

철도차량용 선형전동기(LSRM) 위치검출 모델링

Position Detecting Modeling of Linear Switched Reluctance Motor(LSRM) for Railway Vehicles

윤 용 호*
(Yong-Ho Yoon)

Abstract - In fact, in order to obtain good performances and low torque ripple, a high-resolution sensor is needed, which is costly and usually needs a special construction for the machine. So researchers are becoming aware of their cost and are exploring the possibility of cost reduction. Information of rotor position is necessary to drive Linear Switched Reluctance Motor(LSRM). Therefore, linear optical encoder is used to detect a mover position. Normally, since the price of encoder, which is used for linear motor is relatively higher than the one used for rotary motor and the cost of additional equipment increases with the length of motor. This is not always appropriate, considering economical efficiency in case of using the linear optical encoder. As a results, LSRM has a great part for the total cost. Therefore, in this paper, we propose LSRM position detecting modeling with reflective type photo-sensor. Additionally, we have investigated the possibility of the reduced position sensor for LSRM drives with advanced control technique. To certify the overall characteristics of the proposed method, a simulation using PSIM software has been carried out and the informative results are displayed.

Key Words : Linear switched reluctance Motor, Position detecting modeling, Photo-sensor, Railway vehicles

1. 서 론

현재 국내에 리니어 모터를 이용한 철도차량의 수입이 늘어나고 있는 실정이며 리니어 모터에 관한 연구 사례는 많이 있으나 철도차량에 대한 적용 사례는 전무한 상태이다. 실제로 회전형 모터를 이용하여, 차량의 휠과 레일사이의 마찰력으로 추진력을 얻는 방법은 추진력을 얻기 위해 차체의 무게가 증가해야 하며 무게 증가는 급가속을 어렵게 하고, 열차운행의 운전시격을 증가시키는 요인이 된다.

반면에 전자기력을 이용한 리니어 모터는 기계적인 벨트나 기어, 축등이 필요하지 않아 구조가 간단하고 차량의 높이를 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 구조가 간단하여 재료비와 설치비가 절감되며, 막대한 공사비가 드는 철도시스템에 적용하고자 하는 연구사례들이 대두되고 있다. 그 실례로 리니어 모터를 이용하여 철도차량용 추진 시스템의 개발단계로 LIM(Linear Induction Motor)에 대한 제작 및 특성분석에 관한 연구내용들이 있다[1,2].

그러나 LIM의 가장 큰 단점으로 에너지 효율이 회전형모터나 LSM(Linear Synchronous Motor), LSRM(Linear Switched Reluctance Motor)보다 낮은 특성을 가지고 있다. LIM 구동장치에서는 차량부상에 의해 공극이 가변되기 때문에 10-15mm의 공

극을 이용해야 하나 회전형 유도모터의 고정자권선과 회전자사이 에 공극은 높은 효율로 운전할 수 있도록 구성되어져 있기 때문에 선형기기에 비하여 훨씬 더 작게 설계되어져 있다.

따라서 차상에 있는 LIM의 주권선은 공극에 자장을 발생시키고 리액션 레일에 유도전류를 흘릴 수 있는 전력을 제공해야 하므로 공극을 크게 하면 효율은 LSM, LSRM보다 훨씬 더 낮아지는 문제점을 가지고 있다. 또한 LIM에서는 주행품질에 영향을 줄 수 있는 3차원의 힘이 발생한다. 이것은 1차축 고정자와 리액션 레일사이에서 추진력과 흡입/반발력사이에 간섭과 이러한 두 힘에 대하여 횡방향으로 발생하는 수평력(lateral force)사이에 간섭 때문이다. 이러한 힘은 2차축에 발생하는 와전류(eddy current)때문에 차량움직임 방향으로 배치되어있는 LIM의 추진 방향과 동일하지 않다. 이러한 힘의 영향으로 인해 추진장치로서 LIM을 사용할 수 없는 것은 아니지만 가이드스(guidance)와 부상시스템의 디자인에 있어서 이러한 점을 고려해야한다. 그리고 LIM의 1차축과 2차축 사이의 공극에서 이러한 힘의 변화와 수직력에서 발생하는 고조파 그리고 고속 추진시 수직력과 수평력의 크기와 같은 문제가 고려되어야 하는 문제점을 가지고 있다[3].

