하이브리드극 구조의 베어링리스 SRM 공극 제어

Huijun Wang·박태흡·김태형·이동희·안진우
경성대학교

Air Gap Control of Hybride Bearingless SRM

Huijun Wang, Tae-Hub Park, Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungsung University

ABSTRACT

Bearingless switched reluctance motors (SRM) have combined advantages of conventional SRM and magnetic bearings. Therefore in this paper based on novel structure of Bearingless SRM, an accurate mathematic model of radial force is deduced. Meanwhile in order to realize steady suspending, a novel radial force control method—— Direct Instantaneous Radial Force Control (DIRFC) is presented. The effectiveness of new model and DIRFC is proved by the simulation results.

1. 서 론

고속 운전이 요구되는 응용분야가 증가하면서 운전시 발생하는 베어링 마모에 의한 시스템의 효율저하 및 유지보수 등의 기계적인 문제를 극복하기 위한 다양한 베어링리스 형태의 전동기구가 연구되고 있으며, 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)분야에서도 다양한 형태의 베어링리스 SRM(Bearingless SRM, 이하 BLSRM)에 관한 연구가 진행되고 있다.[1]

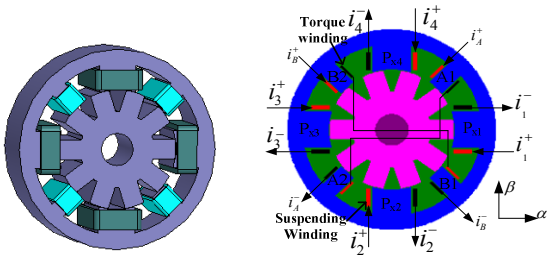
그러나 기존의 BLSRM은 토크를 발생시키는 영역과 회전자를 지지하는 축방향 힘을 발생시키는 영역이 중첩되는 구간이 존재하며, 이 구간은 충분히 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다.[1] 또한 전력변환기를 구성하기 위해 많은 수의 스위칭소자를 필요로 하기 때문에 비용적인 문제가 발생되며, 회전자 축방향 길이에 증가 및 부토크 발생으로 인한 속도영역제한을 가진다는 단점을 가지고 있다.[2-6]

본 논문에서는 회전자의 위치변화에도 일정한 축방향 지지력을 가지면서, 토크발생에 영향을 주지 않는 새로운 형태의 BLSRM의 구조를 제안하고 고정자와 회전자 사이의 fring flux를 고려한 수학적 모델을 분석하였다. 이와 함께 제안된 BLSRM의 축방향 지지력 제어를 위한 직접 순시 축방향 지지력제어 기법(Direct Instantaneous Radial Force Control, 이하 DIRFC)을 제안하고 이에 대한 수치해석 시뮬레이션을 통해본 가능성을 검증하였다

2. 제안된 베어링리스 SRM

2.1. 제안된 BLSRM의 구조

그림 1은 제안된 BLSRM의 구조를 나타내고 있으며, 종래의 구조와는 달리 토크를 발생하는 부분과 축방향 지지력을 발생시키는 구조를 분리하여 설계되었다. 제안된 BLSRM에서 토크는 A상과 B상에 의해 발생되는 2상 구동이며, 각 상을 구성하는 A1과 A2, B1과 B2는 직렬로 연결되어 있다. 축방향 지지력을 발생시키는 극은 P_{x1}, P_{x2}, P_{x3}, P_{x4}로 상하좌우에 배치되며, 일정한 축방향 지지력을 발생하기 위해 회전자 극의 1주기에 해당하는 극폭으로 설계되었고 개별적으로 제어된다.



(a) Stator and rotor (b) Winding distribution

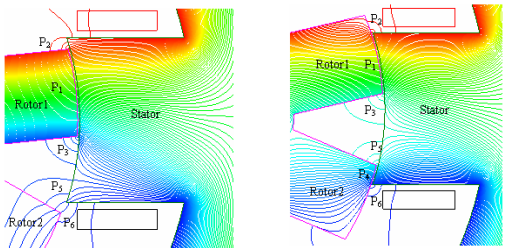
그림 1 제안된 Bearingless SRM의 구조
Fig.1 Structure of proposed Bearingless SRM

축방향으로 발생하는 지지력을 통하여 회전자의 공극을 일정하게 유지하기 위해서는 축방향 지지력을 발생시키는 극의 전류 i_1, i_2, i_3, i_4를 개별적으로 제어하게 된다. 예로 회전자가 중심에서 β 방향으로 변위를 가질 때, P_{x2}의 권선을 제어하는 스위치를 턴-온하여 전류 i_2를 도통시키고 P_{x1}, P_{x3}, P_{x4}의 전류를 흘리지 않는다면 β 방향의 축방향 힘이 생성되어 회전자가 중심지점으로 이동하게 된다.

