

자기적 비선형을 고려한 스위치드 리럭턴스 모터의 특성 해석

박영록*, 천동진*, 조범규*, 정도영*, 이상호*, 이봉섭*, 최경호**

*삼척대학교, **영남대학교

Analysis of the Switched Reluctance Motor Characteristics Considering Magnetic Nonlinearity

Pak Young-Rok*, Chun Dong-Jin*, Cho Bum-Kyu*, Jung Do-Young*,
Lee Sang-Ho*, Lee Bong-Sub*, Choi Kyung-Ho**

*Samchok National University, **Yeungnam University

ABSTRACT

This paper presents models considering the magnetic nonlinear characteristics of 8/6 Switched Reluctance Motor. A $\lambda-i$ equation with Fourier series parameters is shown to represent the relating to flux-linkage and current appropriately at any rotor position. And the energy conversion loop is described.

1. 서론

SRM의 자속쇄교수-전류 특성 곡선은 모터의 전기적인 에너지와 기계적인 에너지 관계를 나타냄으로써 토크 및 속도제어를 위하여 중요한 정보를 제공한다.^[1] SRM을 수학적으로 모델링하고자 많은 연구가 진행되었지만, 자기적 특성을 복잡한 수식으로 전개해야만 하고, 반복적인 계산이 요구되기 때문에 실험치와는 잘 일치하지 않는다. 이러한 자기적 포화 현상의 비선형적 특성을 고려하여 SRM을 해석적으로 모델링한 몇 개의 논문이 발표되었다.

Buja의 논문에서는 자기적 특성영역을 각도에 따라 4단계로 나누어 수식을 전개하였기 때문에, 자속쇄교수-전류 특성사이에 작은 오차가 포함하게 되며, 이는 철두 전류와 순간 토크를 정확히 예측하지 못하게 된다.^{[2][3]}

한편, Torry는 실험 데이터를 통하여 어떠한 회전자 위치에서도 자속쇄교수-전류 관계를 제공할 수 있도록 하나의 요약된 방정식을 유도하였고, 6/4 SRM에 적용하여 방정식의 타당성을 증명하였다.^[4]

따라서 본 연구에서는 Torry가 제시한 방정식을 이용하여 8/6 SRM의 자기적 포화 현상을 고려하였을 때, 자속쇄교수-전류($\lambda-i$) 특성을 정확히 나타낼 수 있는 파라미터를 제공하고, 시뮬레이션값과 실험치를 비교 하였다. 이를 기초로 8/6 SRM의 여러 가지 동작 모드에서의 전류

값과 토크값을 계산하였다.

2. SRM의 동작원리

SRM은 플레밍의 왼손법칙에 의하여 회전력을 얻는 직류전동기와는 달리 고정자와 회전자사이의 자기저항의 변화를 이용하여 회전력을 얻는 전동기이다. 따라서 회전자에는 회전자 자화를 위한 권선이나 자성체가 필요없으며, 고정자에는 회전자와 고정자사이의 자기회로 형성을 위한 권선만 필요하다.

그림 1은 본 논문에서 사용한 8/6 SRM의 구조로서, 고정자 극수 8개, 회전자 극수 6개를 갖는다. 특히 SRM은 상간의 상호인덕턴스가 무시할 정도로 작으며, 각각의 상들을 독립적으로 제어할 수 있도록 고정자와 회전자가 이중 돌극형구조로 되어있다. 고정자 돌극에 감긴 권선은 맞은 편의 고정자돌극에 감긴 권선과 직렬로 연결되어 하나의 상을 이루게 된다. 또한 회전자와 고정자의 자기회로는 여러 장의 규소강판을 적층한 구조로 되어있다.

