

초전도 호모폴라 모터의 3차원 자기해석 및 회로상수 추출

조영한, 성탄일, 김영선, 박일한  
 성균관대학교 정보통신공학부

3D Field Analysis And Circuit Parameter Calculation of Superconducting Homopolar Synchronous Motor

Young Han Cho, Tan Il Sung, Young Sun Kim and Il Han Park  
 Sungkyungwan University

**Abstract** - In comparison with conventional motors, Superconducting Homopolar Synchronous Motors (SHSMs) have advantages that it generates high magnetic field by superconducting winding. Therefore, superconducting coil used in SHSM can reduce the motor size and enhance the motor efficiency for high torque applications under the space constraints for propulsion system. During the design process of SHSM, it is required to evaluate the performance of initial design model, that is accurately analyzed using 3D magnetic field modeling large air-gap and flux distribution of axial direction is properly taken into account. In this paper, we analyze magnetic field of a homopolar motor with a 4-pole homopolar rotor and a stator of 3 phase windings. The field analysis is done using 3D finite element analysis which can reflect the end effect and overhang winding. And we extract mutual inductances between a rotor wind and the 3 stator windings. The extracted inductances are used for evaluation of overall motor performances that are calculated with generalized circuit theory of electrical machines.

1. 서 론

최근들어, 유도전동기와 같이 영구자석 동기모터가 선박이나 고속 전철 등 많은 분야에 적용되고 있다. 상용모터들은 한정된 공간에서의 저속과 높은 토크의 추진 시스템을 위해 모터의 크기를 줄이거나 모터의 효율성을 증대해야한다. 그러므로 이러한 상황에서 크기와 무게를 줄이기 위해서는 단극(homopolar)으로 설계하는 것이 효율적이다. 아울러 호모폴라 모터에 초전도체 코일을 사용한다면 더 높은 출력을 낼 수 가 있다. 따라서 다른 모터보다 소음, 크기, 무게를 줄이거나 높은 출력을 얻기 위해서는 Superconducting Homopolar Synchronous Motor (SHSM)에 대한 연구가 필요하다[1]. SHSM에 사용되어진 초전도체의 특징은 크게 자기적인 특징인 마이스너 효과와 전기적인 특징인 무저항으로 나눌 수 있다. 마이스너 효과는 온도 hysteresis에 관계없이 내부에 자장이 없는 반자성체라는 사실을 말한다. 이러한 특징을 갖는 초전도체는 완전반자성과 고유한 부분반자성으로 제1종과 제2종 초전도체로 구분될 수 있고 임계온도에 따라서도 고온초전도체(HTS)와 저온초전도체(LTS)로 구분되어진다. 근래에 들어 냉각장치에 발달로 인하여 초전도체 호모폴라 모터는 저온초전도체 보다 효율성이 좋은 고온 초전도체를 사용하고 있다 [2],[3]. 또한 전기적인 특징인 무저항이란 내부에 저항이 없다는 것을 말하는 것이고, 결과적으로는 에너지의 손실이 발생하지 않는다는 것이다. 그러므로 초전도체 코일을 사용함으로써 안정성 증가와 크기를 줄일 수 있고 또한 높은 자장을 얻을 수 있기 때문에 효율성이 증대 될 수 있다. 따라서 이러한 초전도체 성질을 이용하여 초전도체 호모폴라 모터를 효율적으로 설계해야 한다. 본 논문에서 4극의 회전자와 3상의 고정자 권선을 갖는 SHSM를 설계하였다. 또한, 설계된 SHSM은 3D FEM을 사용하여 자기해석과 회로상수를 추출하였다. 3D FEM을 사용하여 추출된 회로상수는 단부효과를 반영 할 수 있으므로 2D FEM 사용하여 추출된 회로상수 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 여기서 우리는 3D FEM을 사용하여 추출된 회로상수를 이용하여 등가 회로를 해석 할 수 있다. 등가회로 해석은 모터해석을 보다 쉽고 빠르게 할 수 있기 때문에 모터를 설계하는데 많은 장점이 있다.

2. 본 론

본 장에서는 모터해석 및 회로상수를 추출하기 위한 해석이론에 대해 설명하였다.

