

프린징 자속을 고려한 베어링리스 SRM 회전자극 설계 및 특성분석

논문

59-1-10

Rotor Pole Design and Characteristics Analysis of the Bearingless Switched Reluctance Motor Considering Fringing Flux

이 찬 교* · 오 주 환** · 신 광 철** · 권 병 일†

(Chan-Kyo Lee · Ju-Hwan Oh · Kwang-Chul Shin · Byung-Il Kwon)

Abstract - In this paper, a novel Bearingless Switched Reluctance Motor(BLSRM) with the shoe rotor pole in order to minimize the torque ripple and the suspension force ripple at an overlap position is proposed. For reduction the torque ripple and the suspension force ripple at an overlap position, the fringing flux is used for the main flux. This configuration of the rotor pole results in more average torque with high suspension force. In addition, this paper is compared the transient characteristics using the inductance look-up table. The torque, radial force and flux density are analyzed by finite element method.

Key Words : Bearingless SRM, Fringing flux, Suspension force, Rotor pole

1. 서 론

일반적으로 기계적 bearing에서는 회전할 때 마찰을 최소화하고, 기계적 마찰을 피하기 위해서 오일을 쓰거나 공기를 불어넣는 방법을 취하고 있으나, 기계적 마찰을 완전히 해소할 수는 없다. Bearing의 마찰을 최소화하기 위한 가장 좋은 방법은 접촉하지 않고 회전하는 것이다. 이러한 기술적 배경으로 나타난 것이 magnetic bearing이다[1].

Magnetic bearing이 기계적 bearing 보다 좋은 점은 부상을 통한 비접촉 특성으로 회전기기의 고속화가 가능하다는 점을 우선 말할 수 있다. 즉 기계적인 마모나 마찰이 없으므로 윤활유가 필요 없고 반영구적인 수명을 가지며, 공기 마찰이 없는 진공에서는 마찰 손실이 없다. 또한 윤활이나 유막형성을 위한 유체가 필요하지 않으므로 고진공이나 극저온, 혹은 고압환경 등 극한환경에서 별도의 밀폐장치 없이 사용이 가능하기 때문에 우주산업이나 극한기술에 적용하기가 용이하다[2][3]. 반면에 단점은 초기 투자비가 상대적으로 고가격이라는 문제와 전기적인 에너지를 이용하여 magnetic 에너지로 변화시키고, magnetic 에너지는 magnetic 재질(material)에 따라 전기에너지에 비해하지 않고 포화구간이 존재하게 되어 반비례 현상이 발생한다. 따라서 하중능력은 기계적 bearing의 약 1/100 정도로 작아진다는 점이다[4]. 따라서 크기 및 중량을 최소화하고 복잡한 시스템을 줄이기 위해 bearingless전동기의 연구가 필요하게 되었다.

Bearingless전동기는 기존 전동기에서 회전자 축방향 좌·우측에 magnetic Bearing이 없고 고정자와 회전자만 존재하며, 고정자 구조 내에 회전력권선과 부상력권선(suspension winding)이 설치되어 회전력과 부상력 두 가지를 같은 고정자 구조 내에서 발생하게 하는 방법이다. Bearingless전동기는 기존에 magnetic bearing을 갖는 전동기보다 회전자 축방향 길이가 짧아지므로 더 빠른 속도를 얻을 수 있다. 또한 bearingless전동기는 회전력에 필요한 자속이 radial force로 이용될 수 있기 때문에 회전자축 부상에 필요한 소비전력을 줄일 수 있는 장점을 지닌다. 이러한 bearingless전동기의 종류를 살펴보면 유도기형 bearingless전동기, 영구자석형 bearingless전동기 그리고 릴럭턴스형 bearingless전동기로 크게 나뉘볼 수 있다.

유도기형 bearingless전동기는 3상권선이 2set로 고정자에 권선(winding)되어 있으며, 하나는 전동기 회전력을 위해 4극으로 권선되어 있고, 다른 하나는 radial force 발생을 위해 2극으로 권선되어 있다. 연속적인 radial force는 4극권선 회전자계와 radial force권선 전류의 상호작용으로 발생한다[7][8]. 영구자석형 bearingless전동기는, 유도기형보다 크기 및 무게를 줄일 수 있고 고역률과 고효율이며, 회전자구조와 회전자부상 제어시스템은 비교적 간단하다[9][10].

릴럭턴스형 bearingless전동기는 기본적으로 고정자와 회전자 모두 돌극 모양의 구조로 단순하며, 강인한 기계적인 구조와 저가격화와 소형화가 가능하다. 그리고 회전자에 영구자석 및 권선이 없기 때문에 주위의 온도변화가 심한 곳에서도 구동시스템에 영향을 주지 않으므로 강인한 구동력을 갖는다. 흡입방사력(attractive radial force)은 릴럭턴스 토오크를 효과적으로 발생하기위해서 짧은 air-gap과 돌극 구조이므로 발생된다. 이것은 본질적으로 큰 radial force를 상당히 지니고 있기 때문이다. 하지만, 돌극 구조인 형상에서는 고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 위치

* 정 회 원 : (주)다윈시스 연구소

** 정 회 원 : (주)인텍FA 연구소, (주)LG이노텍 연구소

† 교신저자, 시니어회원 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수

E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2009년 9월 1일

최종완료 : 2009년 11월 23일

에서 부상력리플과 토오크리플이 매우 크다. 이러한 단점을 줄이기 위해서 전류여자방법 및 극 폭을 넓게 하여 부상력리플과 토오크리플 문제를 줄이는 연구가 이루어졌다 [11][12].

