

LSRM을 이용한 자기부상열차 부상 및 추진제어

성호경\*, 조정민\*, 정병수\*\*, 장석명\*\*, 권정기\*\*, 김동성\*  
 \*한국기계연구원, \*\*충남대학교

Levitation and propulsion Control of Magnetic Levitated Vehicle Application  
 Using Linear Switched-Reluctance Motor

H.K SUNG\*, J.M JO\*, B.S. JEONG\*\*, S.M. JANG\*\*, J.K. KWEON\*\*, D.S. KIM\*  
 KIMM\*, CHUNGNAM UNIV.\*\*

**Abstract** - The inherent pulsating force generation makes the control of switched-reluctance motor quite complicate. So in this paper, an orthogonal scheme that can be applied to the control of LSRM will be presented. By using this scheme, the motor reluctance forces, which are magnetically decoupled and position dependent, can be projected onto sets of stationary axes that are aligned with the motor fixed secondary poles. Hence the electromagnetic forces can be controlled not only for driving the LSRM at its propulsive direction but also for alleviating the load at its normal direction. Simulation results will be provided to show the validity of the proposed scheme.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스모터는 유지보수 및 제어함에 있어서 모터가 갖는 장점으로 인하여 관련된 산업 응용분야에서 점점 더 관심 받아오고 있다[1]. 모터의 회전력은 우선 한 상의 고정자 권선이 여자 되면 근접한 회전자가 고정자와 정렬되는 방향으로 회전력을 얻게되며 이러한 여자 순서를 상별로 순차적으로 행하게 되면 회전자는 회전력을 얻게 된다. 그리고, 원하는 회전운전은 1차측 권선 전류를 적절히 스위칭 함으로써 얻어진다.

운송 및 자동화기기중에는 직선 운전을 하고 있는 것들이 있다. 이러한 기기들은 회전기기에 기어와 기계적 장치를 이용하여 모터의 회전력을 원하는 방향과 속도로 변환시켜 이용한다. 그러나 이러한 회전기기를 이용한 직선 운전방식과는 달리 선형 스위치드 릴럭턴스 모터는 모터의 가동부가 운반되어야할 물체와 일체화시켜 속도 제어에 의해 특정속도로 원하는 위치까지 직접적으로 구동될 수 있으므로, 기계적 손실을 줄이면서 제어 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다[2].

선형 스위치드 릴럭턴스 모터 시스템은 모터의 가동부가 움직이는 방향에 대하여 수직으로 작용하는 모터의 부하로 인한 마찰력 및 부상할 때 발생하는 전자기력으로 인하여 발생하는 마찰력을 경감시킬 수 있다. 비록 이러한 종류의 기계적 손실이 SRM을 이용한 응용장치에도 존재하지만, LSRM의 하드웨어 구조는 부하의 하중에 반대방향으로 발생하는 전자기력을 쉽게 조절할 수 있다. 즉, LSRM을 이용한 시스템은 시스템의 마찰력과 관계 있는 net normal force를 훨씬 감소시킬 수 있어, 자기부상열차와 같은 시스템에 아주 적합하다.[3][4]

LSRM은 주권선의 스위칭 동작에 의해 운전되는데, 이때 모터의 파라미터와 발생토크는 위치에 따라 변하기 때문에, 모터의 추진력 및 부상력을 동시에 제어하는 것이 어렵다. 또한 동기모터나 인덕션 형태의 모터와는 달리, LSRM 권선의 인덕턴스는 서로 독립적이어서 기기 변수들을 직교 축으로 적절히 투영하는 것이 어렵다[5].

본 논문에서는 LSRM을 제어하는데 있어 부상 및 추진력을 서로 독립적으로 제어할 수 있도록 기존의 제어 방식으로 이용되어온 d-q축 좌표이론을 적용하였다.

