

스위칭 조건에 따른 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석

장석명*, 박지훈*, 유대준*, 성호경**, 조한욱**
 충남대학교*, 한국기계연구원**

Characteristic analysis of linear switched reluctance motor according to switching condition

Seok-Myeong Jang*, Ji-Hoon Park*, Dae-Joon You*, Ho-Kyung Sung**, Han-Wook Cho**
 Chungnam National University*, KIMM**

Abstract - This paper deals with characteristic analysis of Linear Switched Reluctance Motor (LSRM) according to switching condition. 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

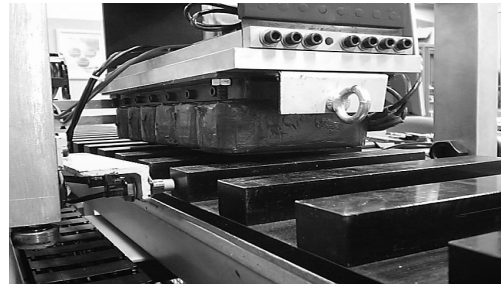
스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용, 권선은 간단한 집중권으로 고정자에만 감겨있고, 회전자에는 권선, 도체 바, 영구자석이 없는 기계적으로 간단한 구조로 되어있다. 그러므로 다른 전동기 보다 전동기 자체의 제조단가가 저렴하고 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높아 유지비가 거의 들지 않는 많은 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 속도 제어 범위를 가지고 있으며, 초고속 운전이 용이하고, 단위체적 당 토크 및 효율 면에서도 기존 전동기보다 우수한 것으로 나타나 있으며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

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기를 축 방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태의 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 일반적인 구동 방식에 대하여 스위칭 조건에 따른 동특성 해석을 수행하고자 한다. 해석적인 방법과 유한요소법으로 해석된 인덕턴스 프로파일에 대하여 최저인 구간에서 턴-온을 실시하였으며, 이때 스위칭 조건을 달리하여 동일 인덕턴스 프로파일과, DC 전압 등에 따른 상전류의 변화에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 동특성 해석을 통해 앞으로의 실험에 대한 예측과 변수들의 변화에 따른 의 특성을 파악하고자 한다. 동특성 해석은 MATLAB Simulink를 사용하였다.

2. 해석모델과 동특성 모델링

2.1 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 해석모델과 구동 방식

리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동을 위해서는 정확한 인덕턴스 프로파일의 해석이 선행되어야 하며, 본 저자들은 해석적인 방법의 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일을 해석하였으며,[3] 해석된 결과는 유한요소법과 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 따라서 해석된 인덕턴스 프로파일로부터 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동 특성을 파악하기 위하여 일반적인 구동 방식을 사용하였다. 즉, 최저인 구간에서 턴-온하고 최대인 구간에서 턴-오프하는 방식으로, 이때 전압의 인가를 위한 스위칭 조건을 달리하였으며, PWM의 주파수를 다르게 함을 의미한다. 그림 1은 최대 추력을 기준으로 설계/제작된 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기를 보여주고 있다. 일반적으로 6/4극의 스위치드 릴럭턴스 전동기를 직선형 형태로 변경하였을 때

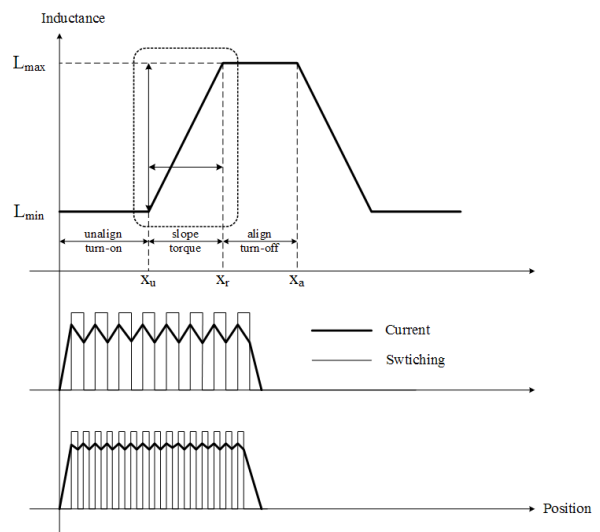


〈그림 1〉 제작된 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기

〈표 1〉 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계 사양

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

고정자는 6극, 가동자는 4극으로 설계/제작되어 진다. 그러나 본 논문에서는 제작 비용의 절감과 제작의 이점을 위하여 고정자를 4극, 가동자를 6극으로 설계/제작하였으며, 가동자인 6극에 권선을 시행하였다. 제작된 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 사양은 표 1과 같다.



〈그림 2〉 스위칭 조건에 따른 상전류 예측

그림 2는 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일에 대한 턴-온과 턴-오프의 위치 및 스위칭 조건을 보여주고 있다. 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기는 인덕턴스 프로파일의 상승 구간에서 추력이 발생하며, 입력되는 전압의 크기 및 스위칭에 따라서 상전류의 파형이 달라짐을 예측할 수 있다. 이로부터 추력에 대한 리플을 감안할 수 있는지를 확인할 수 있으며, 실제 구동 회로를 제작함에 있어서 도움이 될 것으로 사료된다.