본 논문에서는 고정자극과 회전자극이 서로 겹쳐지기 시작하는 위치에서 부상력리플과 토오크리플을 개선시키기 위하여 회전자극 구조를 제안하였다. 제안된 회전자극 구조를 갖는 BLSRM은 일반 회전자극 구조를 갖는 BLSRM보다 고정자극과 회전자극이 서로 겹치는 위치에서 부상력을 빠르게 보상시킬 수 있고, 부상력 제어영역 구간이 넓어진다. 또한 평균 토오크도 상승시킬 수 있다. 제안된 새로운 회전자극 구조를 갖는 BLSRM의 특성을 분석하기 위하여 유한요소법 및 실험을 통하여다.

2. 새로운 BLSRM 회전자극 특성

2.1 BLSRM의 일반구조

BLSRM의 회전력 토오크는 그림 1과 같이 고정자극과 회전자극 간의 자기흡입력으로 발생한다. 이 과정에서 중요한 흡입방사력(attractive radial force)은 릴럭턴스 토오크를 효과적으로 발생하기 위해서 고정자극과 회전자극 간의 짧은 air-gap과 돌극 구조를 가졌기 때문에 발생된다. 즉, 일정한 air-gap에서 회전자를 부상시키기 위한 힘이 발생하게 된다. 그러므로 서로 다른 고정자권선을 갖는 BLSRM은 다른 전동기보다 비교적 큰 흡입력을 지니고 있다[13][14]. BLSRM은 그림 1과같이 동일한 고정자극에 전동기 회전력을 발생하기 위한 권선들과 부상력을 발생하기 위한 권선들로 이루어져 있다. 이 BLSRM은 또한 기존에 SRM과 같이 넓은 온도변화, 순시적인 높은 가속도 동작 그리고 높은 온도와 같은 특별한 동작환경에서도 지속적인 구동이 가능하다. 하지만 고속영역인 경우에는 비선형 자기적 특성을 최대한 줄여 여자전류의 최대화 및 최대효율을 갖아야 한다.

그림 1에서 토오크는 고정자 회전력권선(N_{ma})이 여자(commutation)되면 인접한 회전자는 인덕턴스가 최대가 되려는 방향 즉, 여자된 고정자와 정렬하려는 방향으로 움직이게 된다. 회전자와 고정자가 일치되기 전에 고정자에 회전력권선(N_{ma})의 여자를 끊고 인접한 다음 상(phase)의 권선을 여자하게 되면 다시 회전자가 연속적으로 회전하게 된다. 이와 같이 회전자의 위치에 따라 순차적으로 여자(commutation)시켜 나가면 회전자는 한쪽방향으로 계속해서 회전하게 된다. 회전력을 얻기 위해 회전력권선에 여자하게 되면 air-gap에서 자속이 포화되어 회전자가 움직이게 되고 전자석처럼 회전자는 공극 a1, a2, a3, a4 어느 한 고정자극 방향으로 공극이 최소화되면서 고정자극과 회전극이 서로 붙게 된다. 이 힘은 다른 bearingless전동기 보다 상당히 큰 힘을 지니게 된다. 이러한 회전자속을 air-gap안에 부상시키기 위해 부상력권선(N_{sa})에 +·-전류를 적절하게 제어하여 일정한 air-gap를 유지시킨다. 하지만 BLSRM은 큰 인덕턴스 비(比)로 인해 식 (1)과 같이 다른 전동기 보다 상당히 큰 radial force가 발생하게 된다.

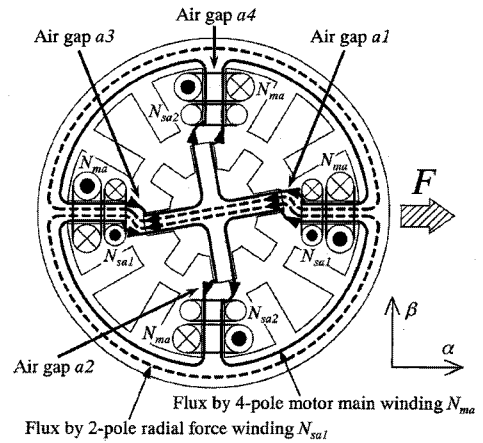


그림 1 BLSRM 기본구조

Fig. 1 Conventional structure of BLSRM

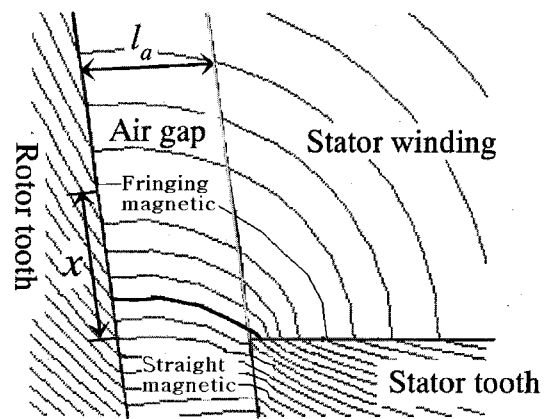


그림 2 주자속과 프링징자속 경로

Fig. 2 Straight flux and fringing flux paths

$$F_x = 4 K_f(\Phi) N_m i_{ma} N_s i_{sa1} \quad (1)$$

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

$$T_a = G_t(\Phi)(4 N_m^2 i_{ma}^2 + 2 N_s^2 i_{sa1}^2 + 2 N_s^2 i_{sa2}^2) \quad (2)$$

