해석 결과로 고조파 성분을 나타내며, 모두 기본파의 0.01% 미만이다. 이는 형상 설계 후 전기자의 역기전력(back-EMF)에 고조파 성분이 발생하지 않음을 의미한다.

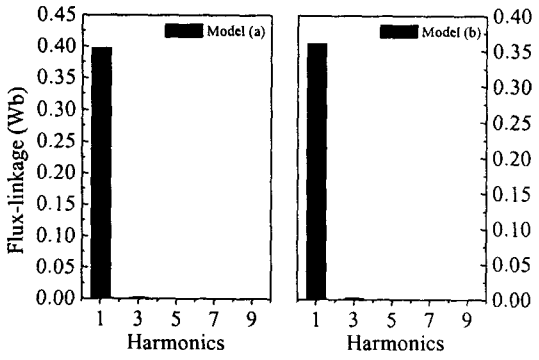


(a)



(b)

Fig. 6. Flux-linkage in phase A winding as the rotor rotates; (a) half circle model, and (b) parallelogram model



(a) (b)

Fig. 7. Flux-linkage harmonics; (a) half circle model, and (b) parallelogram model

3. 결 론

본 논문을 통해 초전도모터의 쇄교자속을 증가시키기 위한 알고리즘을 이용하여 계자코일의 형상 설계 방법을 소개하였다. 형상은 계자코일의 일정한 부피와 초전도 선재의 I_c-B 특성 조건을 모두 만족하면서 변화한다. 실제 개발중인 100마력급 초전도모터를 바탕으로 해석 모델에 적용하여 쇄교자속이 약 21% 증가와 함께 정현파를 유지함을 볼 수 있었다.

앞으로 설계변수의 자유로운 설정과 함께 실제 제작 가능한 형태를 위한 알고리즘의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Joonsun Kang, Joon-Ho Lee, Wansoo Nah, Dong-Hun Kim, Il-Han Park, Jinho Joo. Radial Magnetic Field Reduction to improve critical current of HTS Solenoid. Physica C 2002;372-376:1368-1372.

[2] Joon-Ho Lee, Joonsun Kang, Wansoo Nah, Il-Han Park, and Jinho-Joo. Reduction of Radial Magnetic Fields in HTS Solenoids with Different Constraint Conditions. Cryogenics 2002;42:387-391.

[3] Joonsun Kang, Joon-Ho Lee, Wansoo Nah, Il-Han Park, Jinho Joo, Young-Kil Kwon, Myung-Hwan Sohn, and Seog-Whan Kim, HTS Motor Shape Optimization for its Maximum Critical Current of the Field Winding, Applied Superconductivity Conference, George R. Brown Convention Center Houston, TX USA August 4-9 2002.

[4] Young-Sik Jo, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Ju Lee, Young-Kil Kwon, and Kang-Sik Ryu. Advanced design approach to the high temperature superconducting magnet. Cryogenics 2001;41:27-33.

[5] David F. Rogers and J. Alan Adams. Mathematical Elements for Computer Graphics. Chapter 5, McGRAW-HILL, 1990.