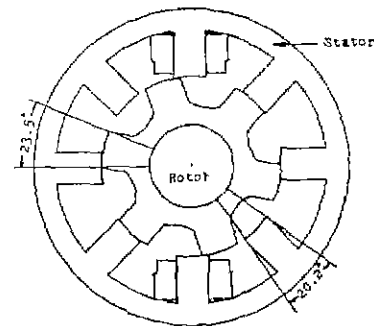


그림1 8/6 SRM의 고정자 및 회전자구조

한 상의 고정자권선에 전압을 인가하면 여자된 고정자 돌극과 회전자돌극 사이에 자기회로가 형성된다. 회전자는 자기저항이 최소가 되는 방향, 즉 회전자돌극과 고정자돌극이 정렬하는 방향으로 움직이게 된다. 여자된 고정자돌

극과 회전자돌극이 완전히 정렬되기 전에 전력용 트랜지스터를 이용하여 인가전압을 턴오프시킨다. 이어서, 다음의 고정자권선에 전압을 인가하여 이웃한 돌극을 여자시키면, 상기와 같은 원리에 의하여 새로 여자된 고정자돌극에 가장 가까운 회전자돌극이 정렬되려는 방향으로 움직이게 된다. 이와 동일한 방법으로 고정자권선에 순차적으로 전압을 인가하면 회전자는 지속적으로 회전하게 된다. 회전자 각 일정 방향으로 회전하게 되면 SRM에서 토크가 발생되며 이에 따라 기계적에너지가 발생된다.^[1]

2.1 λ-i 방정식

SRM의 λ-i 관계를 다음 식으로 표현 할 수 있다.^[4]

$$\lambda(\theta, i) = a_1(\theta)(1 - e^{a_2(\theta)i}) + a_3(\theta)i \quad (1)$$

여기서, λ는 자속쇄교수, i는 상전류이며, θ는 회전자 위치를 나타낸다.

회전자 위치와 더불어 변화하는 식(1)에서 a₁(θ), a₂(θ) 및 a₃(θ)는 Fourier 계수로서 표시될 수 있는 주기 함수이다. a₃는 높은 전류레벨에서 증가하는 인덕턴스 성분으로 [H]의 단위를 가지며, a₂는 모터의 포화 정도를 나타내는 것으로 [A⁻¹]단위를 가지고, a₁은 모터가 포화모드로 들어갈 때 일정량의 자속쇄교수를 고려한 것으로 단위는 [V-sec]이다.

SRM의 고유한 주기적 구조는 식(1) a의 계수를 Fourier 정현 급수 형태인 식(2)로 나타낼 수 있게 한다.

$$a_m = \sum A_{mk} \cos(k\alpha\theta) \quad (2)$$

여기서, A_{mk}는 m번째 Fitting 계수를 위한 k번째 Fourier 계수를 나타내며, α는 기계적인 한 싸이클당 전기적인 싸이클 수이다.

2.2 토크 방정식

j 상에 대한 토크 T_j는, 자기적 비포화 상태에서 서부터 포화 상태에 이르기까지 독립적인 상을 가지고 SRM에 의해서 발생되며, 식(3)으로 결정된다.

$$T_j = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda_j(i, \theta) di \quad (3)$$

위의 식은 코-에너지 관계에서 유도되며, SRM의 전 토크 T는 각 상에서 발생하는 토크의 합 T = ∑T_j으로 주어진다.

자속쇄교수-전류 관계를 나타내는 식(1)을 (3)식에 대입하면, 각 상에서 발생된 SRM의 전 토크는 (4)식처럼 된다.

$$T_j = \sum_{j=1}^P \left\{ \left[i_j + \frac{1}{a_{2j}}(1 - e^{a_{2j}i_j}) \right] \frac{da_{1j}}{d\theta} - \left[\frac{a_{1j}}{a_{2j}}(1 - e^{a_{2j}i_j}) + \frac{a_{1j}i_j}{a_{2j}} e^{a_{2j}i_j} \right] \frac{da_{2j}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_j^2 \frac{da_{3j}}{d\theta} \right\} \quad (4)$$

여기서, P는 모터의 상수이다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 자속쇄교수-전류 특성

본 논문에서는 SRM의 속도 ω가 일정하다고 가정한다. 이것은 또한 모터의 속도가 천천히 변화하는 경우, 즉 ω가 한 싸이클동안 크게 변화하지 않는 속도에서도 유효하다.

