

부상력 및 기동 토크를 고려한 Bearingless SRM의 기본 설계

이찬교, 오주환, 권병일  
한양대학교

A Design Method of Bearingless SRM For Suspension Power and Starting Torque

Chan Gyo Lee\*, Ju Hwan Oh\*, Byung il Kwon\*  
\*Hanyang University

**Abstract** - Bearingless Switched Reluctance Motor(SRM) have combined characteristics of SRM and magnetic bearing. Production of radial force for rotor shaft magnetic suspension is explained with differential stator windings. Bearingless SRM is simple structurally because the permanent magnet does not exist and bearing does not take the influence at the environment because it does not exist and has strong torque, and loss of bearing by bearing current has the advantage not to exist. In this paper, a design method of bearingless SRM for suspension power and starting torque is proposed. The design model is implement by maxwell.

1. 서 론

일반적으로 기계적 bearing에서는 회전 시 마찰을 최소화하기 위해 오일을 쓰지만 기계적인 마찰을 최소화하기 위해 가장 좋은 방법은 접촉하지 않고 회전하는 것이며, 이러한 기술적 필요로 magnetic bearing이 연구되었다. Magnetic bearing은 부상을 통한 비 접촉 특성으로 고속화가 가능하다. 접을 들 수 있지만, 부피와 무게가 커지게 되고 고 정밀을 센서가 요구 되어 전동기 대비 magnetic bearing의 가격은 상당히 높아지게 되는 큰 단점을 안고 있다[1].

그리하여 크기 및 중량을 최소화하고 복잡한 시스템을 줄이기 위해 bearingless 전동기의 연구가 필요하다. 이러한 Bearingless 전동기의 종류를 살펴보면 크게, 유도기형, 영구자석 형, 그리고 릴럭턴스 형 bearingless 전동기로 나누어진다. 유도기형 bearingless 전동기는 2set의 고정자 권선이 하나는 전동기 회전력을 위해 4극으로 권선되어 있고, 다른 하나는 부상력 발생을 위해 2극으로 권선되어 있다. 연속적인 부상력(suspension force)은 4극 권선 회전자재와 부상력권선 전류의 상호작용으로 발생한다[2]. 영구자석 형 bearingless 전동기는 유도기형보다 크기 및 무게를 줄일 수 있어서 회전자구조와 회전자부상 제어시스템은 비교적 간단해지고 고효율을 갖는다[3]. 릴럭턴스 형 bearingless 전동기는 기본적으로 SRM의 특징인 강인한 기계적 구조와 저가격화 그리고 소형화가 가능하다. 또한 앞선 두 전동기와는 달리 회전자에 영구자석 및 권선이 없기 때문에 주위의 온도변화가 심한 곳에서도 구동시스템에 영향을 주지 않는다. 그러므로 환경에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 구조는 회전력권선(main winding)과 부상력권선(suspension winding)이 모두 고정자에 존재하므로 구조 또한 단순하다[4].

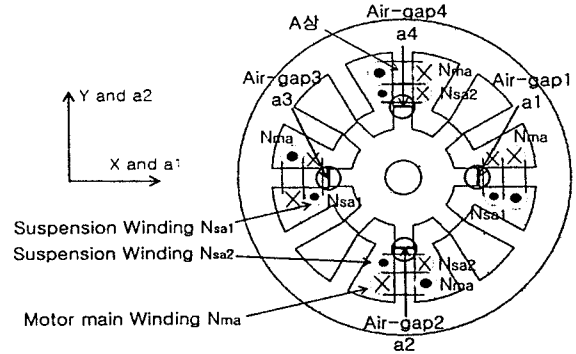
본 논문에서는 기존의 bearingless SRM을 바탕으로 하여 최대속도 10,000rpm, 정격전압 310[V-dc], 출력 500[W]의 bearingless SRM을 부상력 및 토크를 고려하여 기본 설계하였다. Bearingless SRM은 회전력에 필요한 부상력(suspension force)으로 이용할 수 있기 때문에 회전자 축 부상에 필요한 소비전력을 줄일 수 있는 장점을 지닌다. 기본 설계된 bearingless SRM은 2D-FEM 유한요소법을 설계 결과를 해석하였다.

