

## 베어링리스 SRM의 축방향 지지력 제어 시스템 설계

박태흠, Huijun Wang, 이동희, 안진우  
 경성대학교 전기전자메카트로닉스 공학부

### Design of Radial Force Control System for BLSRM

Tae-Hub Park, Huijun Wang, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn  
 Dept. of Electrical and Mechatronics, Kyungsoong University, Busan, Korea

**Abstract** - In this paper, a novel structure Bearingless SRM with hybrid stator poles is proposed. The motor torque can be controlled independently from radial force control. Analytical models of torque and radial force for proposed structure are explained. Based on these models, control scheme of desired radial force is proposed. In this control method, the magnitude of force can be controlled in arbitrary direction and magnitude by selecting some combinations of radial force windings. The validities of structure and control method are verified by the experimental results when motor is at standstill and running.

#### 1. 서 론

최근 고속운전이 요구되는 분야에서 고속운전시 발생하는 기존의 기계적인 베어링의 문제점을 해결하기 위해, 기계적인 베어링을 제거하고 전자기적으로 부상력을 이용하여 구동을 수행하는 기술이 연구중에 있다<sup>[1-2]</sup>. 에어 베어링이나 자기 베어링 또한 회전기에 부상력을 발생시킬수 있지만, 제어 시스템이 복잡하고 시스템 자체의 가격이 매우 높다. 또한, 에어 베어링이나 자기 베어링의 장작으로 인해 전동기의 크기가 증가한다는 단점을 가지고 있다<sup>[3]</sup>. 베어링리스 전동기는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 에어 베어링이나 자기 베어링 시스템과 달리 기계적인 베어링을 제거하고 권선에 흐르는 전류와 회전자의 자속에 따라 부상력이 발생하게 된다<sup>[1-2]</sup>.

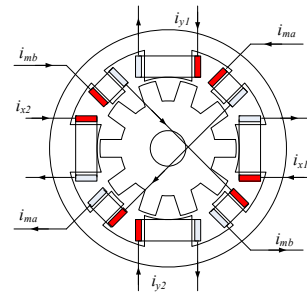
SRM(switched reluctance motor)은 고정자와 회전자의 상호작용에 의한 축방향 지지력 발생이 용이하므로 베어링리스 드라이브의 구현 가능성이 쉽다는 장점이 있다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 BLSRM(Bearingless switched reluctance motor)의 축방향 지지력 제어를 위한 제어시스템을 설계하였다. 제안된 BLSRM은 고정자 극에 토크를 발생하는 상권선과 축방향 지지력을 발생하는 권선이 별도로 분리되어 있다. 이때, 연속적인 축방향 지지력의 발생을 위해 회전자에 부상력을 발생하는 고정자 극은 수직의 대칭적인 극 구조를 가지고, 회전자를 전동기의 가운데로 위치시키기 위해 축방향 지지력 권선의 전류에 따라 x, y방향으로 제어하게 된다. 제안된 축방향 지지력 제어 시스템은 토크를 발생하는 상권선의 전류가 독립적으로 분리되어 있으며, 간단한 PID제어기와 룩-업 테이블을 사용하여 공극을 일정하게 유지하게 된다.

제안된 BLSRM과 축방향 지지력 제어시스템을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

#### 2. 제안된 BLSRM의 구조 및 특성

그림 1은 본 논문에서 제안된 BLSRM의 구조를 나타내고 있다. 제안된 BLSRM은 8/10 극의 구조로 되어 있으며, 회전자의 극호는 같지만 고정자의 극호가 다른 구조로 설계되었다. 이 중에서 x1, x2 과 y1, y2 의 넓은 고정자 극은 회전자를 부상시키기 위한 지지력을 생성하는 권선이며, ma와 mb의 고정자 극은 상권선을 나타내고 있다. 그림 1에서 나타내듯이, 부상력을 생성하는 축방향 지지력 권선과 토크를 발생하는 권선의 구조가 분리되어 있다. 따라서 제안된 BLSRM은 토크를 제어하기 위한 2상 비대칭 컨버터와 축방향 지지력을 제어하기 위한 4개의 H-브릿지 컨버터가 필요하다. 이로 인하여 기존의 BLSRM에 비해 6개의 스위칭소자의 수가 감소되는 특징을 가지게 된다.



