

# Matlab/M-file을 사용한 Switched Reluctance Motor의 시뮬레이션

김종철, 현동석  
한양대학교 전기공학과

## Simulation of a Switched Reluctance Motors Using Matlab/M-file

Kim Chong-Chul and Hyun Dong-Seok  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

### ABSTRACT

This paper presents a new analytical representation and simulation of the phase inductance of a Switched Reluctance Motor(SRM) using Matlab/M-file. This simulation method has many advantages: it is free from expression, can be applied widely, demonstrates inductance profile using motor parameter only, and save run time. Moreover, this simulation method can be easily realize various SRM model unlikely the existing method that limited itself to one model. And analytical expression for inductance profile is welcome as it allows for easier analysis of the motor, for it can bring insight in it working, in formulating control strategies and in achieving high accuracy in performance computations.

### 1. 서 론

완전한 모델링 시스템에서 중요한 부분을 차지하는 시뮬레이션 분석에서 얻을 수 있는 이득은 더 이상 설명할 필요가 없다. 시스템 시뮬레이션은 설계와 실험 구현의 관점에서 상당히 중요하다, SRM의 동적 시뮬레이션을 주제로 한 대부분의 연구들은 프로그램 위주로 이루어져 왔다. 심지어 EMTDC와 EMTP와 같은 회로망 시스템을 사용했다. 이런 기술들은 유용하지만 보조프로그램을 추가하기 때문에 비용이 상승하게 되어 새로운 요소를 적용함에 있어 유동성이 결여되어 있다. 그러나 Spice, Simulink, Matrix, Vissim, Mathcad와 같은 회로를 기본으로 한 언어로 소수의 SRM 시뮬레이션 연구가 이루어져 왔다. Spice 프로그램 덕분에 최초의 시뮬레이션이 만들어졌다. 그러나 이 시

뮬레이션은 Spice가 전기적 회로 시뮬레이션에만 적합하기 때문에 확실하지 않다. 따라서 최근 들어 전기기계의 환경에 고 유동성 모델링을 가능케 하는 Matlab과 같은 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션에서 괄목할 만한 성장을 이루어왔다.<sup>[1]</sup> 이런 관점에서 Matlab/M-file은 표현이 자유롭고 어떠한 형식에도 적용이 가능하다. 또한 Matlab/M-file은 C언어나 Fortran과의 결합을 지원하는 개방시스템 환경을 가지고 있고 linear, log, polar, bar chart, contour plots과 같은 다양한 그래픽 스타일을 구현할 수 있다. 또한 SRM에 있어 인덕턴스 분석 기법은 기계 해석의 용이함과 구동 및 제어기법을 구현하는데 있어 통찰력을 주며 수행을 쉽게 하는 차별적인 특성과 측정에 있어서 높은 정확성을 가져오기 때문에 널리 사용되어진다.<sup>[2][4]</sup> 그러므로 본 논문에서는 새로운 분석적 해석과 Matlab/M-file을 이용한 SRM의 상 인덕턴스의 시뮬레이션을 제안하였다. 또한 한가지 모델로 국한된 기존의 방법과는 달리 본 시뮬레이션 방법은 다양한 SRM의 모델을 쉽게 구현할 수 있다.

### 2. 본 문

#### 2.1 SRM의 특성

SRM은 이중돌극형 단일여자 릴럭턴스 모터이다. 이것은 회전자와 고정자 모두 돌극 구조이며 고정자에만 권선을 감은 구조이며 회전자는 권선, 자석이 없는 구조이다.<sup>[3],[4]</sup> 그림1은 전형적인 4상 8/6 SRM을 보여주고 있다. SRM의 동작은 고정자와 회전자 사이의 공극에 인덕턴스의 가변에 의해 이루어진다. 회전자가 고정자와 정렬위치가 되었을 때 토크는 없다. 또한 이 위치에서 인덕턴스는 최대이며 릴럭턴스는 최소이다. 이러한 SRM은 고효율, 신뢰성, 강인함, 제작의 용이함과 저비용의 모터이다. 하지만 SRM은 비싼 위치 센서가 필요하다.