2.1 3차원 전자기 해석 이론

전자장의 수학적 표현에서 유한요소해석 이론에 대해 알 수 있다. SHSM의 자계를 분석하기위해 3D유한요소법을 사용하였다. 3D 유한요소법을 사용함에 따라 고정자권선의 단부효과를 고려할 수 있다. 자계의 지배방정식은 푸아송 방정식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \tag{1}$$

여기서  $\mathbf{A}$  는 3개의 구성요소를 포함한 자기벡터 포텐셜,  $\mathbf{J}$  는 초전도 권선에 인가한 전류밀도 및  $\mu$ 는 해석영역에 대한 투자율이다. 식 (1)의 지배방정식을 형상함수를 가중함수로 취하는 갤러킨법을 적용하여 3차원 전자기 유한요소해석을 한다.

2.2 인덕턴스 해석

모터의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 계산하기 위하여 에너지관계식과 인덕턴스의 기본식을 이용하였다.

$$L_{aa} = \frac{2W}{I^2} \tag{2}$$

$$L_{af} = \frac{N \oint_s \vec{B}_f \cdot d\vec{s}_f}{I_a} \tag{3}$$

여기서  $L_{aa}$ 는 자기인덕턴스,  $W$ 는 자기시스템 에너지,  $I_a$ 는 a 권선에 인가된 전류이다. 그리고  $L_{af}$ 는 a 권선에 의한 f 권선의 상호 인덕턴스이다. 또한,  $N$ 은 권선수,  $B_f$ 는 f 권선의 쇠교자속이고,  $s_f$ 는 f 권선의 면적이다.

2.3 등가회로 해석

모터의 전압 평형방정식은 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}}{dt} \tag{4}$$

여기서  $\mathbf{V}$ 는 3상 인가전압,  $\mathbf{i}$ 는 전류,  $\mathbf{R}$ 는 권선저항,  $\boldsymbol{\lambda}$ 는 쇠교자속이다. 식 (4)의 쇠교자속은 회로정수를 이용하여 나타내면 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서 소문자  $a, b, c$ 는 고정자의 각상을 나타내고 있고  $f$ 는 회전자를 나타내고 있다. 계산된 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스는 그림 1과 같은 동기전동기의 등가회로에 적용하여 모터해석을 빠르고 쉽게 할 수 있다.

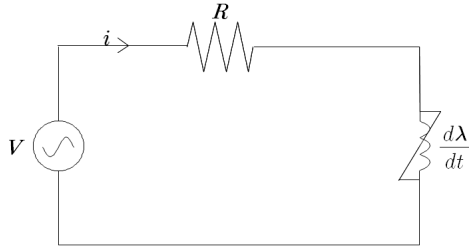


그림 1 등가회로

### 3. 해석모델 및 해석 결과

#### 3.1 해석모델

SHSM을 해석하기 위해 그림 2와 같이 3상 4극의 초전도 호모폴라 모터를 설계하였다.

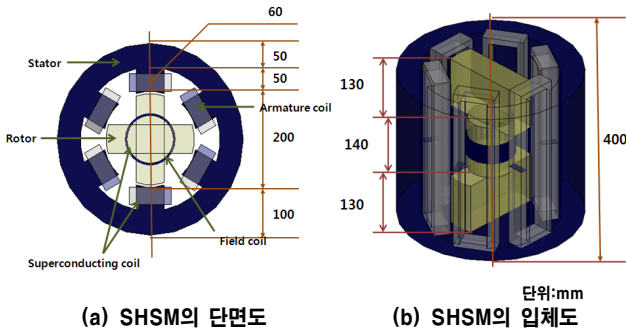


그림 2 해석모델

그림 2는 회전자 형상은 4극을 가지고 있는 SHSM의 정면과 측면을 보여주고 있다. 고정자의 형태는 Racetrack 형태를 하고 있으며 6개의 돌극을 가지고 있다. 고정자와 회전자 권선에는 초전도체 권선이 감겨져 있다. 설계된 SHSM은 선형모터와 톨렉턴스모터의 원리를 적용하여 설계하였다. 설계된 SHSM은 구조가 간단하는 장점이 있지만 모터를 제어하는 회로가 필요하다는 단점이 있다.

#### 3.2 자계 해석

그림 3은 회전자와 고정자 코일에 전류를 인가했을 때 SHSM의 전체 자계분포를 나타낸다.