따라서 본 논문에서는 철도차량용 추진 시스템에 적용하면서 위에서 언급한 LIM의 문제점을 해결하기 위해 LSRM (Linear Switched Reluctance Motor)을 이용하여 가동자의 위치검출 모델링에 대한 선행연구를 수행하였다.

LSRM은 SRM을 축방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태로 직선 운동이 필요한 곳에서 직접 추력을 발생시킬 수 있는 장점을 갖고 있으며 고정자와 가동자 어느 곳이나 권선을 설치할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징에도 불구하고 모든 선형전동기는

* Corresponding Author : Mechatronics team, Hanwha Thales Co., Ltd. Korea.

E-mail: dydghis@gmail.com

Received : September 5, 2016; Accepted : October 4, 2016

길이에 따라 위치센서의 부가장치 비용이 증가하며 구현가능 길이에 제한이 있는 문제점도 있다. 선형전동기를 제어하는 경우에는 가동자의 위치각에 대한 정보가 필수적이며 위치각 정보를 취득하기 위해서는 레졸버나 절대 엔코더 등의 위치검출기를 부착해야한다. 그러나 레졸버나 절대 엔코더 등은 이동하는 자극의 위치를 연속적으로 검출 할 수 있다는 장점이 있으나 그 가격이 고가이기 때문에 전체 시스템의 가격을 크게 상승시킨다는 단점이 있다[4, 5].

따라서 본 논문에서는 LSRM의 가동자 위치에 따라 상권선의 여자시점 결정 및 위치검출 특성을 고려하고 길이에 비례하여 가격이 상승하는 문제점 등을 고려하여 Photo sensor를 이용한 위치추정 알고리즘을 모델링하였다. 정밀 위치제어는 불가능하나 고가의 선형 엔코더를 사용하지 않으면서 모터의 길이에 관계없이 저가의 위치검출이 가능하며 전체 시스템의 부피를 줄이고 경제성을 높일 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

2. 제안한 위치검출기법

2.1 LSRM 구동원리

LSRM의 인가전압에 의한 권선의 모델링은 저항성과 전류에 의한 쇄교자속의 시간적 변화율에 의해 표현되어지며, 쇄교자속의 시간적 변화율은 인덕턴스에 의한 전압강하와 속도 기전력으로 다시 나누어진다.

그림 1은 LSRM의 구조 및 권선연결에 대한 형상으로 권선에 전류가 흐르면 가동자를 최대 인덕턴스 값을 가지는 위치가 될 때 까지 인덕턴스가 증가하는 방향으로 회전시키려는 추력이 발생되며 이와 관련 추력식 식 (1)은 식 (2)의 SRM 토크식과 동일함을 나타내고 있다. 식 (1)은 식 (2)의 θ 가 x 로 바뀐 점만 다르며 서론에서 언급한 것과 같이 LSRM은 SRM을 잘라서 펼친 형태로 구동원리가 SRM과 동일하며 추력 역시 SRM의 토크식과

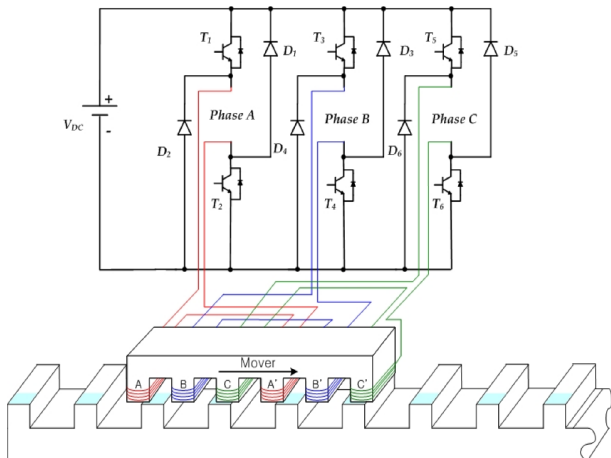


그림 1 LSRM 구조 및 권선연결
Fig. 1 Construction and winding connection of LSRM.

동일함을 알 수 있다.

$$F_{dx} = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (1)$$

$$T = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

SRM은 고정자 권선이 여자될 때 단일 자계가 발생하고 릴럭턴스 토크는 회전자가 최소 릴럭턴스 위치로 움직이도록 발생하는 원리에 의해 동작하는 전동기이다. 전류가 고정자의 상권선에 흐르면 상권선에 흐르는 전류는 자속을 발생시키고 생성된 자속에 의해 회전자는 릴럭턴스가 최소인 방향과 인덕턴스가 최대인 방향으로 움직이게 된다. 즉, 토크는 회전자 여자된 고정자의 극이 정렬하는 방향으로 발생되며 발생 토크의 방향은 고정자가 여자된 상에 대한 회전자 위치에 의해 결정되고 전류 방향과는 무관하다. 또한 연속적인 토크는 회전자 위치에 대해 고정자 각상을 순차적으로 여자하면서 발생된다.

인덕턴스파형에 의한 SRM의 동작원리는 회전자의 위치를 센서가 검출하면 해당하는 상권선에 전류가 흐르게 된다. 이때의 위치는 비정렬 위치이고 인덕턴스가 가장 작은 위치이다. 흐르는 전류에 의해 자계가 발생하고 회전자는 릴럭턴스가 최소, 인덕턴

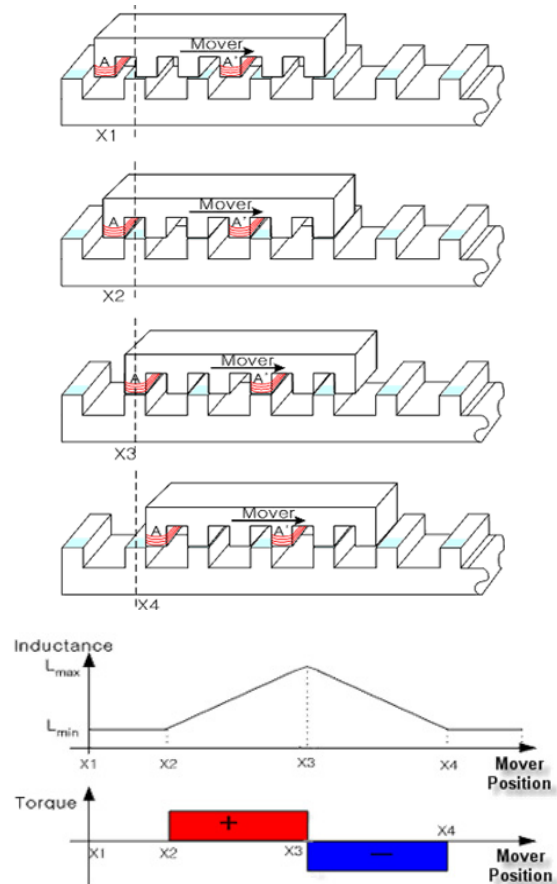


그림 2 LSRM 구동원리
Fig. 2 Driving principle of LSRM.

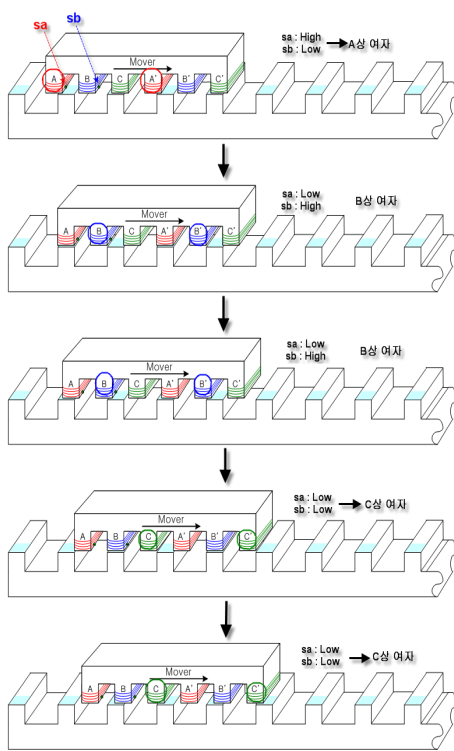


그림 3 Photo sensor를 이용한 LSRM 위치검출
 Fig. 3 LSRM position detecting method with photo-sensor

스가 최대인 위치로 이동하게 되고 고정자와 회전자가 정렬하게 되면 인덕턴스는 최대가 된다. 이러한 과정으로 인덕턴스가 증가하는 구간에 대해 순차적으로 상권선에 전류를 흐르게 하면 진행 방향에 대해 정토크가 발생하게 된다. 하지만 인덕턴스가 감소하는 구간에 대해 권선에 전류를 흐르게 하면 진행방향에 대해 부토크가 발생하게 된다. 그리고 인덕턴스가 일정한 구간에서는 토크가 발생하지 않는다. 따라서 연속적인 정토크를 발생시키려면 회전자가 각상의 정토크 영역에 왔을 때만 각 상의 권선을 여자시키면 된다[6, 7].

따라서 추력은 LSRM 상전류의 제곱 및 기울기에 비례하여 그림 2와 같이 인덕턴스 증가 구간에서 정방향 추력이 발생이 되며 반면에 인덕턴스 감소 구간에서는 역방향 추력이 발생함을 알 수 있다.

2.2 제안한 LSRM 위치검출 기법의 기본원리

반사형 Photo sensor는 발광부에서 방출된 빛이 반사체의 위치에 따라 수광부에 도달하는 경우와 그렇지 않을 경우에 따라 High 또는 Low신호를 검출하여 LSRM의 여자시점을 결정 할 수 있다. 따라서 그림 3과 같이 LSRM의 고정자 돌극부에 명암 처리를 함과 동시에 발광부와 수광부가 함께 있는 Photo-sa와 sb를 가동자 슬롯 옆면에 취부 하여 가동자 A, B, C상의 위치를 검출할 수 있다.

고정자 돌극부가 Photo sensor를 통과하는 시점에 High 신호

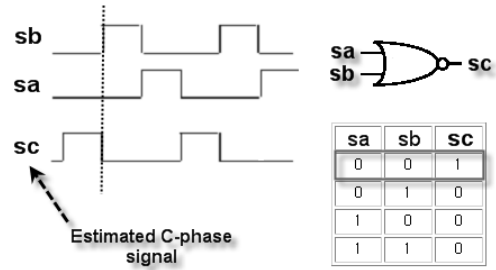


그림 4 C상 신호 추정원리
 Fig. 4 Estimation of C-Phase

를 검출하여 모터 길이에 상관없이 여자 해야 할 상을 결정할 수 있다. Photo sensor sa와 sb를 취부한 후 두 신호로부터 그림 4와 같이 NOR 회로를 통해 sc를 검출할 수 있고 sa, sb, sc가 각각 High 신호일 경우 A, B, C 상을 여자 한다면 가동자는 우측으로 이동하게 된다. 반면에 sa, sb, sc가 각각 High 신호일 경우 C, A, B 상을 여자 한다면 가동자는 좌측으로 이동하게 된다. 그러나 가동자의 초기위치가 정확히 sa와 sb의 사이에 위치했을 경우 모든 상의 신호가 Low 레벨이 되어 초기기동이 불가능 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 고려하여 초기기동이 가능할 수 있도록 NOR 회로를 사용하여 sa와 sb가 Low 신호이더라도 sc의 신호에 의해 C상이 여자되어 sa와 sb의 동시 Low 레벨 위치를 벗어날 수 있으므로 초기 기동이 가능할 수 있도록 구성하였다.

3. 사례연구

제한한 Photo-sensor를 이용한 LSRM 위치검출 알고리즘 모델링에 대한 타당성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 PSIM 소프트웨어를 이용하였다. 2.1절 LSRM의 구동원리에서 언급했듯이 LSRM은 SRM을 잘라서 펠친 형태로 구동원리가 SRM과 동일하며 추력 역시 SRM의 토크식과 동일하여 소프트웨어에서 제공하는 3상 6/4 pole SRM 블록을 이용하여 LSRM Subcircuit Block을 모델링 하였다.

그림 5는 제안된 LSRM 위치검출 알고리즘 모델링 블록도로 LSRM, 비대칭 브릿지 컨버터, 이동거리 및 속도검출 블록 그리고 본 논문에서 제안한 Photo sensor를 이용한 알고리즘 등으로 구성되어있다. 이동거리 및 속도검출 블록은 카운터 회로를 이용하여 Photo-sensor 신호가 입력되면 가동자 극피치가 16[mm]씩 증가하도록 설계하였다. 또한 이동거리 측정 및 측정된 이동 거리를 시간으로 나누어 속도를 측정할 수 있도록 구성하였다. 이때 측정된 속도는 LSRM 블록으로 입력되어 블록 내부에서 속도를 적분하여 이동거리 계산 및 16[mm]마다 리셋 하여 Photo sensor 신호를 발생하도록 모델링하였다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 Photo-sensor를 이용한 LSRM 위치검출 모델링에 대한 결과 파형으로 상전류(A, B, C), 추력, 가동자 위치에 따른 Photo-sensor 신호, 이동거리, 속도파형을 보여주고 있다. 가동자 극피치가 16[mm]씩 이동하도록 설계한

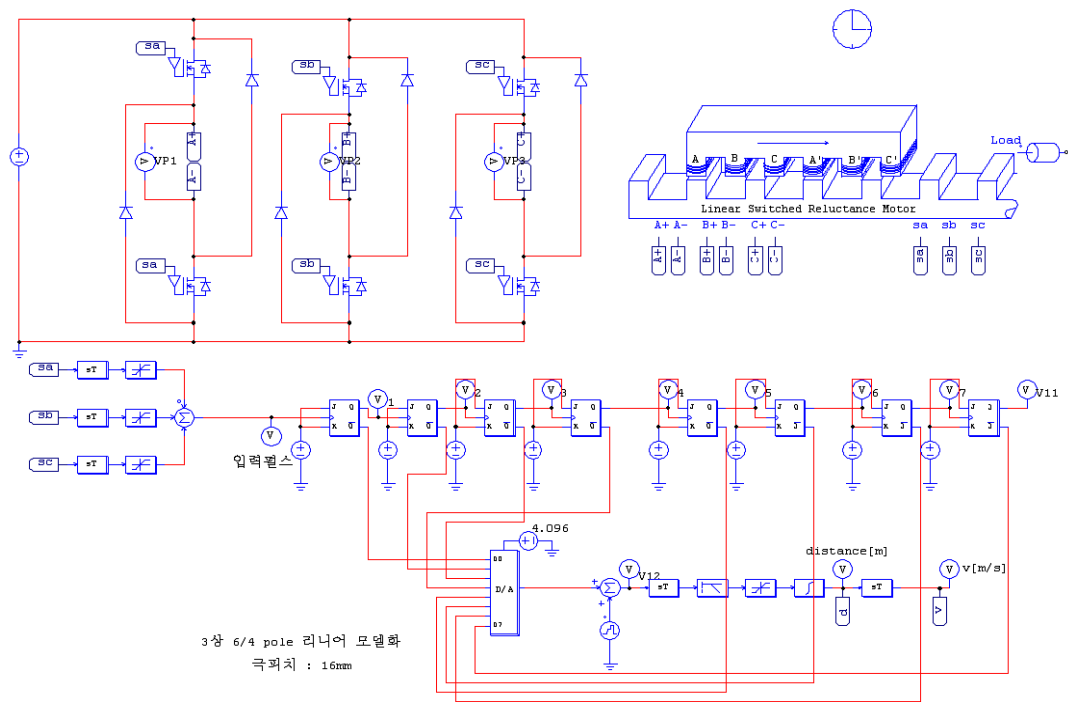


그림 5 제안한 LSRM 위치검출 모델링
 Fig. 5 Proposed position detecting modeling of LSRM.

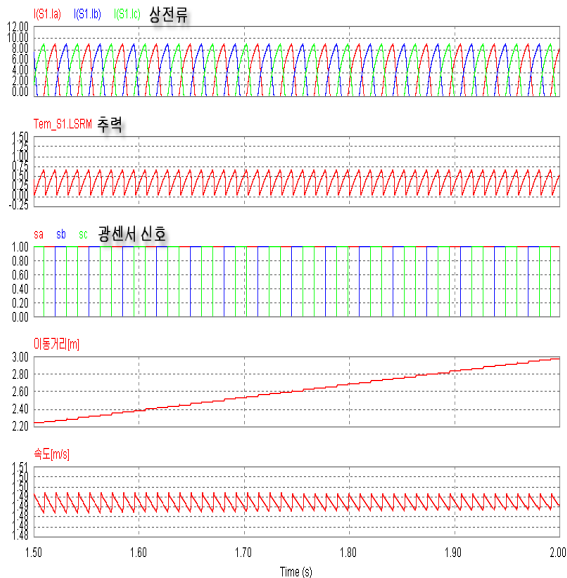


그림 6 위치검출 알고리즘 모델링 결과파형
 Fig. 6 The resulting waveform of position detecting modeling.

내용과 동일하게 Photo-sensor 신호가 입력될 때마다 이동거리가 16[mm]씩 증가하는 것을 확인할 수 있다.

국내외적으로 LSRM의 자계 분포 특성 해석, 회로정수 도출, 정특성 및 구동 특성 해석을 정밀하게 하기 위하여 전기기기의

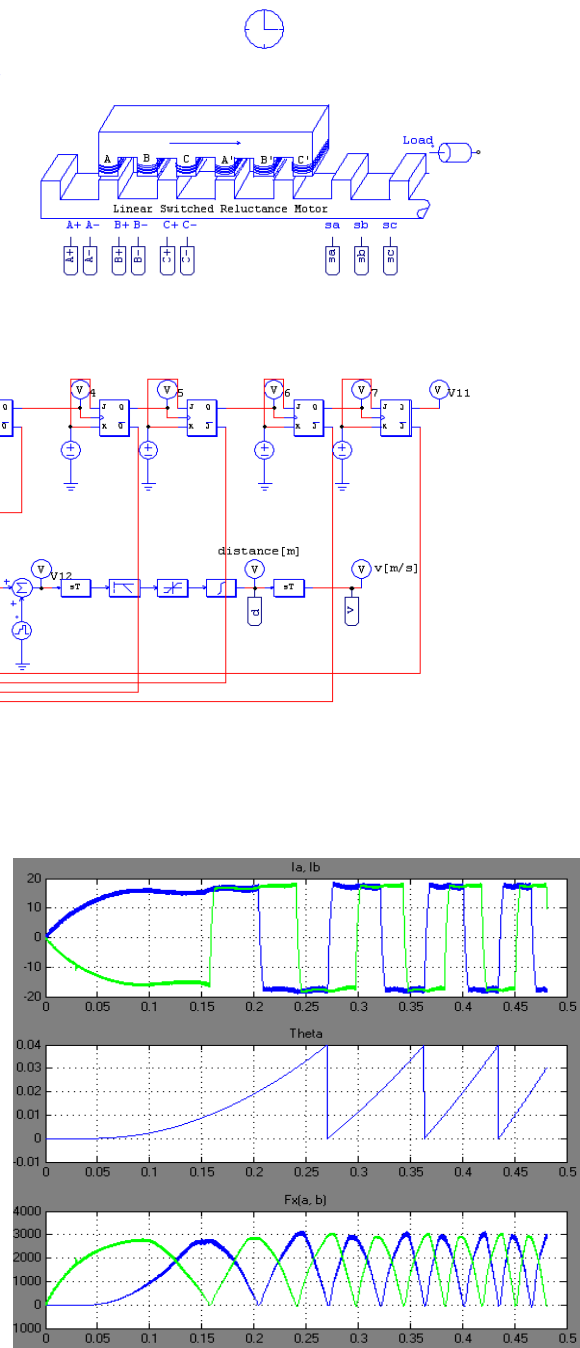


그림 7 A, B 상전류, A상 Theta 값, A, B상 추력
 Fig. 7 A, B phase current, A phase theta value and A, B phase force

특성 해석에서 유한요소법 등의 수치해석 상용 프로그램이 일반적으로 이용되고 있다[8, 9]. 그림 7과 8은 실제 4상 LSRM에 대한 유한요소 해석에 의해 얻어진 law data의 lookup table을 이용하여 MATLAB 소프트웨어를 통해 얻어진 결과파형들로 그림 7에서 상전류(A, B), A상의 Theta 값과 A, B상에 대한 추력,

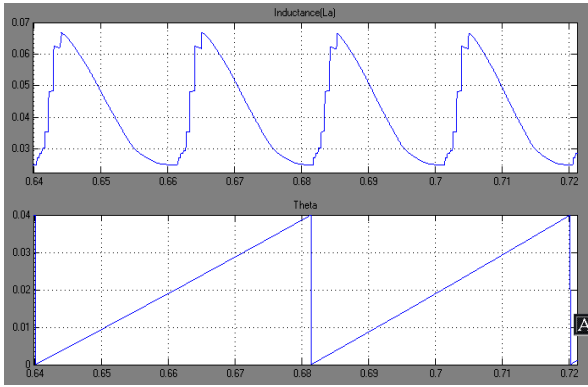


그림 8 A상 인덕턴스 프로파일 및 가동자 Theta 값
 Fig. 8 A phase inductance profile and theta value of mover

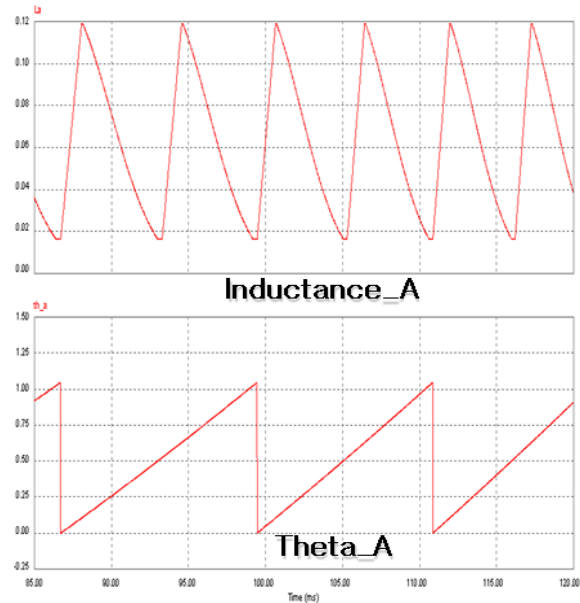


그림 10 A상 인덕턴스 프로파일 및 가동자 Theta 값
 Fig. 10 A phase inductance profile and theta value of mover

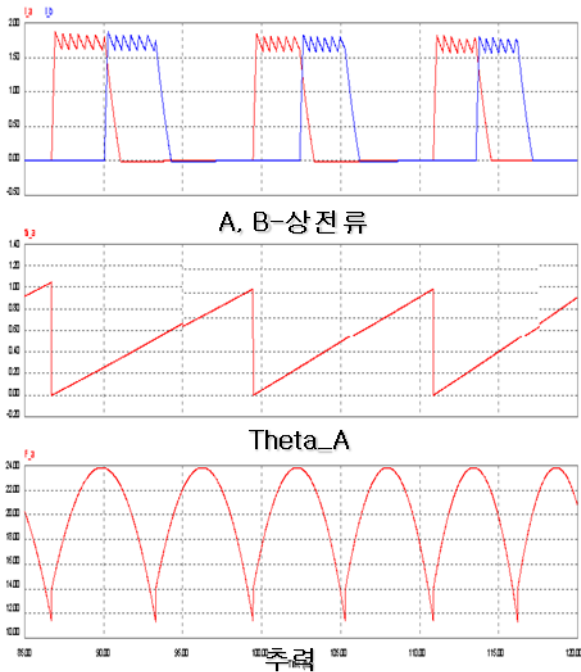


그림 9 A, B 상전류, A 상 Theta 값, 추력
 Fig. 9 A, B phase current, A phase theta value and force

그림 8에서는 A상 인덕턴스 프로파일에 따른 가동자 Theta 값의 결과들을 각각 보여주고 있다.

특히 그림 7과 8은 유한요소법을 이용하여 회로정수 도출 및 설계 사양을 결정하고 속도 및 위치 프로파일과 제어 알고리즘인 추력 분배 함수를 적용하여 지령조건을 추종하는 동특성에 대해 LSRM관련 수행과제를 통해 얻어진 시뮬레이션 결과이다.

따라서 본 논문에서는 그림 6의 시뮬레이션 결과 외에 Photo-sensor를 이용한 LSRM 위치검출 모델링에 대한 알고리즘 검증에 위해 과거 유한요소 해석에 의해 얻어진 데이터를 이용 및 MATLAB 소프트웨어를 통해 얻어진 그림 7, 8의 결과들과 비교하였다.

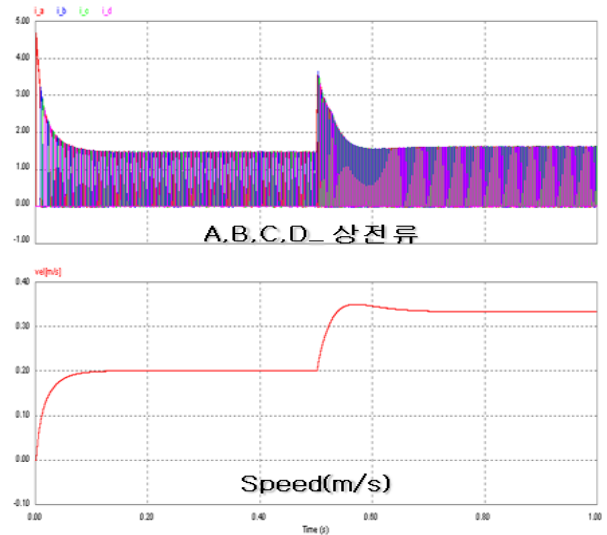


그림 11 상전류(A, B, C, D상) 및 속도
 Fig. 11 Phase current and speed.

그림 9, 10, 11의 결과들은 본 논문에서 제안 및 적용한 PSIM 소프트웨어를 이용하여 얻어진 파형으로 MATLAB 소프트웨어에서 적용한 동일조건으로 수행하였다. 그림 9는 그림 7에서 나타난 파형과 동일하게 상전류(A, B), A상의 Theta 값과 추력에 대한 결과파형을 나타내고 있으며 그림 8에서 A상 인덕턴스 프로파일에 따른 가동자 Theta 값의 결과와 동일한 파형을 그림 10에서 보여주고 있다. 결과적으로 유한요소 해석에 의해 얻어진 시뮬레이션 결과와 비교하여 본 논문에서 제안한 모델링 결과가 동일함을 알 수 있다.

특히 인덕턴스 프로파일에 따른 가동자의 Theta 값 비교에 의해 가동자 위치에 따른 정확한 정보를 검출함으로써 스위칭 정보 및 LSRM의 전류 및 속도제어가 가능함을 알 수 있다. 따라서 그림 11은 검출된 가동자 위치정보에 의해 실행된 속도가변에 따른 속도응답과 각상에 흐르는 상전류파형의 결과로 기준속도를 잘 추종함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

LSRM은 SRM과 마찬가지로 가동자의 정확한 위치 정보가 필수적이므로 위치검출용 엔코더가 필요하다. 그러나 일반적으로 선형전동기에 사용되는 엔코더의 가격은 회전형에 비해 고가이며 전동기 길이에 따라 부가장치 비용이 증가되는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 장거리 이송 시 길이에 비례하여 가격이 상승하는 광학식 리니어 엔코더보다 Photo-sensor를 이용한 위치추정 알고리즘 모델링을 제안하였다. 또한 제한한 위치검출 모델링에 대한 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통해 LSRM에 적용 가능함을 확인하였다.

이러한 결과로 철도차량용 추진 시스템에 적용함과 동시에 모터의 길이에 관계없이 저가의 위치검출이 가능하며 전체 시스템의 부피를 줄이고 경제성을 높일 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] C.B. Park, H.S. Mok J. Lee, "A Study on Deduction of Equivalent Circuit Parameters and Verification of Control Algorithm of Thrust Force of a Small-scaled LIM for a Railway Transit," Trans. KIEE. vol. 59, no. 7, pp. 1248-1254, 2010.

[2] W.J. Yang, C.B. Park, H.W. Lee, B.S. Lee, C.Y. Won, "A Study on Characteristics of the Linear Propulsion Motor for Railway Vehicles," Proceedings of KIPE, pp. 539-541, 2009.

[3] H. K. Bae, B. S. Lee, P. Vijayraghavan, R. Krishnan, "A Linear Switched Reluctance Motor : Converter and Control," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 5, pp. 1351-1359, 2004.

[4] Wai-Chuen Gan, Cheung, N.C., Li Qiu, "Position control of linear switched reluctance motors for high-precision applications," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, 2003.

[5] J. H. Park, K. J. Ko, J. Y. Choi, S. M. Jang, "Analysis on Dynamic Characteristic and Circuit Parameter of Linear Switched Reluctance Motor by Electromagnetic Analytical Method," Trans. KIEE. vol. 59, no. 2, pp. 318-327, 2010.

[6] N. S. Lobo, H. S. Lim, R. Krishnan, "Comparison of linear switched reluctance machines for vertical

propulsion application: analysis, design, and experimental correlation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 4, pp. 1134-1142, 2008.

[7] S. M. Jang, J. H. Park, J. Y. Choi, H. W. Cho, "Analytical prediction and measurements for inductance profile of linear switched reluctance motor," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 3428-3430, 2006.

[8] D. H. Kang, Y. H. Jeong, M. H. Kim, "A study on the design of transverse flux linear motor with high power density," Proceedings of ISIE, vol. 2, pp. 12-16, 2001.

[9] H.S. Lim, Raum Krishnan, "Ropeless elevator with linear switched reluctance motor drive actuation systems," IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 54, no. 4, pp. 2209-2218, 2007.

저 자 소 개



윤 용 호 (Yong-Ho Yoon)

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 졸업(공학박). 2007년~2011년 삼성탈레스 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원. 2011년~2015년 한국산업기술시험원 신재생사업센터 책임연구원. 2015년~현재 한화탈레스 종합연구소 메카트로닉스팀 전문연구원.

Tel : 031-8020-7577

Fax : 031-8020-7777

E-mail : dydghis@gmail.com