며 진동과 소음뿐만 아니라 높은 토크리플을 발생시킨다.<sup>[6]</sup>

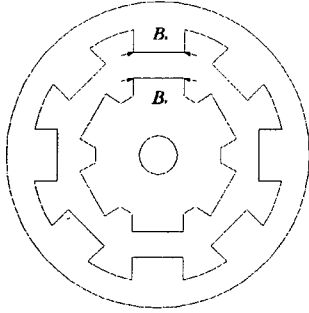


그림 1. 4상 8/6 SRM

## 2.2 Fourier series를 이용한 인덕턴스 모델링

SRM의 동작은 회전자(rotor)가 계속적으로 전류를 받은 고정자(stator)의 영향을 받아 비정렬 위치에서 정렬 위치로 반복적으로 움직이므로써 주기적으로 발생하는 포화의 고 레벨과 자기를 사용하는 비선형 특성의 영향을 강하게 받는다. 이는 첫째로 기계 설계 측면에서 상권선 인덕턴스를 계산하는 것에 어려움이 있고 둘째로 분석과 제어 목적을 위하여 수학적으로 설명하는 어려움을 제기한다. 쇠교자속과 전류사이의 비선형 관계는 전체적인 범위의 회전자 위치와 전류의 함수로써 상 쇠교자속과 상 인덕턴스를 해석하는 것을 어렵게 만든다. 그러므로 기계 변수의 관련된 계산은 전형적으로 look up table, on-line interpolation 알고리즘 그리고 유한요소법이나 실험에서 얻어진 데이터를 사용하는 추정법이 사용하여 수행되었다. SRM에 있어서 인덕턴스를 위한 해석적 표현은 기계 해석의 용이함과 구동 및 제어기법을 구현하는데 있어 통찰력을 주며 수행을 쉽게 하는 차별적인 특성과 측정에 있어서 높은 정확성을 가져오기 때문에 널리 사용되어진다.<sup>[2]</sup> 그림 2로부터 회전자 위치에 대한 상 인덕턴스를 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

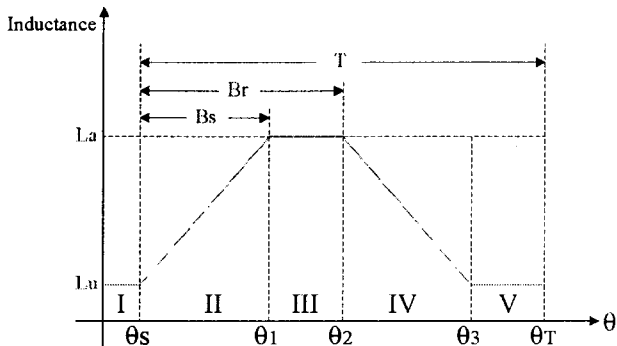


그림 2. SRM의 인덕턴스 프로파일

$$0 \sim \theta_s : f(\theta) = L_u \quad (1)$$

$$\theta_s \sim \theta_1 : f(\theta) = \frac{L_a - L_u}{\theta_1 - \theta_s} \theta + \frac{L_u \theta_1 - L_a \theta_s}{\theta_1 - \theta_s} \quad (2)$$

$$\theta_1 \sim \theta_2 : f(\theta) = L_a \quad (3)$$

$$\theta_2 \sim \theta_3 : f(\theta) = \frac{L_u - L_a}{\theta_3 - \theta_2} \theta + \frac{L_a \theta_3 - L_u \theta_2}{\theta_3 - \theta_2} \quad (4)$$

$$\theta_3 \sim \theta_T : f(\theta) = L_u \quad (5)$$

여기서,  $L_a$ 는 정렬위치에서의 인덕턴스,  $L_u$ 는 비정렬위치에서의 인덕턴스이다. Fourier series의 방정식은 다음과 같다.