여기서 $K_f(\Phi)$ 와 $G_t(\Phi)$ 는 비례계수로써 전동기의 크기와 회전자극의 위치로 정의된다. 이것은 그림 2와 같이 회전자극과 고정자극에 따른 공극자속밀도에 비례한다. 그림 2에서 자기적인 특성이 이상적이라면 자속 경로는 주자속(straight flux) 경로만 존재하지만, 실제로는 그림 2와 같이 두 경로로 주자속(straight magnetic) 경로와 프링징자속(fringing flux) 경로로 나뉜다. 주자속은 radial force 및 토오크 발생에 직접적인 관계를 갖지만 프링징자속(fringing flux)은 각각의 권선에 전류 인가 시 di/dt 성분을 줄이거나 토오크리플과 일정한 air-gap유지에 불필요한 요소가 된다.

이상적인 자기특성이라면 그림 3(a)와 같이 고정자극과 회전자극이 서로 겹쳐지기 시작하는 overlap구간에서 이상적인(ideal) 자기특성이 발생한다. 그림 3(b)는 실제 자기특성이면, 인덕턴스 특성과 그때의 전류특성을 대략적으로 나타낸 것이다. 실제 전류는 식(3)과 같이 상태방정식으로 정리할 수 있다.

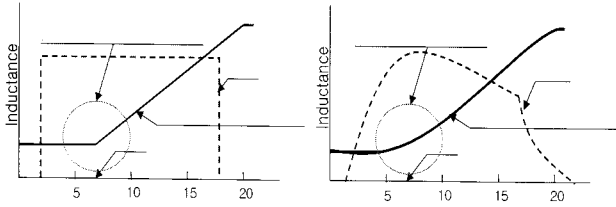


그림 3 이상적인 자속경로와 실제자속경로인 경우의 인덕턴스 및 전류

Fig. 3 Inductance and current of ideal model and actual model fluxes

$$V = R_{ma} i_{ma} + L_{ma} \frac{di_{ma}}{dt} + M_{ma,sa1} \frac{di_{sa}}{dt} + M_{ma,sa2} \frac{di_{sa2}}{dt} + e \quad (3)$$

$$\therefore e = (i_{ma}^2 \frac{dL_{ma}}{d\theta} + i_{sa}^2 \frac{dM_{ma,sa1}}{d\theta} + i_{sa2}^2 \frac{dM_{ma,sa2}}{d\theta}) \omega_r$$

여기서 e 는 역기전력이며, $L_{ma}, M_{ma,sa1}, M_{ma,sa2}$ 는 각각 자기인덕턴스와 sa1 및 sa2 권선에 의한 상호인덕턴스이다.

이와 같이 자기적인 영향 때문에 저속보다는 고속인 경우에 더욱더 고려해야 한다. 고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 위치에서 이러한 프린징자속(fringing flux)은 부상력리플과 토오크리플을 발생시키게 된다.

2.2 새로운 극 구조를 갖는 BLSRM

회전자를 부상시키기 위해 구조계를 그림 4와 같이 설계한다. 기본으로 설계된 BLSRM의 부상력리플과 토오크리플을 고려하여 자기형상의 구조계를 재설계 한다. 재설계의 주목은 그림 2에서와 같이 프린징자속을 유효자속성분으로 이끌어 내기위한 것이다. 재설계 전에 본 논문에서 BLSRM의 설계 목표를 정격속도 10,000[rpm], 정격전압 310[Vdc], 출력은 500[W]급으로 하였으며, 제약조건은 고정자외경 127[mm], 극수는 12/8로 한다. 그림 4와 표 1은 BLSRM의 기본형상과 기계적, 전기적 주요사양을 나타낸 것이다.

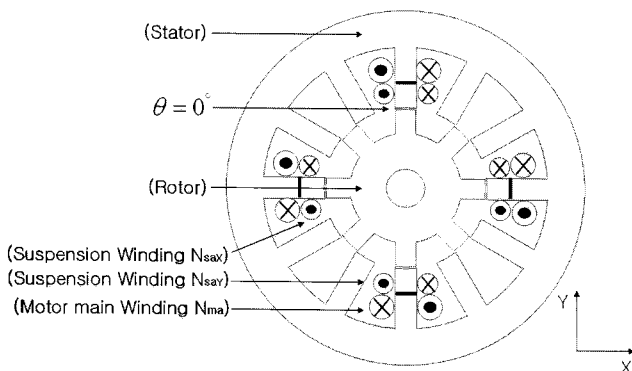


그림 4 BLSRM 설계 형상 및 치수

Fig. 4 Conventional shape of BLSRM

표 1 BLSRM의 기본 주요사양

Table 1 Specification of designed BLSRM

항 목	Stator	Rotor
극 수	12	8
극호각[deg.]	15.6	14.8
외경[mm]	127	56.8
스택 길이[mm]	57.5	57.5
슬롯 깊이[mm]	21.5	8.6
요크 두께[mm]	13	12.8
극당 턴 수[turns]	Main winding: 59	
	Suspension winding: 36	
슬롯 넓이[mm ²]	433	
공극[mm]	0.6	
정격출력[W]	500	
정격전압[V]	310	
정격속도[rpm]	10,000	

고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 위치에서 일정한 공극을 유지하고 토오크리플을 줄이기 위해서 그림 5와 같이 새로운 회전자극을 제안하였다.