2. Bearingless SRM의 기본 설계

Bearingless SRM은 그림 1에서와 같이 회전력권선( $N_{ma}$ )이 여자(commutation)되면 인접한 회전자는 고정자와 정렬하려는 방향으로 움직이게 된다. 이와 같이, 회전력을 얻기 위해 회전력권선에 여자하게 되면 공극에서 자속이 포함되어 회전자가 움직이게 되고 전자석처럼 회전자는 공극 a1-a4 어느 한 고정자극 방향으로 공극이 최소화 되면서 붙게 된다. 이 힘은 다른 bearingless 전동기 보다 상당히 큰 힘을 지니게 된다. 이러한 회전자축을 일정 gap안에 부상시키기 위해 권선( $N_{sa1}$ ) 또는 ( $N_{sa2}$ )에 + - 전류를 적절하게 제어하여 일정한 gap을 유지시킨다.

본 논문에서는 bearingless SRM의 설계를 위한 치수 결정을 위해서, 기본수식 및 설계 절차를 고려하여 주었고, 설계변수 및 치수조정 변화에 따른 설계의 정확성을 높이고자 설계보조를 위한 소프트웨어인 Maxwell RM을 사용하였다. 자기부상을 위한 Bearingless SRM의 설계 목표는 최대속도 10,000[rpm], 정격전압 310[V-dc], 출력은 500[W]급으로 하며, 제약조건은 고정자 외경 127[mm], 극수는 12/8로 한다.

우선 전동기의 토크[T]는 전동기의 각속도와 출력[P]를 통해서 그 값을 구할 수 있다. 이는 식 1과 같다.



<그림 1> Bearingless SRM의 구조 (Rotor  $\theta = 0(\text{deg})$ )

$$P = \omega \cdot T \tag{1}$$

여기서  $\omega$ 는 회전자 각속도  $\frac{2\pi}{60} \times rpm$ 으로 나타낸다.

우선 전동기 설계 시 출력방정식을 이용하여 회전자의 외경( $R_d$ )과 회전자 스택길이( $R_{stk}$ )를 계산할 수 있다. 출력방정식은 식 2와 같다.

$$T = k \cdot R_d^2 \cdot R_{stk} \tag{2}$$

여기서,  $k$ 는 출력계수( $N \cdot m$ )이다. 설계하고자 하는 bearingless SRM은 500w급 0.48N의 고속운전용 전동기 이므로  $k$  값을 2.6으로 정한다.

회전자 외경은 회전자와 고정자의 외경비율( $R_d/S_d$ )을 이용하여 설계할 수 있다. 12/8극 3상 SRM의 회전자와 고정자 외경비율은 일반적으로 50%-55% 내외에서 선택하지만 Bearingless SRM은 회전력권선뿐만 아니라 부상력을 위한 부상력권선까지 고정자 극에 권선해야 하기 때문에 SRM보다 고정자의 극이 충분히 길어야 한다. 이러한 구조적인 특징을 고려하여 회전자와 고정자 외경비율은 45%로 설계하였고, 계산 결과는 고정자외경 127[mm], 고정자외경은 56.8[mm]이다. 회전자 스택길이는 회전자외경을 식 2에 대입하여 구할 수 있다.

SRM은 균일한 공극(g)을 필요로 하며 청각적 소음을 줄이고 평형 상전류를 유지하기 위해 편심이 없어야 한다. 그리고 토크를 최대화시키고 모터 드라이브에 요구되는 전류조건을 최소화하려면 작은 공극이 필요하다. 하지만 bearingless SRM은 bearing이 없기 때문에 공극 gap이 너무 작으면 편심에 의한 기계적인 접촉 및 소음, 진동 등의 이상 효과가 크게 발생할 우려가 크므로, 제어시 안정성을 고려하여 공극을 0.6[mm]로 설계 하였다.

극호각( $\beta_s, \beta_r$ )은 상수와 극수에 따라 그 값이 변하게 되는데, 극수는 제약조건에서 12/8극으로 정해주었다. 극수는 최소공배수(M)에 의해서 구할 수 있는데 이는 식 3과 같다.

$$M(N_s, N_r) = qN_r \tag{3}$$

여기서  $N_s, N_r$ 은 고정자와 회전자의 극수로 짝수이고,  $q$ 는 상수를 나타낸다. 극호는 상수와 극수에 따라, 그 값이 정해져야 한다.

$$\min(\beta_s, \beta_r) > \frac{2\pi}{qN_r} \tag{4}$$

하지만 전동기의 성능향상을 위하여 극호값을 설정할 때, 좀 더 상세히 결정하여야 한다. 상수 증가 시,  $\beta_s, \beta_r$ 이 증가하게 되고 극수를 증가 시키면  $\beta_s, \beta_r$ 은 감소하게 된다. 때문에  $\beta_s, \beta_r$ 은 식 5를 만족 시켜야 한다.

$$(\beta_r + \beta_s) \leq \frac{2\pi}{N_r} \quad (5)$$

$\beta_s, \beta_r$ 는 15.6°, 14.8°로 설계하였다.