2.2 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 동특성 모델링

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

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

따라서 인가전압 V_{DC} 에 대해 PWM 전압 파형을 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 θ 에 따른 변동만을 갖는다.

$$VI = R i^2 + i \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (3)$$

여기서 $R i^2$ 는 전기적 에너지이고, $i \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$ 는 $(dW_m/dt) + (dW_f/dt)$ 로 다시 쓸 수 있다. 이때 W_m 은 기계적 에너지, W_f 은 자기적 에너지로 정의할 수 있으며, $dW_m/dt = T_e \omega = T_e d\theta/dt$ 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.

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

식(5)을 식(4)에 대입하면 식(6)을 얻을 수 있다.

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

여기서 $dW_c(\theta, i) = (dW_c/\partial\theta)d\theta + (dW_c/\partial i)di$ 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 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크는 전류와 인덕턴스 프로파일에 의해서 얻어진다.

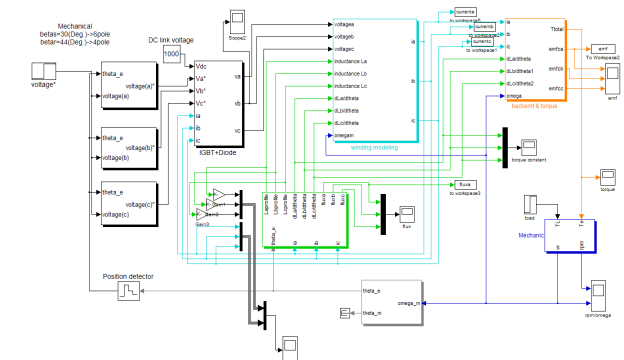
리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전기적 입출력 전압방정식은 식(10)과 같다.

$$V = R i + \frac{d\lambda}{dt} = R i + L(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega i \quad (10)$$

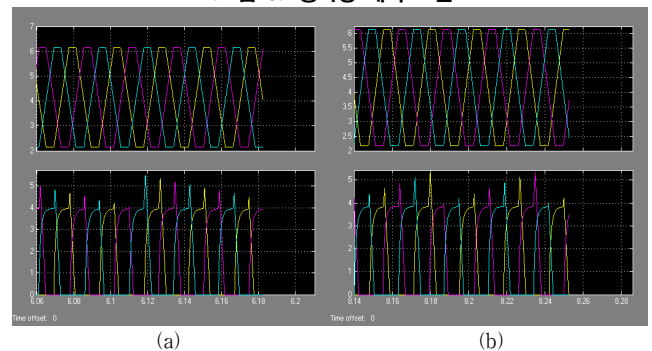
여기서 $\lambda = L(\theta)i_s$, $\theta = \omega t$ 이다.

3. 동특성 해석 결과

리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기에 대한 인덕턴스에 따른 모델링과 전개한 수식을 이용하여 동특성 모델링을 수행하였다. 동특성 해석은 MATLAB SIMULINK를 이용하였으며, 해석과 실험을 통하여 얻어진 결과인 회로 정수를 동특성 해석에 대입하였다. 그림 3은 동특성 해석의 전체 모델을 보여주고 있다. 그림 4는 스위칭 조건에 따른 인덕턴스 프로파일에 대한 상전류를 해석한 결과를 보여주고 있으며, 삼각파에 대하여 지령 전압의 크기를 달리하여 스위칭 조건을 변화시켰으며, 그림 4(a)는 25, 그림 4(b)는 30을 입력하였다. 해석된 결과로부터 상전류의 최대값이 다름을 확인할 수 있으며, 실제 구동회로 제작시 참고가 될 수 있다.



〈그림 3〉 동특성 해석 모델



(a) (b)
〈그림 4〉 스위칭 조건에 따른 상전류

3. 결 론

리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용 등 많은 장점을 가지고 있지만 기계적인 형상으로 부터 토크리플이 발생하는 구조를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 제작시 발생할 수 있는 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 확인하기 위하여 동특성 해석을 수행하였다. 인덕턴스 프로파일 상의 최저인 구간에서 턴-온하여 스위칭 조건을 조정하여 상전류를 해석하였으며 추후에는 속도리플 등의 제어적인 요소를 첨가한 해석을 수행할 예정이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 장석명, 권정기, 조한욱, 박지훈, 성호경, 김봉섭, “유한 요소법을 이용한 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회 논문집, pp.80~82, 2004.
- [2] 박희관, 박재범, 임승민, 최재학, 안준선, 이주, “단상 SRM의 고속 구동 제어에 관한 연구”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회 논문집, pp.27~30, 2004.
- [3] 장석명, 박지훈, 최장영, 성호경, “해석적 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 산정”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회 논문집, pp.138~140, 2005.