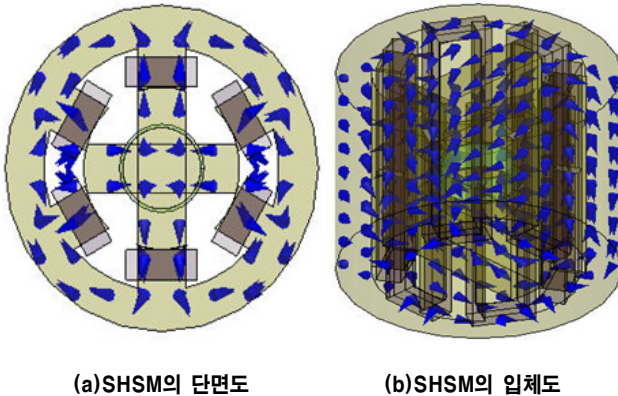


그림 3 SHSM의 자계분포

#### 3.2 인덕턴스 프로파일

그림 4는 모터의 회전에 따른 회전자와 고정자의 자기 인덕턴스 파형을 보여주고 있다. 회전자를 5° 씩 움직이며 인덕턴스를 추출하였다.

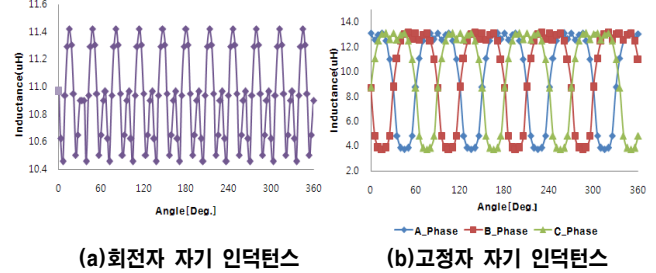


그림 4 자기 인덕턴스 프로파일

그림 5는 회전자와 고정자 상호간의 상호 인덕턴스를 파형을 보여주고 있다.

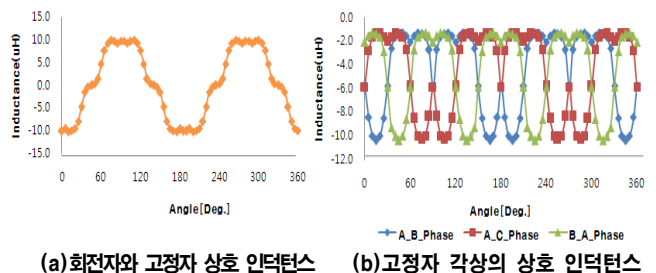


그림 5 상호 인덕턴스 프로파일

여기서 A\_B는 A상과 B상의 상호 인덕턴스, A\_C는 A상과 C상의 상호 인덕턴스, B\_A는 B상과 A상의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 그림 4와 5에서 추출된 인덕턴스 회로상수를 등가회로에 적용함에 있어 회로상수는 모터의 특성해석에 중대한 영향을 미치므로 정확한 회로상수의 계산이 꼭 필요하다.

### 4. 결론

본 논문에서는 SHSM의 3차원 유한요소 해석을 하였고, 3차원 구조를 가진 SHSM의 자계 분포를 해석 하였다. 그리고 회전자를 5° 회전시켜 가며 SHSM의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 추출 하였다. 3D FEM을 사용하여 해석하면 단부효과를 반영 할 수 있기 때문에 정확한 자계분포와 인덕턴스를 추출 할 수 있다. 추출된 인덕턴스는 등가회로에 적용하여 정확한 모터해석을 할 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

[1]Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Young-Kil Kwon and Young-Sik Jo, "Study on Homopolar Superconducting Synchronous Motors for Ship Propulsion Application." Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 9, No. 2, pp.31~34, 2007  
 [2]Y. K. Kwon, M. H. Sohn, S. K. Baik, E. Y. Lee, J. M. Kim, T. S. Moon, H. J. Park, Y. C. Kim, and K. S. Ryu. "Development of a 100hp Synchronous Motor With HTS Field Coils." IEEE Trans, Appl. Supercond. Vol. 15, No. 2, Jun. 2005.  
 [3]J. D. Edick, R. F. Schiferl, and H. E. Jordan. "High Temperature Superconductivity Applied Electric Motors." IEEE Trans, Appl. Supercond. Vol. 2, No. 4, December. 1992