본 논문에서는 그림 5와 같이 회전자가 한쪽방향으로만 회전한다고 가정하여 회전자극에 한쪽 방향으로만 shoe형상을 설치하였다. 그림 5(b)에서 shoe부분은 기본회전자극 형상에서 1.5 [mm]~3[mm]까지 0.5[mm]간격으로 변화를 주어 네 가지 형상을 고려하였다.

그림 6은 유한요소해석을 통한 기본회전자극 형상과 제안한 shoe구조의 회전자극 형상의 토오크 특성이다. 회전력권선에 전류 6.5[A]를 인가한 후, 회전자 위치에 따른 토오크 특성을 해석한 것이다.

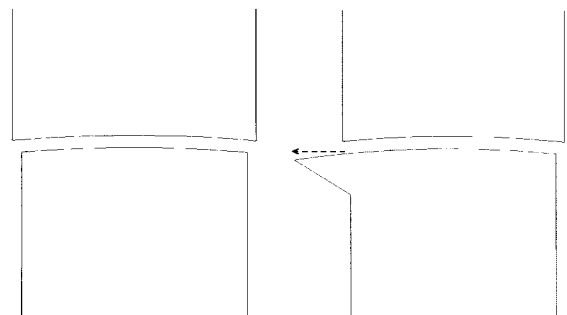


그림 5 회전자형상: (a) 기본구조, (b) 제안한 shoe 구조

Fig. 5 Rotor shape (a) Conventional model, (b) Shoe model

Shoe구조의 회전자극 길이(x)가 길어질수록 토오크 발생 구간이 조금씩 앞쪽에서 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고정자극과 회전자극이 overlap 위치에서 부상력권선으로 전류인가 시 토오크 발생시점 보다 앞서서 부상력을 발생시킬 수 있음을 의미한다. 또한 토오크 발생 영역이 넓

어저 제어영역 구간이 넓어짐을 알 수 있다. 기본구조 회전자극 형상인 경우 토오크가 약 0.58[Nm]가 발생하였고, shoe형상의 길이가 2.5[mm]인 경우 0.617[Nm]의 토오크가 발생하였다. 이는 기본구조 회전자극 형상보다 5.77[%] 증가하였다. 3[mm]일 때 0.605[Nm]로 다시 일정 토오크가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 기본구조 회전자극 형상과 제안한 shoe구조의 회전자극 형상을 2.5[mm] 고려한 회전자극 형상으로 부상력 프로파일을 비교한 것이다. 부상력 권선에 7[A]를 인가시켜 정특성 해석을 하였다. shoe형상을 고려하여 주었을 때 인덕턴스 프로파일의 형상이 바뀌기 때문에 부상력 발생구간이 기본구조 회전자극 형상보다 좀 더 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 공극에서 쇄교하는 자속의 양을 비교하기 위하여 기본구조 회전자극 형상과 제안한 shoe구조의 회전자극 형상을 비교하였다. $-5 \sim 0^{\circ}$ 에 위치할 때 0.5° 간격으로 회전자극과 고정자극의 표면자속량을 해석하여 산출하였다. 고정자와 회전자의 공극축의 표면자속밀도를 해석한 $B_{sur, s, r}$ 의 결과로 부터 쇄교자속량을 구할 수 있다.

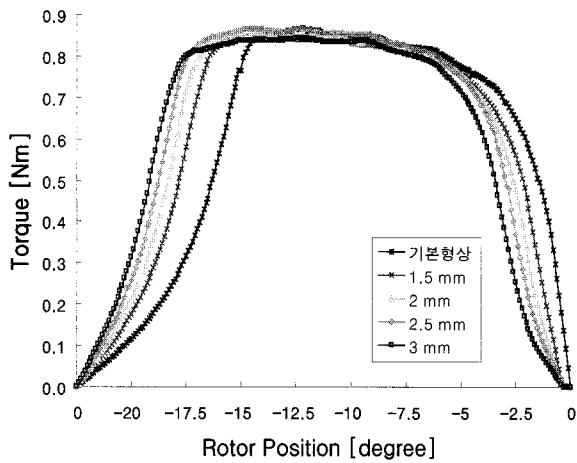


그림 6 토오크 특성 비교
Fig. 6 Torque characteristics comparison

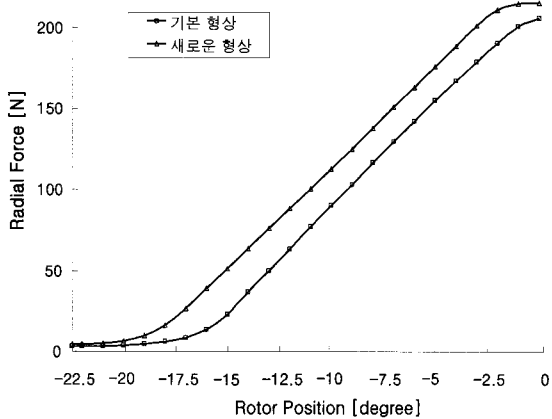


그림 7 부상력 특성 비교
Fig. 7 Suspension characteristics comparison

$$\lambda_{sur, s, r} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_{sur, s, r} \cdot l_{stack} d\theta \quad (4)$$

여기서, 아래첨자 sur 은 극표면, s 는 고정자, r 은 회전자, l_{stack} 은 고정자와 회전자의 적층 길이, θ_1 과 θ_2 는 극의 반경방향 각도를 나타낸다.