실험에 사용된 8/6극 4상 SRM의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 4상 8/6극 SRM의 사양

고정자 및 회전자 극수	8극
마력(HP)	0.5
기본속도(rpm)	4000
정렬 인덕턴스(mH)	72.4
비정렬 인덕턴스(mH)	9.1
저항/상(Ω)	1.9

그림 2는 표 1에 제시된 SRM의 자속쇄교수를 정렬(30°)일 때와 비정렬(0°)일 때를 100 [mA] 단위로 5[A] 전류까지 측정된 것이다.

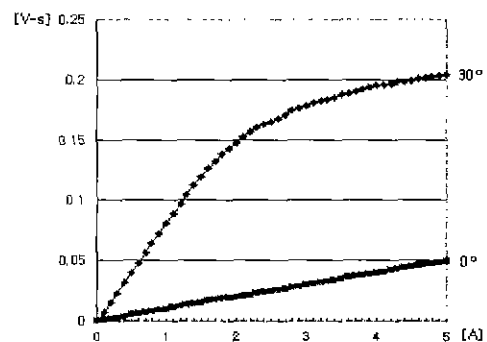


그림 2. 측정된 자속쇄교수-전류 특성

λ-i 관계를 모델링하기 위하여, 측정된 데이터를 이용하여 Fourier 정현계수값을 표 2에 구하였다.

표 2와 식(1)을 Newton-Raphson법을 이용하여 8/6극 4상 SRM에 대한 자속쇄교수-전류 특성을 구하였다. 회전자 극과 고정자 극이 일치하는 30°에

표 2. Fourier 정현 계수값

k	$a_1(\theta)$ [mV-s] ($m=1$)	$a_2(\theta)$ [A ⁻¹] ($m=2$)	$a_3(\theta)$ [mH] ($m=3$)
0	126.8	-0.3435	10.7
1	-72.1	0.3859	4.4
2	-2.8	-0.0439	-2.1
3	-2.9	-0.0034	0.6

서부터 비정렬 위치인 0°까지의 자속쇄교수-전류 특성곡선을 그림 3에 나타내었다.

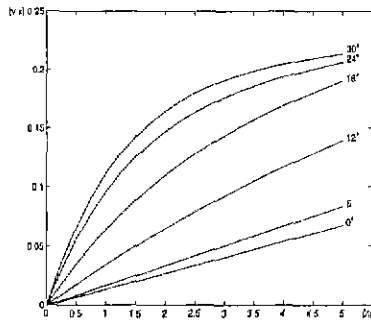


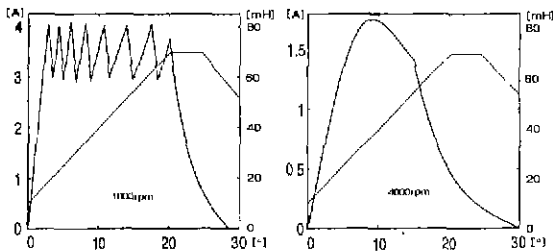
그림 3. 8/6 SRM의 자속쇄교수-전류 특성

그림 3의 계산값을 이용하여 8/6 SRM의 전류 및 토오크 특성들을 고찰하였다.

3.2 단일펄스 동작 및 전류조정 동작 모드

SRM은 속도에 따라 권선코일을 여자하는 방법이 다르다. 일반적으로 단일펄스 동작(Single pulse operation)은 고속에 사용되고, 전류조정(Current regulation operation) 동작은 저속에 사용된다.

그림 4(a)는 1000 rpm의 전류조정 동작모드를, 그림(b)는 4000 rpm에서의 단일펄스 동작모드를 시뮬레이션 한 것을 나타낸다.