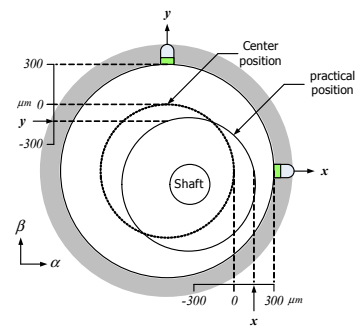
〈그림 1〉 제안된 BLSRM

제안된 BLSRM의 축방향 지지력은 각각의 대칭되는 축방향 지지력을 발생하는 권선의 전류를 통하여 제어하게 된다. 이 중에서 y1과 y2 권선의 전류는 회전자에 y축 방향의 지지력을 발생하기 위한 전류이며, x1과 x2 권선의 전류는 회전자에 x축 방향의 지지력을 발생하기 위한 전류이다. 또한, 축방향 지지력은 회전자의 위치에 관계없이 일정하게 발생하여 회전자를 제어하므로 회전자가 항상 일정한 공극을 가지도록 한다. 기존의 BLSRM의 경우, 회전자의 위치에 따라 축방향 지지력이 비선형적으로 나타나므로 일정한 축방향 지지력의 제어가 매우 어렵다. 그리고 토크를 발생하는 고정자 극은 연속적인 토크를 발생하기 위해 설계되었으며, 이러한 토크 특성은 기존의 BLSRM에 비하여 우수하게 나타나고 있다.

#### 3. 축방향 지지력 제어

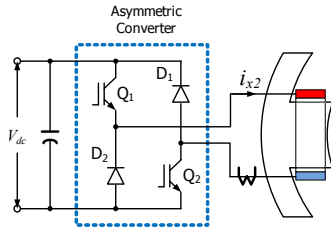
회전자가 공극을 일정하게 유지하도록 부상력을 발생시키기 위해서는, 축방향 지지력의 제어가 매우 중요하다. 회전자의 공극은 갭센서를 사용하여 각각 x축과 y축 방향의 공극을 검출하게 된다. 따라서, 갭센서로부터 회전자를 중심에 위치시키기 위한 회전자의 위치변화에 따른 검출이 가능하게 된다.

그림 2는 회전자의 편심오차에 따른 공극의 위치 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타내듯이, 변위센서의 출력은 회전자가 중심에 위치할수록 0에 가깝게 나타나게 되며, x축과 y축 방향의 변위센서에 의해 회전자의 위치가 검출되어 출력신호가 바뀌게 된다.



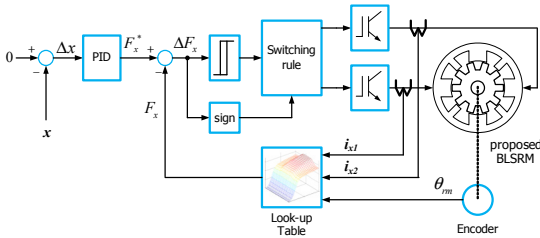
〈그림 2〉 회전자의 편심오차에 따른 공극의 위치 변화

그림 3은 제안된 BLSRM의 x2권선에서의 축방향 지지력 제어를 위한 비대칭 컨버터를 나타내고 있다.



〈그림 3〉 축방향 지지력 제어를 위한 비대칭 컨버터

그림 4는 일정한 공극을 유지시키기 위한 축방향 지지력의 제어도를 나타내고 있다. 축방향 지지력 권선의 기준 전류를 계산하기 위한 식은 다음과 같다.



〈그림 4〉 룩-업 테이블과 PID 제어기를 사용한 축방향 지지력 제어도

기준 축방향 지지력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_x^* = K_p \cdot \Delta x + K_I \cdot \int \Delta x \cdot dt + K_D \cdot \frac{d\Delta x}{dt} \quad (1)$$

$$F_y^* = K_p \cdot \Delta y + K_I \cdot \int \Delta y \cdot dt + K_D \cdot \frac{d\Delta y}{dt}$$

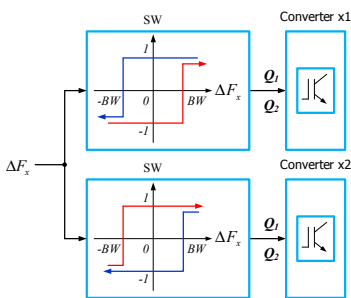
실제 축방향 지지력은 룩-업 테이블을 통하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_x = f_x(i_{x1}, \theta) + f_x(i_{x2}, \theta) \quad (2)$$

$$F_y = f_y(i_{y1}, \theta) + f_y(i_{y2}, \theta)$$

이때 비대칭 함수  $f_x$ 는 축방향 지지력의 계산을 위해 룩-업 테이블에서 얻어지게 되며, 룩-업 테이블의 데이터는 DSP의 내장메모리에 입력된다.