고정자와 회전자 요크( $y_s, y_r$ )의 두께는 포하 없이 최대 자속을 충분히 흘리기 위해서 적어도 회전자 극 두께의 1/2이상인 것이 좋으며, 실용상 그 크기는 그 이상이 되어야 한다. 이는 식 6과 같이 표현한다.

$$y_s > \frac{t_s}{2}, t_s > \frac{t_r}{2} \quad (6)$$

Bearingless SRM은 고속영역에서 구동하므로 고정자와 회전자 요크를 두껍게 해주는 것이 좋다. 고속 운전 시, 진동에 의한 형상의 일그러짐을 줄이는 동시에 청각적인 소음을 줄이기 위함이다. 하지만 동일한 외경에 고정자 요크가 두꺼워지면, 슬롯면적이 줄어드는 문제점을 가지고 있어 그 값을 적절히 조절해야 한다.

축직경( $D_{sh}$ )은 그 굵기가 굵을수록 회전자 측면의 강도도 증가하기 때문에 그 값을 적절히 설정해 주어야 한다. 축직경은 식 7과 같이 회전자의 요크 두께, 그리고 슬롯깊이와 많은 영향을 받는다. 그렇기 때문에 이를 고려하여 설계 해 주어야 한다.

$$D_{sh} = D_r - 2(d_r + y_r) \quad (7)$$

고정자의 슬롯깊이( $d_s$ )는 동손을 최소화하고 회전력권선과 부상력권선의 턴 수를 최대로 하는데 매우 중요하다. 이는 식 8과 같다. 슬롯깊이는 21.5[mm]로 설계 하였다.

$$d_s = \frac{1}{2}(S_d - R_d - 2(g + y_s)) \quad (8)$$

슬롯면적( $S_{slot}$ )은 식 8을 고려하여 구할 수 있는데 슬롯의 삽입률은 턴 수를 얼마나 할 수 있는지 알 수 있는 매우 중요한 자료이다. 슬롯면적을 통해 회전력권선의 턴 수를 정한 후 권선삽입률을 고려하여 최대 부상력 턴 수를 설계 할 수 있다. 슬롯 면적은 식 9와 같다.

$$S_{slot} = \frac{\pi}{12}(S_1^2 - (R_1 + g)^2) - \frac{1}{12} \cdot d_s \cdot t_s \quad (9)$$

여기서  $S_1$ 는  $\frac{1}{2} \cdot S_r - y_s$ 이며,  $R_1$ 는  $\frac{1}{2} \cdot R_r$ 을 나타낸다. 결과적으로 슬롯면적은 식 9에 의해 433[mm<sup>2</sup>]이 되며 슬롯의 유효 면적을 이용하여 극 당 턴 수를 설계 할 수 있다. 상당 권선삽입률 45%로 하면,

$$S_{wind} = \frac{433}{2} \cdot 0.45 = 97.42(\text{mm}^2) \quad (10)$$

가 된다. 권선 굵기는 1.024[mm]를 사용하므로, 극 당 턴 수는 95번 감을 수 있다. 회전력권선의 극 당 턴 수( $N_l$ )는 식 11과 같다.

$$N_l = \frac{30 \cdot V_s}{rpm \cdot q \cdot t_s \cdot L_{sh} \cdot N_r \cdot B_s} \quad (11)$$

여기서  $V_s$ 는 정격전압,  $B_s$ 는 자속밀도를 나타낸다. 여기서 설계의 정확성을 높이고자 회전력권선의 턴 수를 Maxwell RM을 이용하여 구하였다. 회전력권선의 턴 수는 최대속도에 맞추어 59턴으로 설계하였다. 그리하여 최종적으로 부상력권선의 턴 수는 36턴으로 설계하였다.

표1은 설계된 bearingless SRM의 주요 사양이다.