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos n \frac{2\pi\theta}{\theta_T} + b_n \sin n\theta \right) \quad (6)$$

대칭과형이므로 위 방정식에서 단지 cos항만 남는다. 그러므로,

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos n \frac{2\pi\theta}{\theta_T} \right) \quad (7)$$

여기서,  $a_0$ 를 구하면

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(\theta) d\theta \\ &= L_u \theta_s + \frac{(L_a + L_u)(\theta_1^2 + \theta_s^2)}{2(\theta_1 - \theta_s)} - \frac{(L_a + L_u)\theta_s \theta_1}{(\theta_1 - \theta_s)} \\ &\quad + L_a(\theta_2 - \theta_1) + \frac{(L_u + L_a)(\theta_3^2 + \theta_2^2)}{2(\theta_3 - \theta_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

$a_n$ 는 다음과 같이 구했다.

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{\theta_T} \left[ L_u \cdot \frac{\theta_T}{2\pi n} \cdot \sin \frac{2\pi n \theta_s}{\theta_T} \right] \\ &\quad + \left[ \frac{L_a - L_u}{\theta_1 - \theta_s} \left\{ \frac{\theta_T}{2\pi n} \left( \theta_1 \cdot \sin \frac{2\pi n \theta_1}{\theta_T} - \theta_T \cdot \sin \frac{2\pi n \theta_s}{\theta_T} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( \frac{\theta_T}{2\pi n} \right)^2 \left( \cos \frac{2\pi n \theta_1}{\theta_T} - \cos \frac{2\pi n \theta_s}{\theta_T} \right) \right\} \right] \\ &\quad + \left[ \frac{L_u \theta_1 - L_a \theta_s}{\theta_1 - \theta_s} \cdot \frac{\theta_T}{2\pi n} \left( \sin \frac{2\pi n \theta_1}{\theta_T} - \sin \frac{2\pi n \theta_s}{\theta_T} \right) \right] \\ &\quad + L_a \cdot \frac{\theta_T}{2\pi n} \left( \sin \frac{2\pi n \theta_2}{\theta_T} - \sin \frac{2\pi n \theta_1}{\theta_T} \right) \\ &\quad + \left[ \frac{L_u - L_a}{\theta_3 - \theta_2} \left\{ \frac{\theta_T}{2\pi n} \left( \theta_3 \cdot \sin \frac{2\pi n \theta_3}{\theta_T} - \theta_2 \cdot \sin \frac{2\pi n \theta_2}{\theta_T} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( \frac{\theta_T}{2\pi n} \right)^2 \left( \cos \frac{2\pi n \theta_3}{\theta_T} - \cos \frac{2\pi n \theta_2}{\theta_T} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$+ \left[ \frac{L_a \theta_3 - L_u \theta_2}{\theta_3 - \theta_2} \cdot \frac{\theta_T}{2\pi m} \left( \sin \frac{2\pi m \theta_3}{\theta_T} - \sin \frac{2\pi m \theta_2}{\theta_T} \right) \right]$$

$$+ L_u \cdot \frac{\theta_T}{2\pi m} \left( \sin \frac{2\pi m \theta_T}{\theta_T} - \sin \frac{2\pi m \theta_3}{\theta_T} \right) \quad (9)$$

식(9)와(10)을 통하여 회전자 위치에 대한 인덕턴스 프로파일을 나타낼 수 있다. 위에서 구한 Fourier series를 이용하여 구한 식을 기초로 Matlab/M-file을 사용한 시뮬레이션을 결과를 통하여 검증하였다.

### 2.3 SRM의 스위칭 신호 산출

전류가 상에 흐를 때 토크는 회전자를 움직이게 한다. 이는 인덕턴스가 최대값에 이르는 위치에 도달 할 때까지 인덕턴스를 증가하게 하는 신호가 된다. 철에 더 이상 남은 잔류 자화가 없으면 전류의 신호는 중요하지 않다. 토크의 신호는 항상 가장 가까운 정렬위치로 향한다. 그러므로 정토크는 정방향 위치에서 회전자가 비정렬위치와 다음 정렬위치 사이에 있을 때에만 발생한다.<sup>[3]</sup> 이것은 그림3에 나타내었다.