(a) 전류조정 동작 모드 (b) 단일펄스 동작 모드

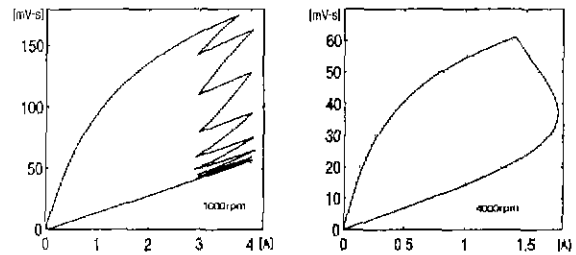
그림 4. 전류조정 동작 및 단일펄스 동작 전류파형

그림 4(a)는 저속일 경우, 전류조정 동작모드를 나타낸다. 속도전압이라 할 수 있는 Back emf는 인가 전원전압보다 상당히 작으므로 전류는 증가하였다가 매우 빠르게 감소한다. 이 때 전류가 과도하게 흐르

는 것을 방지하기 위하여 Hysteresis PWM방식을 사용하였으며, 드웰각은 20°이다.

그림 4(b)는 고속인 경우, 단일펄스 동작 모드를 나타낸다. 속도가 점점 증가함에 따라 Back emf는 공급전압보다 커지게 된다. 즉, 4000 rpm에서 전류는 전 공급전압이 상에 인가되더라도 $\theta=8^\circ$ 에서부터 감소하기 시작하였다. 드웰각은 15° 이다. 코뮤테이션각을 앞당긴 이유는 고정자극과 회전자극이 정렬되기 전에 전류를 소호하기 위해서이다. 만약, 정렬이 된 후에도 전류가 흐르면 부토오크가 발생하여 평균토오크를 감소시키게 된다. 고속에서 Back emf는 매우 큰 값이므로, 회전자 위치에 대한 전류감소율은 매우 느리다.

그림 5는 그림 4의 동작모드에서 $\lambda-i$ 궤적관계를 나타낸다.

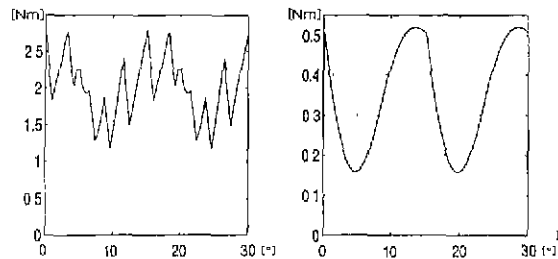


(a) 전류조정 $\lambda-i$ 궤적 (b) 단일펄스 $\lambda-i$ 궤적

그림 5. $\lambda-i$ 궤적

SRM의 기계적인 출력 에너지는 그림 4의 $\lambda-i$ 궤적으로 둘러 쌓인 면적과 등가이다. 따라서 에너지 변환 루프는 저속보다 고속에서 $\lambda-i$ 궤적이 그리는 면적이 작으므로 토오크 발생이 작은 것을 알 수 있다.

순시 토오크와 평균 토오크는 식(4)를 이용하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다.



(a) 1000 rpm

(b) 4000 rpm

그림 6. 순시 토오크

기대했던 바와 같이 4000rpm에서의 토오크는 작게 나타났는데 이는 전류와 자속값이 감소하였기 때문이다. 이러한 모습은 약제자(field weakening)제어를

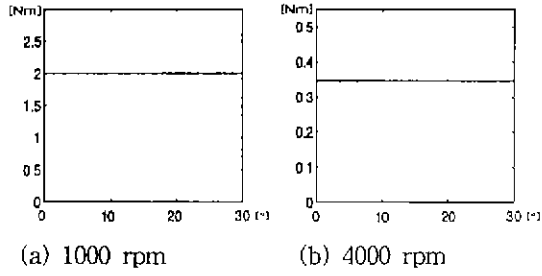


그림 7. 평균 토오크

하지 않더라도 정토크(constant torque) 영역에서 부터 정출력(constant power) 영역까지 자연스럽게 천이 일어나는 것을 의미한다. 따라서 SRM은 BLDC 모터나 다른 AC모터와 같이 고속에서 충분한 전류가 흐르도록 자속을 감소시켜야 하는 제어 알고리즘이 필요하지 않는 이점이 있다.