그림 8은 기본구조 회전자극형상과 shoe형상을 갖는 회전자극 모델간의 누설자속 감소량을 해석하여 비교하기 위한 회전자극의 상대적 위치를 나타낸 그림이다.

그림 9는 회전자 위치에 따른 자속량을 유한요소 해석을 통하여 비교한 결과이다.

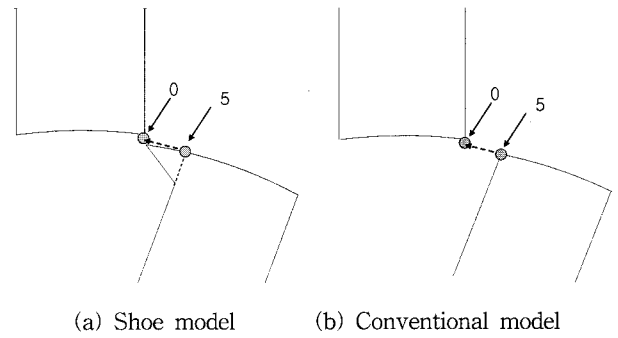
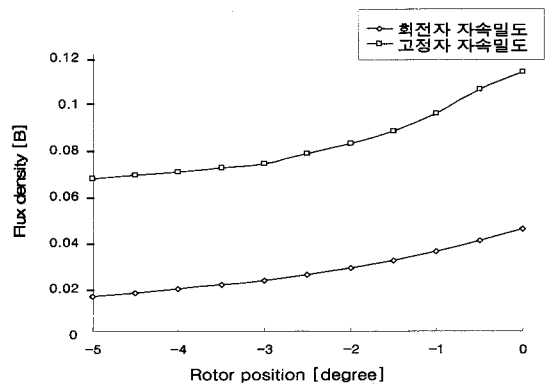
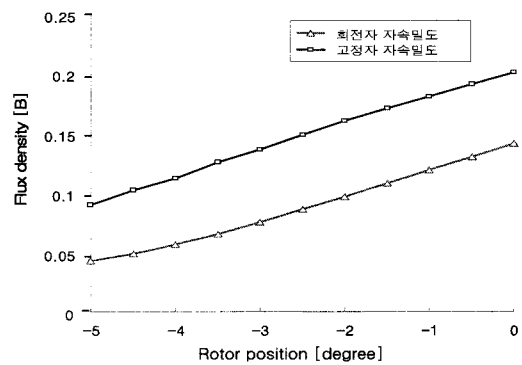


그림 8 누설 자속량을 측정하기 위한 구간
Fig. 8 Region for leakage flux measurement



(a) 기본구조 회전자극



(b) Shoe를 갖는 회전자극

그림 9 회전자 위치에 따른 자속량 비교
Fig. 9 Comparison of flux according to rotor position

프린징자속(fringing-flux)비율은

$$f_{ratio} = (1 - \frac{\lambda_{sur, r}}{\lambda_{sur, s}}) \times 100[\%]$$

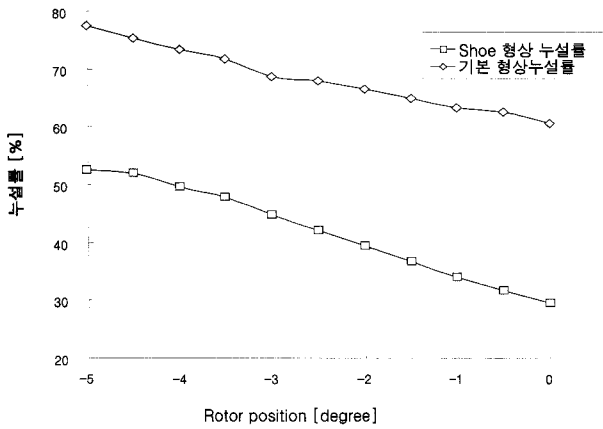


그림 10 회전자 위치에 따른 프린징자속률 비교

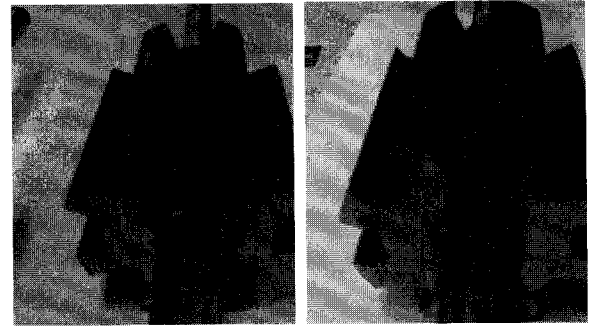
Fig. 10 Comparison of fringing flux ratio

그림 10과 같이 제안한 shoe구조의 회전자극은 기본구조 회전자극 형상보다 프린징자속(fringing flux)이 감소됨을 확인할 수 있었다. 프린징자속 비율의 차이가 가장 적은 부분은 회전자 위치가 -5[°]이며, 기본구조 회전자극 형상은 누설률이 77.39[%]이고 shoe구조의 회전자극을 고려하였을 때 누설률은 51.91[%]이다. 두 형상의 누설률은 회전자극과 고정자극이 서로 정렬되기 시작하는 위치 0[°]일 때 일반구조를 갖는 회전자극형상의 누설률이 60[%]이고 shoe구조의 회전자극을 고려한 형상이 29.54[%]로, 프리징효과 또한 그 차이가 가장 크게 나타났다. 이것은 shoe 길이와 많은 관계를 갖고 있으며, shoe 길이로 인한 누설성분을 주성분으로 일으키는 큰 장점을 갖는다. 부상력과 토오크를 동시에 발생하는 BLSRM의 구조에서는 이러한 특성을 가짐으로서 고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 지점이나 비정렬 위치에서 부상력만을 일으킬 수 있다. 또한 토오크발생 권선에 흐르는 전류로부터 부상력권선에 흐르는 전류의 영향을 크게 줄일 수 있음을 비취볼 수 있다.