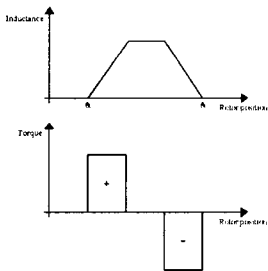


그림3. SRM의 상 인덕턴스와 토크

결과적으로 이 시뮬레이션 방법에서 우리는 Fourier series로부터 산출한 인덕턴스 값을 미분하였다. 토크방정식은 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (10)$$

위 방정식으로부터 회전자 위치가 움직이는 가변에 의해 정,부토크가 발생함을 알 수 있다. 즉, 적당한 스위칭을 하지 않으면 토크 리플이 발생한다. 그러므로 본 논문의 시뮬레이션에서는 Fourier series로 구한 인덕턴스 값을 미분하여 적당한 스위칭 신호로 만들었다. 인덕턴스가 증가하는 구간, 감소하는 구간, 그리고 평탄한 구간을 회전자 위치값을 피드백 받아 검출하여 위 3가지 구간을 판별하도록 하였다.

### 2.4 컨버터의 동작

그림4는 비대칭 컨버터를 보여주고 있다. 이 비대칭 컨버터는 3가지의 동작모드로 이루어져 있

다.<sup>[7]</sup> 양의 전압루프에서는 상 스위치를 동시에 턴-온하면 상권선에 전류가 빠르게 흐른다. 이 때의 회로 방정식은 다음과 같다.

$$V_a = R_a i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} \quad (11)$$

$$i_a(t) = \frac{V_{dc}}{R_a} \left( 1 - e^{-\frac{R_a t}{L_1}} \right) + I_0 e^{-\frac{R_a t}{L_1}} \quad (12)$$

여기서  $R_a$ 는 상권선저항,  $L_1$ 은 상인덕턴스,  $I_0$ 는 초기값이다. 영의 전압루프에서는 권선에 전류가 흐르는 동안 하나의 스위치만을 턴-온한다. 전류는 하나의 스위치와 다이오드를 통하여 계속적으로 흐른다. 음의 전압루프에서는 스위치가 모두 턴-오프하여 다이오드를 통하여 에너지가 dc전원으로 환원한다. 이 때의 회로 방정식은 다음과 같다.

$$-V_a = R_a i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} \quad (13)$$

$$i_a(t) = \frac{-V_{dc}}{R_a} \left( 1 - e^{-\frac{R_a t}{L_1}} \right) + I_0 e^{-\frac{R_a t}{L_1}} \quad (14)$$

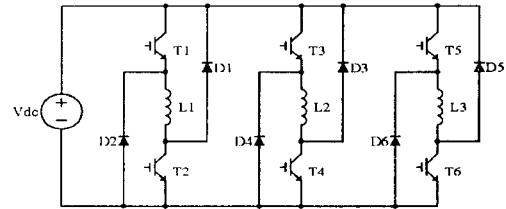


그림4. 비대칭 컨버터

### 2.5 시뮬레이션 결과

그림 5에 회전자 위치에 대한 인덕턴스 프로파일을 나타내었다. 3상 6/4 SRM을 모델링 한 것이며 그림5에서의 고조파는 100이며 그림6은 10으로 하였다. 또한, 고정자 극호와 회전자 극호는 서로 다른 값을 사용하였다. 정렬 위치에서의 인덕턴스 값은 0.47[H]이며, 비정렬 위치에서의 인덕턴스 값은 0.07[H]로 시뮬레이션 하였다.

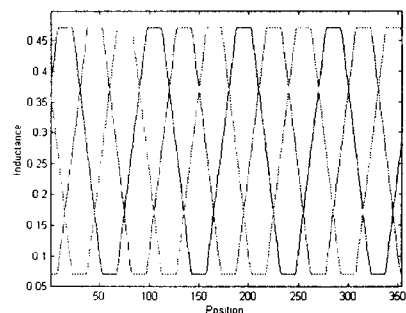


그림5. 인덕턴스 프로파일(n=100)

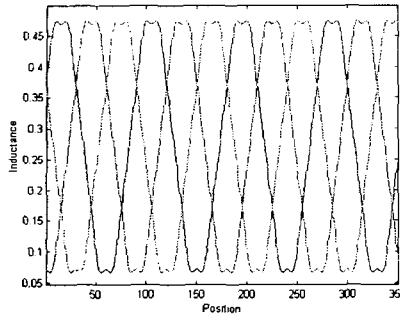


그림6. 인덕턴스 프로파일(n=10)