즉, 주권선에 공급되는 전류성분중에서 고정되어 있는 2차측 극성과 나란하도록 좌표변환을 하였다. 따라서 이러한 좌표변환방식을 통하여, LSRM의 추진 및 부상력을 동시에 개별적으로 제어될 수 있게됨으로 MAGLEV 또는 이와같은 특성을 요구하는 자동화 시스템에 LSRM의 적용이 적합함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 선형 스위치드 릴럭턴스 모터

2.1 LSRM의 모델링

LSRM은 추진 및 부상력을 동시에 필요로 하는 시스템에 적합한 모터이다. 이러한 시스템의 상태방정식은 식(1)과 같다.

$$V_{abc} = R_{abc}I_{abc} + \frac{d}{dt} [L(x, y)I_{abc}] \quad (1)$$

$$F_{xy} = M \frac{dv_{xy}}{dt} + B_{xy}^T v_{xy} + F_{Lxy}, \quad \text{와} \quad (2)$$

$$v_{xy} = [v_x \ v_y]^T = \left[ \frac{dx}{dt} \ \frac{dy}{dt} \right]^T \quad (3)$$

여기에서  $V_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ 와  $I_{abc} = [I_a \ I_b \ I_c]^T$ 은 주권선의 전압벡터와 전류벡터를 나타내고 있으며,  $F_{xy} = [F_{Lx} \ F_{Ly}]^T$ ,  $F_{xy} = [F_x \ F_y]^T$ 은 주권선에 의해 발생된 전자기력과 부하를 나타낸다. 그리고 시스템 파라미터  $R_{abc} = \text{diag}[r_a \ r_b \ r_c]$ 은 주권선 저항행렬,  $L(x, y) = \text{diag}[L_{op} \ L_{bp} \ L_{cp}]$ 은 주권선 인덕턴스 행렬, 그리고  $M$ 은 LSRM의 1차측에 해당하는 가동부의 질량을 나타낸다. 마찰계수  $B_{xy}$ ,  $B_{xy}$ 는 위치에 따른 모터 가동부의 수직 방향에 작용하는 Net Force에 의해 변한다. 그러나 본 논문에서는 실형을 통한 유추 없이 이러한 마찰계수를 표현할만한 적합한 형태를 유도하기 어렵기 때문에 일정한 값으로 하였다.

인덕턴스 프로파일은 푸리에 급수로의 표현할 수 있다. 이러한 식은 기기의 분석을 가능하게 하며 제어방식의 공식화를 하는데 필요하다. 위치에 따른 상인덕턴스는 식(4)와 같다.

$$L(x) = \frac{1}{\zeta} \sum_{j=1}^m [(l_{(j+1)} + l_j)(a_{(j+1)} - a_j)] + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{j=1}^m [l_{(j+1)}A_{(j,n)} - l_j B_{(j,n)}] \right\} \cos(n.N_r x) \quad (4)$$

여기에서,

$$N_r = 2\pi/\zeta$$

$$A_{(j,n)} = \frac{2}{\pi n} \sin[n.N_r \alpha_{(j+1)}] + \frac{2}{\pi n} \left\{ \frac{\cos[n.N_r \alpha_{(j+1)}] - \cos(n.N_r \alpha_j)}{n.N_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\}$$

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{\pi n} \{ \sin[n.N_r \alpha_j] \} + \frac{2}{\pi n} \left\{ \frac{\cos[n.N_r \alpha_{(j+1)}] - \cos(n.N_r \alpha_j)}{n.N_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\}$$

이고,  $x$ 는 단위를 미터(meter)로 하는 위치,  $l_j$ 는  $j$ th의 위치  $a$ 에 해당하는 인덕턴스값,  $\zeta$ 는 폴 피치,  $N_r$ 은 LSRM을 RSRM으로 간주했을 때 2차측 극수에 해당한다. 이것으로부터, 모든 인덕턴스는 차체의 상대적 위치  $x$ 에 대한 함수인 것을 알 수 있다. 그래서, 식(4)는 1차 근사화를 통하여 식 (5)처럼 표현할 수 있다.

$$L_{ap} = L_b + L_a - L_b[1 - \cos((2\pi/\zeta)x)]/2 \quad (5a)$$

$$L_{bp} = L_b + L_a - L_b[1 - \cos((2\pi/\zeta)(x - \zeta/3))]/2 \quad (5b)$$

$$L_{cp} = L_b + L_a - L_b[1 - \cos((2\pi/\zeta)(x - 2\zeta/3))]/2 \quad (5c)$$

여기에서,  $L_b$ 는 누설인덕턴스,  $L_a = \mu_0 x_1 y_1 N^2 / z_g$  이고,  $L_b$ 는 대략  $(x_3/\zeta)L_a$ 로 근사화할 수 있다.