그림 11은 표 1을 근거로 제작된 BLSRM의 회전자와 고정자이다. 그림 11(a)는 기본구조를 갖는 회전자극 형상이며 그림 11(b)는 제안한 shoe극을 2.5[mm] 고려한 회전자극이다. 그림 11(c)는 부상력권선과 토오크를 발생시키는 회전력 권선이 모두 한국에 집중되어 감긴 BLSRM의 고정자이다. 그림 12는 실제 제작된 BLSRM의 실제 인덕턴스 비교 결과이다. 그림 13은 회전자 위치에 따른 정적토오크 특성을 비교한 것이다. 그림 12와 그림 13의 실험방법은 DSP 컨트롤러를 이용하여 얻은 결과이다. 스위칭 주파수는 10[kHz]이며, 샘플링 타임은 50[usec]로 실험하였다. 토오크 발생 회전력권선에 6.5[A] 전류를 일정하게 흘려주고 회전자 위치를 변화시켜가며 인덕턴스와 토오크 특성 결과를 얻었다. 실험 결과 기본회전자극 형상보다 제안된 shoe회전자극의 인덕턴스 상승은 더 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다. 그러므로

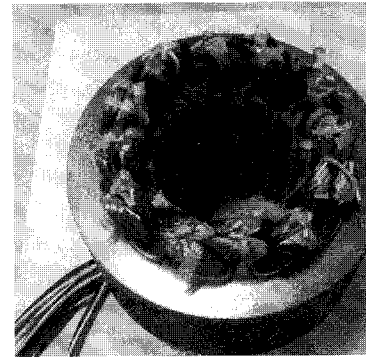
고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 overlap 위치에서 부상력을 효과적으로 이용할 수 있음을 나타낸다. Overlap 위치에서 부상력은 부상력권선으로만 효과적으로 빠르게 상승시키고 그 후 토오크 발생 회전력권선으로 전류를 인가하여 토오크 제어를 시행 할 수 있음을 나타낸다.

그림 13에서 토오크 특성을 살펴보면, 평균 토오크가 상승하였고 연속 회전 동작 시 토오크리플을 줄일 수 있음을 예측할 수 있다.



(a) Conventional Rotor

(b) Proposed Rotor



(c) Stator

그림 11 제작된 BLSRM의 회전자와 고정자

Fig. 11 Rotor and stator of developed BLSRM

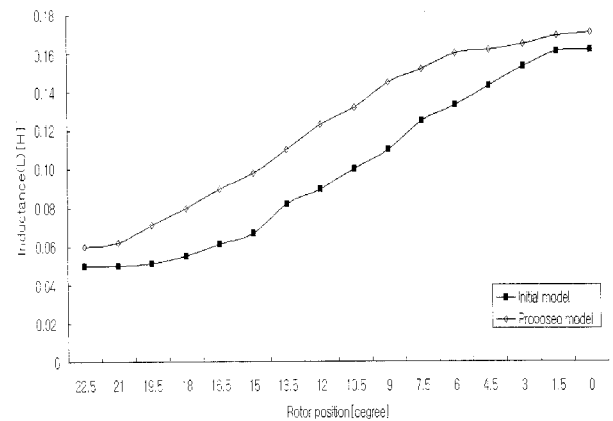


그림 12 인덕턴스 특성 비교

Fig. 12 Comparison of inductance

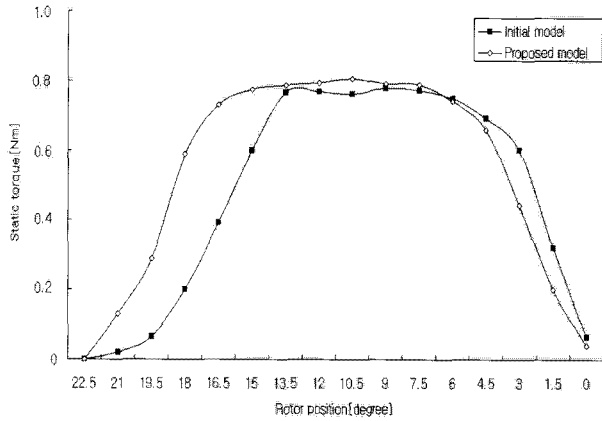


그림 13 정적토크 특성 비교
Fig. 13 Comparison of torque of BLSRM

2.3 새로운 극 구조를 갖는 BLSRM의 동특성

BLSRM의 동특성 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 회전자의 변위가 $x=0, y=0$ 이라고 가정한다.
- 2) 회전자의 정지 시와 구동시, 회전자극 위치를 알고 있다고 가정한다.
- 3) 토크를 발생시키는 주권선의 인덕턴스, 그리고 부상을 담당하는 부상력 권선의 인덕턴스 프로파일은 각각 전류에 따른 X-Y축 4상한 구간으로 사전에 얻어, 동특성 해석시 Look-up 테이블을 이용하여 상호인덕턴스와 자기 인덕턴스를 계산하였다.