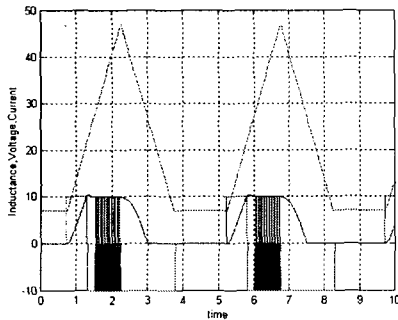


그림7. 상 인덕턴스, 전압, 전류

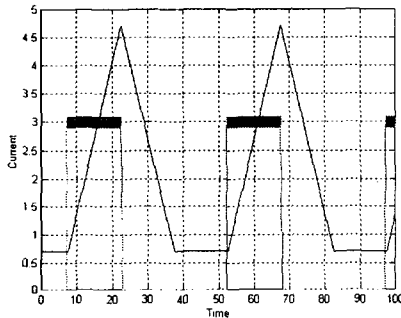


그림8. 상 인덕턴스와 전류

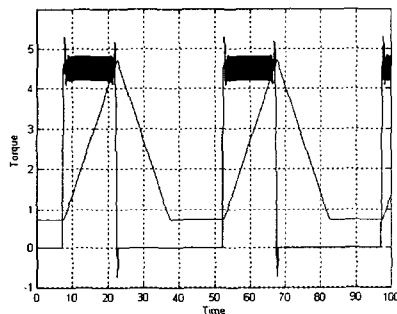


그림9. 상 인덕턴스와 토크

그림 7은 상 인덕턴스, 전압, 전류 파형을 나타내었다. 앞에서 구한 스위칭 신호를 토대로 구현하였으며 전류를 초핑하는 제어기법을 사용하였다. 그림 8과 9는 상 인덕턴스와 전류 그리고 토크 파형을 나타낸 것이다. 이 시뮬레이션에는 히스테리시스 전류제어기를 사용하였다. 결과적으로 Fourier

series를 이용하여 구한 식을 토대로 매우 간단하며 정확하고 빠른 시뮬레이션이 이루어졌음을 검증할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서 새로운 분석적 해석과 Matlab/M-file을 이용한 SRM 상 인덕턴스 시뮬레이션을 제안하였다. 그 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하였고 분석적 해석 기법으로 측정된 상 인덕턴스는 실제값을 거의 정확하게 추정하였다. 이 시뮬레이션 기법은 많은 장점을 가지고 있다. 이 기법은 표현이 자유로우며 적용이 광범위하며 모터 파라미터만으로도 인덕턴스 프로파일을 생성할 수 있으며 시간절약 또한 할 수 있다. 그리고 한가지 모델로 국한된 기존의 방법과는 달리 다양한 SRM의 모델을 쉽게 구현할 수 있다. 또한 SRM의 설계 및 해석 프로그램 개발에 있어서 기초가 될 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] F.Soaes, P.J. Costa Branco, "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment," Aerospace and Electronic System, IEEE Transactions on, Vol. 37, no. 3 July 2001 page(s):989-1009.
- [2] D.A. Andrade, R. Krishnan, "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach," Industry Applications Conference, 2001. thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2001 IEEE, Volume: 1, 2001 page(s):48-54.
- [3] Miller, T.J.E. "Switched Reluctance Motors and Their Control," Clarendon Press, Oxford, 1993
- [4] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications," CRC Press, 2001.
- [5] Johnson, J.P., Rajarathnam, A.V., Toliyat, H.A., Gopalakrishnan, S., Fahimi, B., "Torque Optimization for a SRM Using Winding Function Theory with a Gap-Dividing surface," Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, Volume:2, 1996 Page(s): 753-760.
- [6] Christophe Roux, M.M. Morcos, "A Simple Model for Switched Reluctance Motors," IEEE Power Engineering Review, Volume:20 Issue:10, Oct. 2000, Page(s): 49-52.
- [7] Mike Barnes and Charles Pollock, "Power Electronic Converter for Switched Reluctance Drives," power Electronics, IEEE Transactions on Vol. 13, no. 6, November 1998 page(s): 1100-1111.