2.2. 제안된 BLSRM의 수학적 모델

제안된 BLSRM의 구조에서 회전자의 극폭은 β이며, 지지력 생성에 대한 고정자 극폭은 회전자의 극폭과 다음 회전자극까지의 간격, 즉 회전자극의 1피치에 해당되며 τ_r로 표현하였다. 이와 함께 β_0는 $1/2(\tau r-\beta r)$로 정의된다.

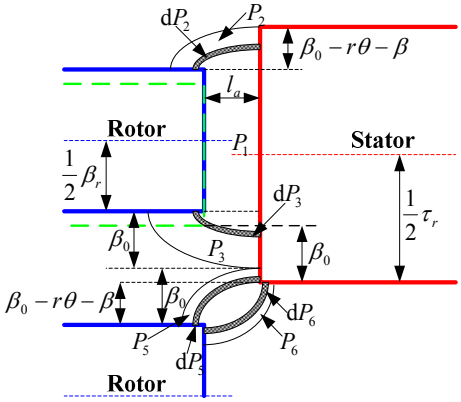
그림 2는 회전자의 위치에 따른 $r\Theta+\beta\le\beta_0$ 와 $\beta_0\le r\Theta+\beta\le(\beta_0+0.5\beta_r)$의 두경우에 대한 자계 분포를 나타내고 있다. 회전자의 위치에 따른 두 경우에서 공극의 자기회로는 그림 3과 같이 간략화 될 수 있다.



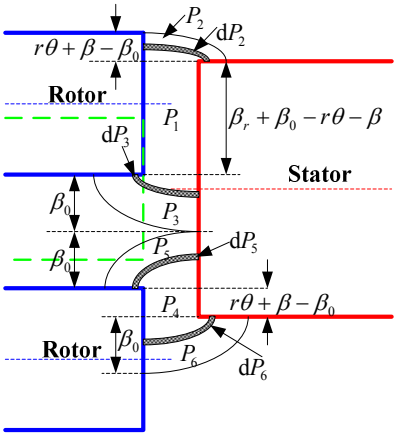
(a) rΘ+β ≤ β0 (b) β0≤rΘ+β ≤(β0+0.5βr)

그림 2. 공극의 자계 분포

Fig. 2 Magnetic field distribution of air-gap



(a) rΘ+β ≤ β0



(b) β0≤rΘ+β ≤(β0+0.5βr)

그림 3 공극의 등가 자기 회로

Fig. 3 Equivalent magnetic circuit of air-gap

대칭적인 구조로 인해 정방향 회전자 위치 범위는 쉽게 고려되어 진다. 그리고 이에 대한 연산은 회전자 위치에 대한 두 경우에 대해 수행 될 수 있다. rΘ+β≤β0와 β0≤rΘ+β≤(β0+0.5βr)에서의 공극에서 발생하는 자속의 투자는 식(1), 식(2)와 같이 표현된다.

$$P_{x1}=\frac{\mu_0 l\beta_r}{l_0-\alpha+\frac{\beta\theta}{2}}+3\frac{\mu_0 l}{a\pi-2}\left[a\ln\frac{al_a+\beta_0}{al_a}+\frac{a\pi-4}{\pi}\ln\frac{2l_a+\pi\beta_0}{2l_a}\right]$$
$$-\frac{\mu_0 l}{a\pi-2}\left[a\ln\frac{al_a-r\theta-\beta+\beta_0}{al_a}+\frac{a\pi-4}{\pi}\ln\frac{2l_a+\pi(-r\theta-\beta+\beta_0)}{2l_a}\right] \quad (1)$$

$$P_{x1}=\frac{\mu_0 l\beta_r}{l_0-\alpha+\frac{\beta\theta}{2}}+3\frac{\mu_0 l}{a\pi-2}\left[a\ln\frac{al_a+\beta_0}{al_a}+\frac{a\pi-4}{\pi}\ln\frac{2l_a+\pi\beta_0}{2l_a}\right]$$
$$+\frac{\mu_0 l}{a\pi-2}\left[a\ln\frac{al_a+r\theta+\beta-\beta_0}{al_a}+\frac{a\pi-4}{\pi}\ln\frac{2l_a+\pi(r\theta+\beta-\beta_0)}{2l_a}\right] \quad (2)$$

여기서 l은 철심의 길이이며, μ_0는 투자율이다. l_0 은 편심 없는 공극의 크기이고, α는 x축 방향에서의 편심 변위이다. a는 FEM 분석을 통해 얻어진 계수이며, l_a는 식 (3)과 같다.

축방향 힘 F_α, F_β는 회전자의 각과 변위 α, β의 관계로부터 유도하여 식(4), 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 I가 전류, N이 권선권수이다.

$$l_a=l_0-\alpha+\frac{\beta\theta}{2} \quad (3)$$

$$F_\alpha=\frac{\partial W_{x1}}{\partial\alpha}=\frac{1}{2}\frac{\partial P_{x1}}{\partial\alpha}(Ni)^2 \quad (4)$$

$$F_\beta=\frac{\partial W_{x1}}{\partial\beta}=\frac{1}{2}\frac{\partial P_{x1}}{\partial\beta}(Ni)^2 \quad (5)$$

2.3. 제안된 BLSRM의 제어

BLSRM의 안정적인 구동을 위해서는 축방향으로 발생하는 힘이 회전자 위치에 관계없이 공극의 크기가 일정할 수 있도록 안정적으로 제어되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 제안된 BLSRM과 함께 그림 4와 같이 축방향으로 발생하는 힘을 직접-순시 제어방식에 의해 제어하는 새로운 제어기법을 제안하였다. 제안된 제어기법에서 축방향으로 발생하는 힘에 대한 제어 블록은 위치에 관한제어와 축방향 힘에 관한 제어를 위해 2개의 궤환 제어기로 구성된다. 속도 제어 블록은 속도제어와 토크제어로 구성된 2개의 궤환 제어기로 되어있다. 외부의 속도 제어 루프에서는 우선 기준 속도 ω_{ref}와 실제 속도 ω_{rm}의 비교를 통해 속도오차 ω_{err}을 산출하고 속력 제어기에 입력하여 기준 토크 T_{ref} 를 출력한다. 한편 위치 신호와 토크 권선의 전류, 축방향 힘 권선, 그리고 2개의 궤환를 통한 권선의 실제 토크를 look-up 테이블을 통해 얻어지게 된다.

이때 축방향으로 발생하는 힘을 제어하는 부분에서 α-β 의 두 방향으로 발생하는 변위 오차는 축방향 힘은 PID제어기에 입력된다. 따라서 실제 축방향으로 발생하는 힘은 look-up테이블을 이용하여 전류-위치에 얻어진 축방향 힘과 지령치에 대한 히스테리시스제어를 통해 제어된다.

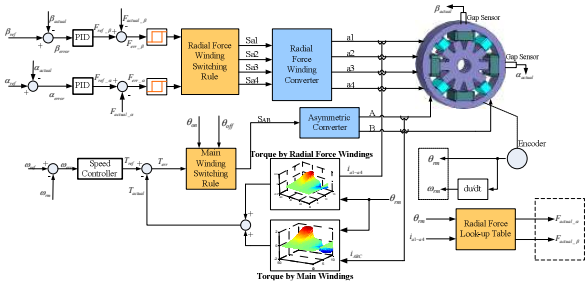


그림 4 제안된 DIRFC의 제어도

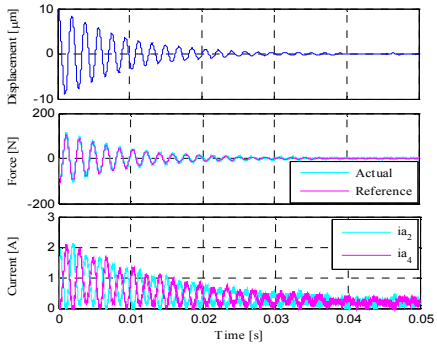
Fig. 4 Proposed control scheme

3. 시뮬레이션 결과

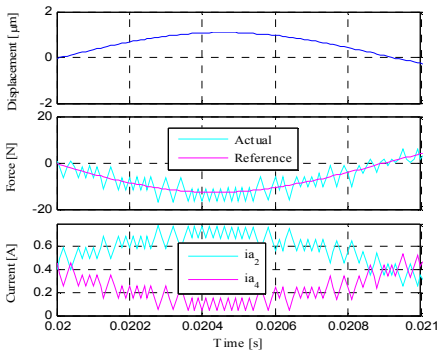
제안된 BLSRM과 제어기법의 효용성을 살펴보기 위해 수치해석을 통한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 이용된 전동기의 사양은 표1와 같다.

표 1. 전동기 파라메타
Table.I Parameters of motor

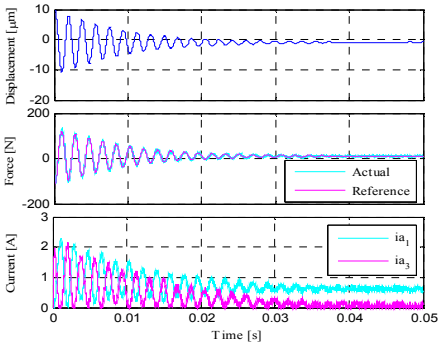
Parameter	Value
Number of Stator Poles	8
Number of Rotor Poles	10
Turns of main winding	80
Turns of radial force winding	80
Pole arc of stator for torque [deg]	18
Pole arc of stator for radial force [deg]	36
Pole arc of rotor [deg]	18



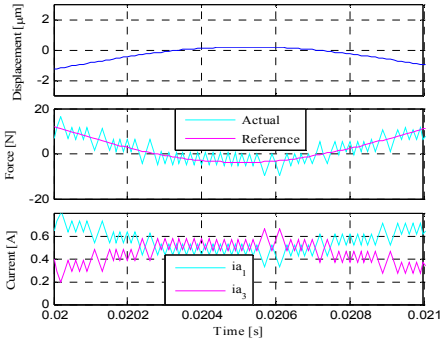
(a) Simulation results in α-axis direction



(b) Local zoom in figure
그림 5 α축 방향의 전류와 변위, 축방향 힘의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 simulation results in α-axis direction



(a) Simulation results in β-axis direction



(b) Local zoom in figure
그림 6 β축 방향의 전류와 변위, 축방향 힘의 시뮬레이션 결과
Fig. 6 simulation results in β-axis direction

그림 5는 제안된 제어기법을 BLSRM에 적용한 경우 α으로 작용하는 힘에 대한 실험결과를 나타내고 있으며, 그림 6은 β 방향으로 작용하는 힘에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 실험결과에서 제안된 기법을 적용하여 회전자의 위치변위 발생시 제어를 통하여 공극의 크기를 일정하게 제어 할 수 있음을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 BLSRM의 새로운 구조를 바탕으로 축방향 힘에 대한 수학적 모델을 분석하였고 안정된 부상력을 얻기 위해 새로운 직접 순시 축방향 힘 제어(DIRFC)을 제안하였다. 제안한 새로운 BLSRM과 DIRFC의 효용성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 2007년 Brain Busan 21사업 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] M. Takemoto, A. Chiba and T. Fukao, "A Method of Determining the Advanced Angle of Square-Wave Currents in a Bearingless Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on IA., Vol. 37, November/December 2001, pp. 1702-1709.

[2] Li Chen, Wilfried Hofmann, "Analytically Computing Winding Currents to Generate Torque and Levitation Force of a New Bearingless Switched Reluctance Motor", in Proc. 12th, Aug, 2006, pp. 1058-1063.

[3] Carlos R. Morrison. Bearingless Switched Reluctance Motor. U.S. Patent 6, 727, 618, 2004.

[4] Shuang Ye. Research on Bearingless Switched Reluctance Motors, Master's thesis, 2003.

[5] Qiurong Wang. Analysis And Design of Bearingless Switched Reluctance Motor. Master's thesis, 2007.