〈표 1〉 설계된 전동기의 주요사양

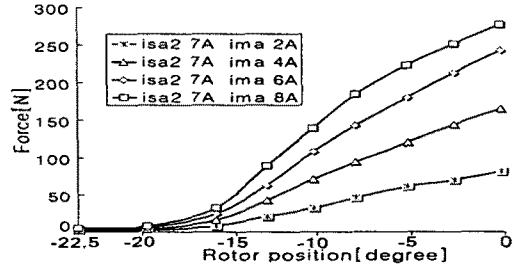
Design Motor	stator	rotor
Number of poles	12	8
Pole arc[deg.]	15.6	14.8
Outer diameter[mm]	127	56.8
Stack length[mm]	57.5	57.5
Slot depth[mm]	21.5	8.6
Yoke thickness[mm]	13	12.8
Turn/Pole[turns]	main winding: 59	
	suspension winding: 36	
Slot area[mm <sup>2</sup> ]	433	
Air gap[mm]	0.6	

### 3. 부상력과 회전력의 상관관계

그림 2는 회전력전류 변화에 따른 부상력 변화를 나타낸다. y축 부상력선( $i_{sa2}$ )은 7A로 고정하고 회전력권선( $i_{ma}$ )의 전류 값을 변화시켜 주며 그 추이를 확인하였다. 부상력과 회전력권선 전류의 관계는 다음 식과 같다.

$$F_y = 4K_f(\Phi)N_m i_{ma} N_s i_{sa2} \quad (12)$$

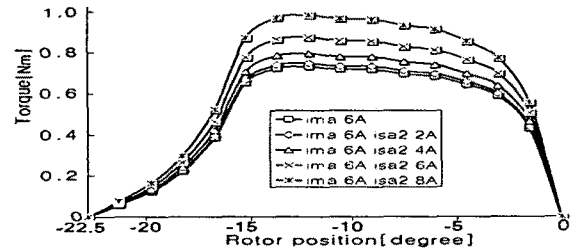
여기서  $4K_f(\Phi)$ 는 전동기의 크기를 나타내고 식 12로 부터 회전력에 필요한 자속을 부상력에서 이용 할 수 있다는 것을 알 수 있다.



〈그림 2〉 부상력과 회전력전류( $i_{ma}$ )의 상관관계

그림 3은 회전력권선 전류를 6[A]로 고정하고, 부상력권선 전류의 변화에 따른 토크 특성을 나타낸 것이다. 부상력자속은 구동 시 회전력에 영향을 미치는데 이를 잘 이용하면 더욱 큰 토크를 얻을 수 있다. 이는 식 13과 같다. 여기서  $G_t(\Phi)$ 는 비례계수로써 회전자의 위치각을 나타낸다.

$$T_a = G_t(\Phi)(N_m^2 i_{ma}^2 + 2N_s^2 i_{sa1}^2 + 2N_s^2 i_{sa2}^2) \quad (13)$$



〈그림 3〉 토크와 부상력전류( $i_{sa2}$ )의 상관관계

### 4. 결 론

본 논문에서는 최대 10,000rpm에서 구동 가능한 500[W]급 bearingless SRM의 설계를 위하여 기본 설계과정과 그 특성을 해석하였다. Bearingless SRM설계 시 유의해야 할 사항은 부상력권선을 회전력권선과 같이 고정자에 설계 해 주어야 한다는 점이다. 고정자 극 길이를 고려해 주기 위하여 회전자와, 고정자의 외경비를 45%로 맞추어 그 문제를 해결하였으며, 회전력권선 설계 후 슬롯 면적을 고려하여 최종적으로 부상력 권선을 설계 하였다. 정특성 해석을 통해 회전력에 필요한 자속을 부상력(suspension force)으로 이용 할 수 있기 때문에 회전자 축 부상에 필요한 소비전력을 줄일 수 있다는 것을 고찰하였다. Bearingless SRM은 여러 장점을 가지고 있지만, 그 구조 상 비선형 인덕턴스를 지니고 있어 타 bearingless 전동기 보다 진동 및 소음이 크다. 따라서 bearingless SRM의 기본 설계를 바탕으로 부상력과 토크리플 그리고 부상력리플을 고려한 자기형상의 구조체를 재설계하여 동 특성 해석을 할 예정이다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] "고 정밀 자기베어링의 제어 및 응용기술", 한국공작기계학회지, 제 11권, 제2호
- [2] Takahiro susuki, etc. "An Air-gap-Flux-Oriented Vector Controller for Stable Operation of Bearingless Induction Motors", IEEE Trans, Vol. 36, No. 4, pp.1069-1076, July 2000
- [3] Masatsugu Takemoto, etc "A Rotor design of a Permanent Magnet - Type Bearingless Motor Considering Demagnetization", IEEE Trans, Vol. 3, No. 2, pp-655-660, 1997
- [4] Masatsugu Takemoto, etc. "Radial Force and Torque of a Bearingless Switched Reluctance Motor Operating in a Region of Magnetic Saturation", in Conf., Record IEEE-IAS Annual Meeting, 2002, pp. 35-42