전자기 톨력턴스 추진력  $F_{mx}$ 와 부상력  $F_{mz}$ 는 상권선이 여자되었을 때 시스템의 coenergy에 의해 발생한다. 이를 수식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$F_{mx} = (1/2)I_{abc}^T (\partial L / \partial x_{mp}) I_{abc} \quad (6a)$$

$$F_{mz} = (1/2)I_{abc}^T (\partial L / \partial z_{mp}) I_{abc} \quad (6b)$$

이상의 시스템 상태 방정식으로부터 전자기력을 발생시키는 모터의 표현식은 시간과 위치에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 그렇기 때문에 LSRM을 MAGLEV에 적용하여 안정한 부상력을 제공하기 위해서는 정밀도가 높은 위치센서와 갭센서가 필요하다.

## 2.2 모터 운전특성

MAGLEV 구동을 위한 LSRM 제어방식에는 4상한 운전이 가능하며, 기동 및 정지뿐만 아니라 역행운전도 가능하여야 한다. 이러한 가속 및 정지에 대한 LSRM에서의 발생토크는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

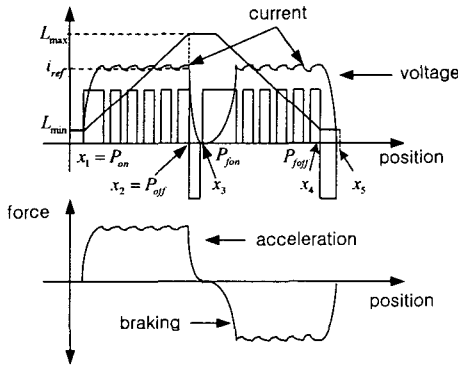


그림 1 LSRM 추진력의 특성

그림 1로부터 모터는 인덕턴스의 상승 변화가 있는 동안 양의 토크를 발생시키고, 상 인덕턴스의 감소구간에 음의 토크를 발생시킨다.

전류제어방식은 히스테리시스 전류제어방식을 택하였다. 히스테리시스 전류제어방식은 강인하고 빠른 응답을 기대할 수 있다[6].

## 2.3 컨버터의 스위칭 방식

자기부상열차의 차체 속도 가감 및 정지는 기기가 운행되고 있는 동안 전력을 반도체의 스위칭을 통하여 제어된다. 따라서 위치에 대한 이상적인 인덕턴스 변화곡선으로부터 차체의 위치는 제어를 수행하는데 있어 중요하다.

$$\begin{cases} x_1 = (w_b - w_{sp})/2 \\ x_2 = x_1 + w_b \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_3 = x_2 + (w_b - w_{sp}) \\ x_4 = x_3 + w_{sp} \\ x_5 = \zeta \end{cases} \quad (7)$$

여기에서,  $w_b$ 와  $w_{sp}$ 는 각각 고정부의 슬롯폭과 돌극 폭이고,  $w_{sp}$ 는 고정자 돌극의 폭이다.

모터에서 부상 및 추진력은 전력변환기의 스위칭펄스와 관계가 있다. 식 (8)은 본 시뮬레이션에서 적용한 LSRM의 A상에 대한 스위칭 방식이다.

$$\begin{cases} V_A = V \Rightarrow (P_{on} \leq x < P_{off}) \\ V_A = -V \Rightarrow (x \geq P_{off}) \text{ or } (x \geq P_{off}) \text{ and } (i_a > 0) \\ V_A = 0 \Rightarrow \text{another position} \\ V_A = V \Rightarrow (P_{ion} \leq x < P_{ioff}) \end{cases} \quad (8)$$

그림 2는 시뮬레이션에서 적용한 컨버터로써 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 갖는 Asymmetric bridge 컨버터로 구성되어 있다. 이러한 컨버터의 특징은 SRM컨버터중에서 제어의 다양성이 가장 뛰어나며 고전압, 대용량에 적합하다.