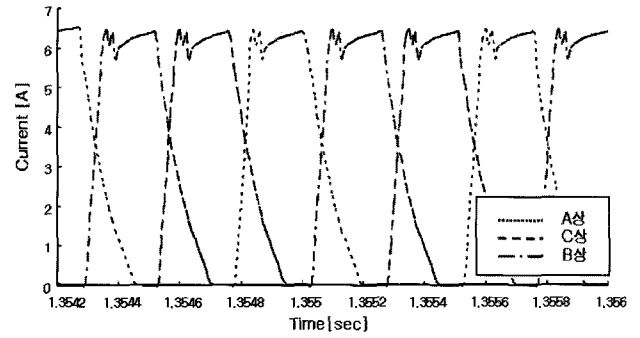
상용 프로그램을 통해서 회전자 편심에 따른 위치제어와 속도제어를 구현하기가 어렵기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 가정 3)에서 언급한바 각각의 인덕턴스 프로파일을 FEM으로 사전에 구하고 전기상태방정식과 기계적 상태방정식을 이용하여 그 전류와 토크 특성만을 비교 검토하였다.

그림 14(a)는 정격속도 운전 시 그림 5(a)에 대한 상전류 파형을 나타낸 것이다. 스위칭 On각은 인덕턴스가 상승하는 시점에서 앞쪽으로 6.7° 로 설정하였고 Off각은 인덕턴스가 최대 시점으로부터 앞쪽으로 5.7° 로 설정하였고, 히스테리시스 전류제어를 선택하였다.

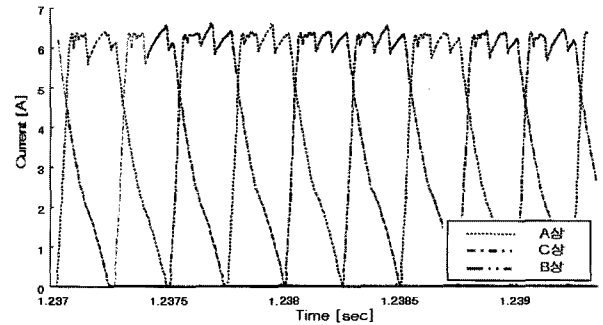
그림 14(b)는 그림 5(b) shoe형상을 갖는 회전자극의 상전류이다. 스위칭 On각은 인덕턴스가 상승하는 시점에서 앞쪽으로 4.6° 로 설정하였고, 스위칭 Off 구간은 인덕턴스가 최대 시점으로부터 앞쪽으로 5.7° 로 설정하였다. 기본구조 회전자극 형상보다 좀 더 넓은 토크 발생구간을 가짐을 알 수 있다.

그림 15(a)는 그림 5(a) 형상의 출력 토크 특성을 나타낸 것이다. 토크 리플은 약 63[%]인 것을 확인 할 수 있다. 그림 15(b)는 그림 5(b) shoe를 고려한 회전자극 형상의 출력 토크 특성을 나타낸 것이다. 토크 리플은 46.3[%]로 기본구조 회전자극 형상 보다 약 26.62[%] 감소하였다.

제한한 shoe 회전자극 형상이 토크를 발생시키는 주권선에 전류리플을 더욱 작게 할 수 있음을 보여준다. 회전자와 고정자가 일치되기 전 구간에서 기본구조를 갖는 회전자



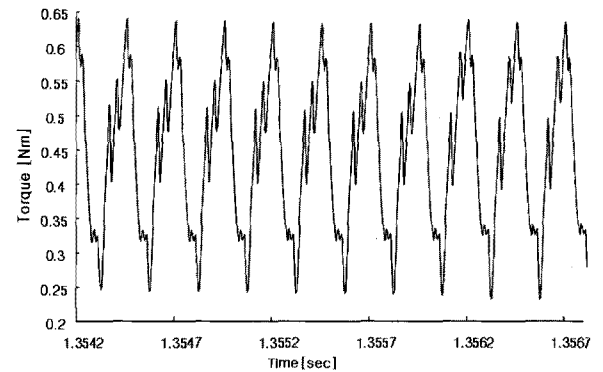
(a) Conventional model



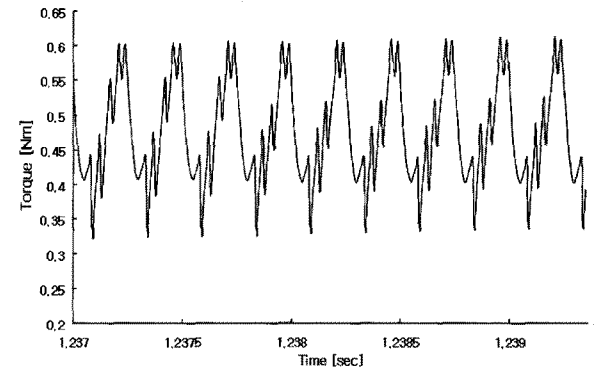
(b) Shoe model

그림 14 정격속도 구동 시 상전류 특성
(10000[rpm], 부하 0.5[Nm])

Fig. 14 Current characteristics in rate speed
(10000[rpm], load 0.5[Nm])



(a) Conventional model



(b) shoe model

그림 15 정격속도 구동시 토크 특성(10000rpm)

Fig. 15 Torque characteristics in rate speed (10000rpm)