3.3 각도 제어

속도가 증가함에 따라, SRM운전시스템의 토오크 특성은 제어 알고리즘을 사용하지 않는 한 감소된다. 일반적으로 SRM 시스템의 DC 모션전압은 고정되어 있기 때문에 상에 인가되는 전압은 이 모션전압보다 클 수 없다. 따라서 고속인 경우 각도제어(angle control) 방법을 사용하여 요구하는 큰 토오크를 발생하게 한다. 각도제어 방법에는 두 가지가 있다. 턴온각 제어 및 코뮤테이션각 제어가 있으며, 이들은 드웰각 및 도전각 등을 조정하게 된다.

그림 8은 4000rpm에서 시뮬레이션 결과를 나타낸다. (a)는 어드밴스각을 주지 않았을 경우이고, (b)는 5°의 어드밴스각을 주었을 때이다. 극과, 극의 중간 영역인 비정렬 상태에서 인덕턴스는 매우 낮기 때문에 Back emf가 커지기 전에 전류는 빨리 확립될 수 있다. 따라서 어드밴스각을 5° 주었을 경우 침투전류를 1.5배 이상 증가하게 되어 평균 토오크는 증가한다.

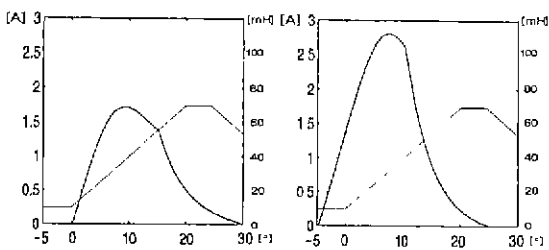


그림 8. 각도제어에 의한 전류 파형

그림 9는 그림 8과 같이 각도제어를 하였을 경우의 평균 토오크를 나타낸다.

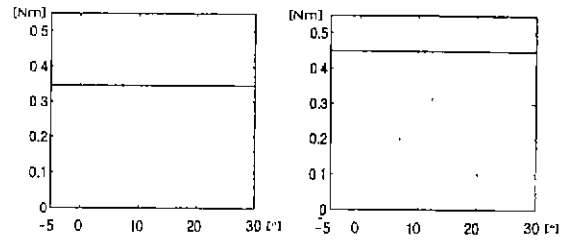


그림 9. 각도제어에 따른 평균 토오크

4. 결론

본 논문에서는 자기적으로 비선형특성을 갖는 SRM의 제특성을 고찰하였다. 비선형특성을 잘 나타낼 수 있는 8/6 SRM의 $\lambda-i$ 방정식의 파라미터값을 제시하였고, 이를 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

자기적 비선형의 $\lambda-i$ 특성곡선을 정렬상태에서 비정렬상태까지 세분하여 구하였으며, 전류조정동작 모드와 단일펄스 동작모드에서 에너지 변환루프 구하여 SRM 설계시 필요한 에너지 변환관계를 밝혔으며, 또한 각 동작 모드시 전류 및 토오크를 구하였다.

참고 문헌

- [1]. T. J. E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, 1993.
- [2]. G. S. Buja and M. I. Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part I: Operation in the Linear Region", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, Oct., 1991
- [3]. G. S. Buja and M. I. Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part I: Operation in the Saturated Region", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, June, 1994
- [4]. D. A. Torry, X.-M. Niu and E.J. Unkauf, "Analytical Modelling of Variable Reluctance Machine Magnetisation Characteristics", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 142, No 1, January 1995
- [5] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szczsny and W. H. Bicknell, "Microcomputer control of switched reluctance motor", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. IA-22, No.4 pp. 708-715, July/August 1986.