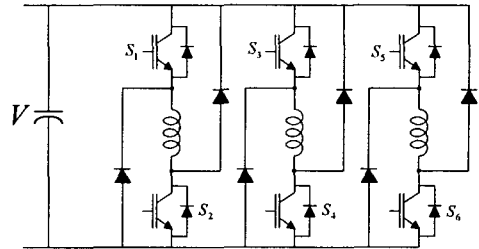


그림 2 Asymmetric bridge 컨버터

## 2.4 직교축으로 모터의 구동력 유도

회전기기에 대하여 제어를 쉽게하기위해 널리 이용되고 있는 기준좌표변환방식을 LSRM 모터제어에 도입하여, 1차측 권선에 흐르는 전류를 선형모터의 고정된 2차측 극에 일치시키도록 좌표변환을 한다면, LSRM의 부상력을 원하는 값으로 제어할 수 있다. 식 (9)는 고정자 권선의 3상 전류를 d,q와 zero 축으로 환산하는데 적합한 좌표변환 행렬식이다.

$$K_L = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(kx) & \cos(kx - \frac{2\pi}{3}) & \cos(kx + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(kx) & \sin(kx - \frac{2\pi}{3}) & \sin(kx + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

## 2.5 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션하였다. 그림 3은 1[m/s]로 운행시 나타난 컨버터의 A상 출력전압, A상 출력전류 그리고, A상 인덕턴스를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전류값과 인덕턴스값이 일치되어 스위칭 되어지는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 속도지령 1[m/s]로 운행되고 있다가, 1.5초후에 부상력을 증가시켰을 때의 각부 파형을 나타내고 있다. 그림 4a에서 3상 전류와 3상전류를 고정된 2차측 극의 이동에 동기 되어 d-q-0축으로 변형된 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 4b는 이때의 thrust force 및 normal force를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 1.5초가 지난 후 부상력에 해당하는 normal force전류를 30[A] 흘렸을 때, thrust force에 많은 리플이 발생되지만 시기의 평균값에는 변함이 없는 것을 볼 수 있다. 따라서, thrust force와 normal force가 서로 독립적으로 운영

되고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 4c는 그때의 이동속도와 이동거리를 나타내고 있다.

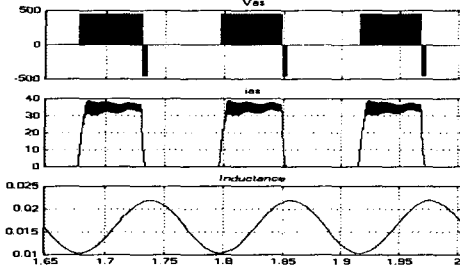


그림 3 A상전압, A상전류 및 A상 인덕턴스

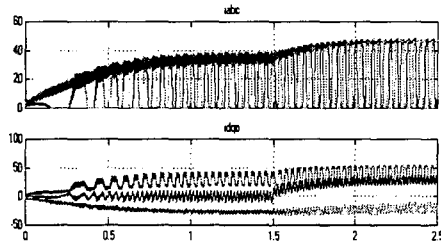


그림 4a 3상 전류 및 dq0축 전류(정방향)

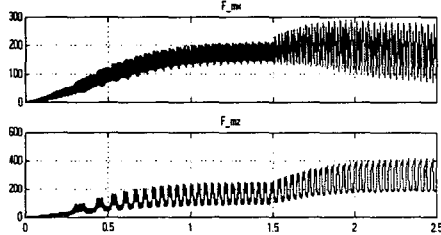


그림 4b thrust force 와 normal force(정방향)

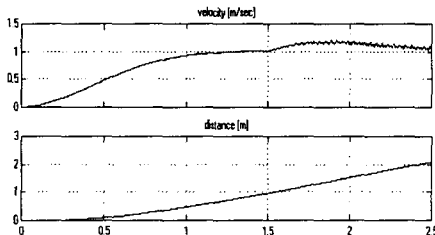


그림 4c 진행속도와 이동거리(정방향)

Maglev와 같은 곳에 적용하는 LSRM은 정역 운전이 필요하다. 그림 5는 이와 같은 특성을 알아보기 위한 것으로서, 시험조건은 정방향으로 속도지령 1[m/s]으로 운행되고 있다가, 1.5초후에 역방향으로 지령속도를 1[m/s]으로 지령하였고, 이때의 각부 파형을 나타내고 있다. 그림 5a는 정역운전하고 있을 때의 전류 파형을 나타내고 있으며, 역방향으로 변화시 d-q0축으로 변환된 q축 전류의 지령값이 반전되는 것을 볼 수 있다. 그림 5b는 이러한 경우의 thrust force 및 normal force를 나타내고 있다. 그림으로부터 1.5초가 지난 후 thrust force의 방향이 반전되는 것을 볼 수 있다. 그림 5c는 정역운전하였을 경우에 이동속도 및 이동거리를 나타내고 있다. 그림으로부터 지령속도에 응답하는 시간은 대략 1.5초정도 되는 것을 알 수 있다.

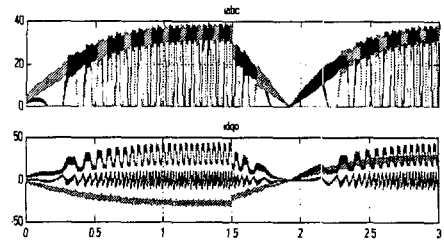


그림 5a 3상 전류 및 dq0축 전류(정역운전)

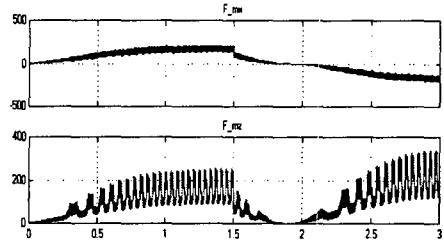


그림 5b thrust force 와 normal force(정역운전)

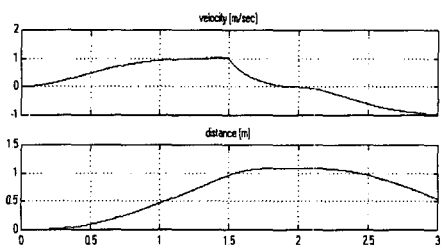


그림 5c 진행속도와 이동거리(정역운전)

### 3. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스모터를 이용한 부상 및 추진시스템에 관하여 서술하였다. LSRM 모터와 같이 비선형성이 강한 시스템은 thrust force 및 normal force를 독립적으로 제어하기가 어렵다. 이를 위해 좌표 변환방식을 도입하여 thrust force 및 normal force를 독립적으로 제어가 가능함을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motor Drives", Integrate Communications Inc, October, 1988.
- [2] B.I.Kwon, K.I.Woo, S.C.Park, "Dynamic Finite Element Analysis of A Single-sided Linear Induction Motor with Joint in the Secondary Conductor", DQ-02, InterMag 99, Kyongju, Korea, May 18-21, 1999.
- [3] C. T. Liu and N. Sheu, "Optimal Pole Arrangement Design of Magnetic Levitation and Propulsion System," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No.5, September 1996, pp.5067-5069
- [4] C. T. Liu, L.F. Chen, J.L. Kuo, Y.N. Chen, Y.J. Lee, and C.T. Leu, "Microcomputer Control Implementation of Transverse Flux Linear Switched Reluctance Machine with Rule-Based Compensator," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 11, No. 1, March 1996, pp.70-75
- [5] P.C. Krause and O.Wasynczuk, Electromechanical Motion Devices, McGraw-Hill Book Company, NewYork, U.S.A., 1989
- [6] J.L. Donmingos, D.A. Andrade, M.A.A. Freitas, "A New Drive Strategy for a Linear Switched Reluctance Motor," IEEE, pp.1714-1719, 2003