극은 프링징자속 발생으로 인해 유효자속성분을 얻기 어려웠다. 하지만, 제안한 회전자극은 토오크 발생구간을 shoe 길이만큼 앞서 발생할 수 있었고, 스위칭 On/Off각 또한 길어지면서 토오크와 부상력을 제어할 수 있는 제어영역이 보다 넓어짐을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 고정자극과 회전자극이 서로 정렬되기 시작하는 위치에서 발생하는 프링징자속(fringing flux)을 부상력으로 이용하기 위해 회전자극에 shoe구조를 갖는 회전자극을 제안하였다. 제안한 BLSRM의 경우 극호각에 대한 휴지기간을 발생시키지 않기 때문에 극수 증가, 평균 토오크를 증가시키고, 부상력을 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 기본구조 회전자극 형상을 갖는 BLSRM보다 토오크리플을 제어할 수 있는 영역과 부상력리플을 제어할 수 있는 영역을 넓힐 수 있었다. 제안한 회전자극을 갖는 BLSRM과 기본구조 회전자극 형상을 갖는 BLSRM을 정적인 유한요소해석과 정적인 시험분석결과로 그 효용성을 검증할 수 있었다. 그리고 동적특성을 시뮬레이션으로 비교분석하기위해서 사전에 FEM을 통해 인덕턴스 프로파일을 얻었고 비교분석하였다. 결과적으로 토오크리플을 줄이기 위해 shoe를 고려한 회전자극을 재설계하였고, 새롭게 제안한 회전자극 형상은 기본구조 회전자극 형상보다 회전력인 토오크는 5.77[%]증가할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 비교적 간단히 예측할 수 있었다. 그리고 프링징자속(Fringing flux)은 shoe를 고려해준 회전자극이 약 33[%]감소하였음을 유한요소 해석결과로 살펴볼 수 있었다. 향후 제작된 BLSRM의 동적특성을 실험으로 비교분석하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] "고정밀 자기베어링의 제어 및 응용 기술" 한국공작기계학회지 제11권 제2호
 [2] "반경방향 자기베어링의 최적설계에 관한 연구" 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제7호
 [3] 한국전력공사 전력연구원 초진도 베어링 연구팀 홈페이지
 [4] 일본기계학회편, 자기베어링의 기초와 응용, 양현당
 [5] 마쓰시타, "자기베어링의 동향", tribologist
 [6] 박영진, "능동자기베어링시스템의 반복제어 및 통합설계", 한양대학교 박사학위논문
 [7] Takahiro Suzuki, 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
 [8] Takahiro Suzuki, etc "An Airgap Flux Oriented Vector Controller for Stable Magnetic Suspension during High Torque Acceleration in Bearingless Induction Motors", IEEE Trans., Vol. 10, No. 2, pp.

1543-1550, 1999
 [9] Masahide Ooshima, etc "A Rotor Design of a Permanent Magnet - Type Bearingless Motor Considering Demagnetization", IEEE Trans., Vol. 3, No. 2, pp. 655-660, 1997
 [10] Masatsugu Takemoto, etc "A deeply-Buried Permanent Magnet Bearingless Motor with 2-pole Motor Windings and 4-pole Suspension Windings", IEEE Trans., Vol. 2, No. 1, pp. 1413-1420, 2003
 [11] Chikara Michioka, etc "A Decoupling Control Method of Reluctance Type Bearingless Motors Considering Magnetic Saturation", IEEE Trans., Vol. 32, No. 5, pp. 1204-1210, 1996
 [12] Masatsugu Takemoto, etc "Radial Force and Torque of a Bearingless Switched Reluctance Motor Operating in a Region of Magnetic Saturation", IEEE Trans., Vol. 40, No. 1, pp. 103-112, 2004
 [13] M. Takemoto, A. Chiba. H. Akagi and T. Fukao, "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
 [14] K. Shimada, M. Takemoto, A. Chiba and T. Fukao, "Radial Force in Switched Reluctance Type Bearingless Motors", (in japanese), in proc. 9th symp. Electromagnetics and Dynamics(The 9th SEAD), 1997, pp. 547-552.
 [15] "스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)와 구동드라이버의 개발연구", 통상산업부, 중간보고서, 1997.
 [16] Miller, T.J.E. "Switched Reluctance Motors and Their Control", Clarendon Press, Oxford, 1993

저 자 소 개



이 찬 교 (李贊教)

1982년 10월 1일생. 2005년 동양대학교 시스템제어공학부 졸업. 2007년 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2007년~현재 (주)다원시스 연구소 주임연구원

Tel : 010-6606-0806

Fax : 031-409-1277

E-mail : lcgface@dawonsys.co.kr



오 주 환 (吳 周 桓)

1979년 5월 16일생. 2002년 호남대학교 전기과 졸업. 2005년 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사). 2005~2008 동 대학원 전자전기제어측공학과 박사수료. 2006년~현재 인텍FA(주)부설 연구소 전력전자 Power management part 선임연구원
Tel : 031-266-0019
Fax : 031-409-1277
E-mail : ohjuhwan@hanyang.ac.kr



신 광 철 (申 光 徹)

1975년 6월 4일생. 2004년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업 (석사). 2006년~2009 일진전기(주) 에너지사업부 계장. 2009~현재 LG이노텍 연구소 주임연구원
Tel : 031-409-1277
Fax : 031-409-1277
E-mail : opticion@lginnotek.com



권 병 일 (權 丙 一)

1955년 5월 12일생. 1981년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(박사). 1991년~현재 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 교수.
Tel : 031-400-5165
Fax : 031-406-5073
E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr