

## 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 동특성 시뮬레이션

장석명<sup>\*</sup>, 박지훈<sup>\*</sup>, 유대준<sup>\*</sup>, 이성호<sup>\*\*</sup>, 성호경<sup>\*\*\*</sup>, 조한욱<sup>\*\*\*</sup>  
충남대학교 전기공학과<sup>\*</sup>, 한국생산기술연구원<sup>\*\*</sup>, 한국기계연구원<sup>\*\*\*</sup>

## Dynamic Simulation of Linear Switched Reluctance Motor

Seok-Myeong Jang<sup>\*</sup>, Ji-Hoon Park<sup>\*</sup>, Dae-Joon You<sup>\*</sup>, Sung-Ho Lee<sup>\*\*</sup>, Ho-Kyoung Sung<sup>\*\*\*</sup>, Han-Wook Cho<sup>\*\*\*</sup>  
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University<sup>\*</sup>, KITECH<sup>\*\*</sup>, KIMM<sup>\*\*\*</sup>

**Abstract** - This paper deals with dynamic characteristics of LSRM. Position choose mover of LSRM and inductance. When approved current in each phase by decided position, we made sure current and voltage according to turn-on, turn-off. In dynamic simulation of LSRM, through an experiment, we decided turn-on position of inductance profile. Also, we presented dynamic characteristic analysis model which is consisted at motor and sensor signal part, etc., and substitute circuit constant that get using magnetic equivalent circuit method, we confirmed current and voltage waveform.

## 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor: SRM)는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용, 권선은 간단한 집중권으로 고정자에만 감겨있고, 회전자에는 권선, 도체 바, 영구자석이 없는 기계적으로 간단한 구조로 되어있다. 그러므로 다른 전동기 보다 전동기 자체의 제조단자가 저렴하고 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높아 유지비가 거의 들지 않는 많은 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 속도 제어 범위를 가지고 있으며, 초고속 운전이 용이하고, 단위체적 당 토크 및 효율 면에서도 기존 전동기보다 우수한 것으로 나타나 있으며 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조와 평스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기를 산업분야에 널리 이용하기 위해 서는 저 토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하고, SRM의 인덕턴스 프로파일은 중요한 요소로 작용한다. 인덕턴스 프로파일은 최소인 구간과 상승 구간 그리고 최대인 구간에서 전류의 텐-온 시점에 따라서 토크 리플의 발생을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 최소인 구간에서부터 상승구간 전에서 텐-온하고 최대인 구간에서 텐-오프를 통한 소호를 통해 전류를 회생하는 방법이 사용된다.[1][2]

본 논문에서는 텐-온 위치를 변경하여 인덕턴스 프로파일의 위치에 따른 전류, 전압에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 동특성 해석을 통해 앞으로의 설계에 대한 예측과 변수들의 변화에 따른 시작기의 특성을 파악하고자 한다. 동특성 해석은 MATLAB Simulink를 사용하였다.

## 2. 해석모델과 동특성 모델링

## 2.1 LSRM 해석모델

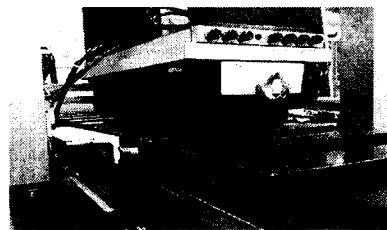


그림 1. 제작된 LSRM

그림 1은 유한 요소해석으로 설계/제작된 LSRM을 보여주고 있다. 제작된 LSRM의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1. 제작된 LSRM 설계 사양

항 목	사 양	
가동 자	치 폭	25 (mm)
	치 높이	50 (mm)
	극 간격	50 (mm)
	요크 높이	20 (mm)
	가동자 깊이	100 (mm)
	전체 길이	275 (mm)
고정 자	치 폭	32 (mm)
	치 높이	25 (mm)
	극 간격	75 (mm)
	백아이언 높이	10 (mm)
	고정자 깊이	205 (mm)
	전체 길이	4000 (mm)

## 2.2 동특성 모델링

인가전압에 의한 권선의 모델링은 식(1)의 저항성분과 전류에 의한 쇄교자속의 시간적 변화율에 의해 표현되어지며, 쇄교자속의 시간적 변화율은 인덕턴스에 의한 전압강하와 속도 기전력으로 다시 나누어진다.

$$V_s = Ri_s + \frac{d\lambda_s}{dt} = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + \omega_m \frac{dL}{d\theta} i_s \quad (1)$$

따라서 인가전압  $V_{DC}$ 에 대해 PWM 전압 과형을 고려한 전압 방정식은 식(2)와 같이 표현되어진다.

$$V_{DC} = (R + \frac{dL}{d\theta} \omega_m) i_s + L \frac{di_s}{dt} (\text{turn on}) \quad (2.1)$$

$$- V_{DC} = (R + \frac{dL}{d\theta} \omega_m) i_s + L \frac{di_s}{dt} \text{ (turn off)} \quad (2.2)$$

인덕턴스  $L$ 의 경우 하나의 전류에 대한 인덕턴스 프로파일은  $\theta$ 에 따른 변동만을 갖는다.

$$VI = Ri^2 + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3)$$

여기서  $i \frac{dL}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt}$  이고,  $Ri^2$ 는 전기적 에너지,  $W_m$ 은 기체적 에너지,  $W_f$ 는 자기적 에너지로 정의할 수 있으며,  $\frac{dW_m}{dt} = T_e w = T_e \frac{d\theta}{dt}$  이므로, 식(3)을 이용하여 식(4)가 얻어진다.

$$T_e(\theta, \lambda) = i \frac{d\lambda}{d\theta} - \frac{dW_f(\theta, \lambda)}{d\theta} \quad (4)$$

자기수반 에너지의 도입으로 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} W_c + W_f &= i\lambda \\ dW_c + dW_f &= \lambda di + id\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)을 식(4)에 대입하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$T_e(\theta, i) = \frac{id\lambda - (\lambda di + id\lambda - dW_c(\theta, i))}{d\theta} \quad (6)$$

여기서  $dW_c(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di$ 를 식(6)에 대입하면, 자기수반 에너지에 의해 식(7)과 같이 간단히 표현된다.

$$T_e(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta}, i \text{ constant} \quad (7)$$

또한  $\lambda = L(\theta)i$ 에 대하여,  $W_c = \int_0^i L(\theta)idi$ 가 성립하므로 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (8)$$

전기적인 토크는 식(9)와 같다.

$$T_e = \frac{dW_c}{d\theta} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (9)$$

따라서 SRM의 torque는 전류와 인덕턴스 프로파일에 의해서 얻어진다.

SRM의 전기적 입출력 전압방정식은 식(10)과 같다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta} wi \quad (10)$$

여기서  $\lambda = L(\theta)i_s$ ,  $\theta = wt$ 이다.

그림 2의 경우  $\theta_{cc}$ 부터 일정한 평활 전류가 흐른다고 가정하면 이때 전류는 식(10)의 전압 방정식으로부터  $di/dt$ 가 0이 되므로 식(11)과 같다.

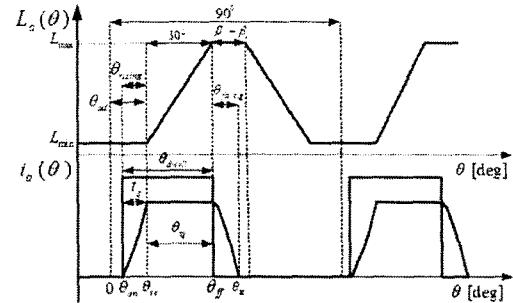


그림 2. Turn on 과 Turn off

$$i = \frac{V}{R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot w} \quad (\theta_{cc} < \theta < \theta_{off}) \quad (11)$$

전류를 확립하는 구간에 있어서, 인덕턴스 변화분이 0이므로 전압방정식은 식(12)와 같다.

$$V = Ri + L_{min} \frac{di}{dt} \quad (0 < \theta < \theta_{cc}) \quad (12)$$

여기서  $L_{min}$ 은 최소 인덕턴스,  $R$ 은 상저항,  $w$ 는 각속도,  $\theta$ 는 회전자 위치를 나타낸다.

식(12)에 대한 미분방정식을 풀면 식(13)과 같다.

$$i(t_s) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_s}{\tau}}\right) \quad (13)$$

여기서 시정수  $\tau = \frac{L_{min}}{R}$ ,  $t_s$ 는  $\theta_{on}$ 에서  $\theta_\alpha$ 까지 진행되는데 걸리는 시간이다.

따라서 식(11)과 식(13)에 대해서 식(14)가 성립한다.

$$\frac{V}{R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} w} = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_s}{\tau}}\right) \quad (14)$$

$$t_s = -\tau \ln \left(1 - \frac{R}{R + \frac{dL}{d\theta} w}\right) \quad (15)$$

전류가 인가되는 시간인  $\theta_{rising}$ 에 대하여 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{rising} &= w \times t_s \times \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \\ &= -w \frac{L_{min}}{R} \ln \left(1 - \frac{R}{R + \frac{dL}{d\theta} w}\right) \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \end{aligned} \quad (16)$$

그러므로  $\theta_{on} = \theta_\alpha - \theta_{rising}$ 에 대입하면 식(17)을 얻을 수 있다.

$$\theta_{on} = \theta_\alpha + w \frac{L_{min}}{R} \ln \left(1 - \frac{R}{R + \frac{dL}{d\theta} w}\right) \times \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \quad (17)$$

또한 전류가 떨어지는 구간에 있어서, 전류를 0으로 소

호 시기는 구간이 최대 인덕턴스 구간이므로 최소 인데  
턴스와 마찬가지로  $\frac{dL}{d\theta}$  이 0이 되고, 이때 권선에 인가되  
는 전압은 양쪽 스위치를 오프하면 역 전압이 인가되므  
로 전압방정식은 식(18)과 같다.

$$-V = Ri + L_{\max} \frac{di}{dt} \quad (18)$$

$$i(t) = -\frac{V}{R} + Ce^{-\frac{R}{L_{\max}}t} \quad (19)$$

$t=0$ 일 때 전류가 소호된다고 가정하면, 적분상수 C는  
식(20)과 같이 얻어진다.

$$C = \frac{V}{R + \frac{dL}{d\theta}w} + \frac{V}{R} \quad (20)$$

따라서 적분 상수 C를 식(19)에 대입하면 전류가 0이 되  
는 시간( $t_{zc}$ )일 때 식(22)가 얻어진다.

$$-\frac{V}{R} + \left( \frac{V}{R + \frac{dL}{d\theta}w} + \frac{V}{R} \right) e^{-\frac{R}{L_{\max}}t_{zc}} = 0 \quad (21)$$

$$t_{zc} = -\frac{L_{\max}}{R} \ln \left( \frac{R + \frac{dL}{d\theta}w}{2R + \frac{dL}{d\theta}w} \right) \quad (22)$$

### 3. 동특성 해석 결과

LSRM에 대한 인덕턴스에 따른 모델링과 전개한 수식  
을 이용하여 동특성 모델링을 수행하였다. 동특성 해석  
은 MATLAB SIMULINK를 이용하였으며, 해석과 실험  
을 통하여 얻어진 결과인 회로 정수를 동특성 해석에 내  
입하였다.

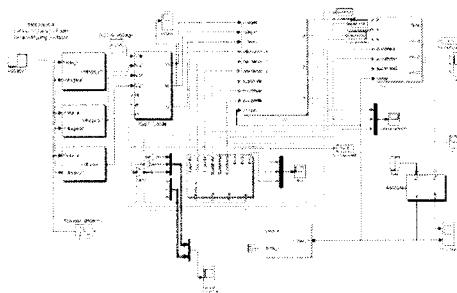


그림 3. 동특성 해석 모델

그림 3은 동특성 해석의 전체 모델을 보여주고 있다. 그  
림의 모델은 그림 4, 5에서 보여주고 있는 LSRM part와  
토크와 역기전력을 해석하는 부분 등으로 이루어져 있으  
며, 전압 지령에 의하여 전원을 공급하고 수학적으로 해  
석된 인덕턴스와 실측 무게 등을 이용하여 모델링 하였  
다.

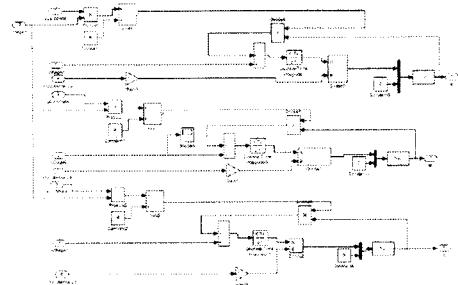


그림 4. LSRM part

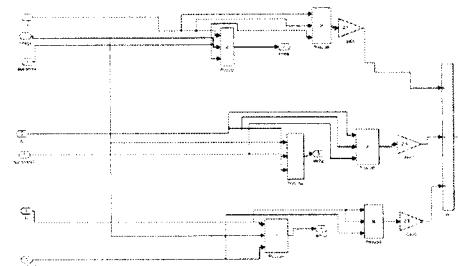


그림 5. 토크 및 역기전력 해석



그림 6. 토크, 인덕턴스 전류 해석 결과

### 3. 결 론

LSRM은 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮  
은 제작비용 등 많은 장점을 가지고 있지만 기계적인 형  
상으로부터 토크리플이 발생하는 구조를 가지고 있다.  
따라서 본 논문에서는 제작시 발생할 수 있는 LSRM의  
특성을 확인하기 위하여 동특성 해석을 수행하였다. 인  
데턴스 프로파일 상의 텐-온 시점을 조정하여 전류와 토크  
를 해석하였으며 추후에는 속도지령 등의 제어적인 요  
소를 첨가한 해석을 수행할 예정이다.

This work has been supported by KESRI and MOCIE,  
Korea.

### 【참 고 문 헌】

- [1] 장석명, 권정기, 조한욱, 박지훈, 성호경, 김봉섭, “유한 요  
소법을 이용한 직선형 스위치드 릴렉턴스 모터의 설계”,  
대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp.80-  
82, 2004.
- [2] 박희관, 박재범, 임승빈, 최재학, 안준선, 이주, “단상 SRM  
의 고속 구동 제어에 관한 연구”, 대한전기학회 EMECS학  
회 추계학술대회 논문집, pp.27-30, 2004.
- [3] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접  
토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [4] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC  
press, 2001.