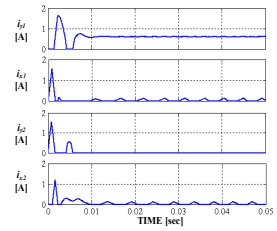
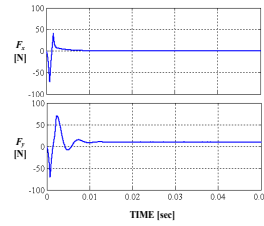
그림 5는 x축 방향 축방향 지지력 제어를 위한 컨버터의 스위칭 패턴을 나타낸다. 각각의 비대칭 컨버터는 대칭적인 위치를 이루고 있으며, 비대칭 컨버터의 스위칭 신호 역시 이와 마찬가지로 대칭적이다. 예로 x축 방향의 축방향 지지력이 생성될 때 x1 컨버터의 스위칭 상태가 '1'이라면, x2 컨버터의 스위칭 상태는 이와 대칭적으로 '-1'이 된다.



〈그림 5〉 x-방향 축방향 지지력 제어를 위한 컨버터의 스위칭 패턴

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 축방향 지지력 제어기법의 효율성을 검증하기 위해 제작된 프로토타입 BLSRM을 통해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 그림 6은 y축 방향에서 회전자의 축에 10[N]의 부하를 인가하였을 때, x축과 y축의 축방향 지지력 및 축방향 지지력 권선의 전류를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 축방향 지지력은 회전자를 가운데로 위치시키기 위해, 전동기의 속도나 토크와는 별도로 축방향 지지력 권선의 전류에 의해 제어됨을 보이고 있다.

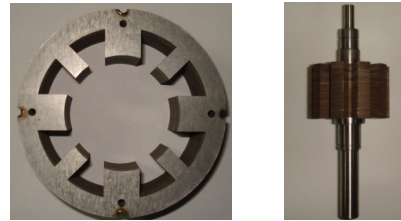


(a) 축방향 지지력

(b) 축방향 지지력 권선의 전류

〈그림 6〉 축방향 지지력과 축방향 지지력 권선의 전류

그림 7은 제작된 프로토타입 BLSRM을 나타내고 있다.

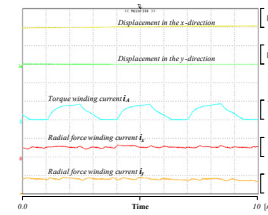
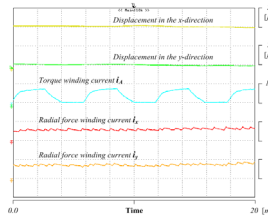


(a) 고정자

(b) 회전자

〈그림 7〉 프로토타입 BLSRM

그림 8은 1000[rpm]과 2000[rpm] 운전 상태에서의 축방향 지지력 권선 전류와 공극의 변위를 나타내고 있다. 토크 권선의 전류 파형은 기존의 2상 SRM과 같이 나타나며, 운전상태에서도 축방향 지지력 권선의 전류가 회전자의 축을 중심으로 위치시키기 위해 제어됨을 보이고 있다.



(a) 1,000[rpm]

(b) 2,000[rpm]

〈그림 8〉 운전상태에서의 축방향 지지력과 공극의 제어 특성

#### 5. 결 론

본 논문은 제안된 BLSRM의 구조를 바탕으로 축방향 지지력의 제어를 위한 제어시스템을 설계하였다. 제안된 BLSRM은 토크를 생성하는 고정자 극과 축방향 지지력을 생성하는 고정자 극이 분리되어 있으며, 각각의 권선 전류에 의해 토크와 축방향 지지력을 생성하게 된다. 따라서, 축방향 지지력은 토크 권선 전류와 별도로 공극을 제어할 수 있다.

제안된 제어기법은 PID 제어기와 룩-업 테이블을 사용한 간단한 제어를 통해 공극을 일정하게 제어할 수 있으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 효율성을 검증하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] Carlos R. Morrison. Bearingless Switched Reluctance Motor. U.S. Patent 6,727,618, 2004.
- [3] Shuang Ye. Research on Bearingless Switched Reluctance Motors, Master's thesis, 2003.
- [4] J. Faiz and J. W. Finch, "Aspects of design optimization for switched reluctance motors," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, pp. 704-713, Dec, 1993.