

SRM의 가변 속도 제어를 위한 스위칭 기법에 관한 연구

이태규*, 허육열
 仁荷大學校 大學院 電氣工學科

A Study on the Switching Strategy of SRM for Variable Speed Control

Tae-Gyoo Lee, Uk-Youl Huh

ABSTRACT

This paper describes a switching strategy for variable speed control and low torque ripple of Switched Reluctance Motor(SRM). The main advantage of this strategy is simple control. Therefore it can be constructed easily. And a design principle of SRM is represented for the proposed switching strategy.

The proposed switching method is tested by simulation and experiment on various SRM type.

As a result, The SRM drive with the proposed scheme is effective in reducing the torque ripple and variable speed control

1. 서론

스윗치드 리럭턴스 모터(SRM)는 회전자와 고정자에 영구자석이 없이 각각에 치(teeth)를 갖는 구조(doubly salient)이며 고정자와 회전자의 자기저항(reluctance)의 변화에 의하여 토크가 발생하는 모터이다[1].

SRM은 구조적으로 유도 모터나 동기 모터보다 구조가 간단하며, 기동 토크가 크고 가변속이 용이할 뿐만 아니라 속도 변화 범위가 넓으며 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 또한 SRM은 원리적으로 한 방향의 전류만으로 구동이 가능하므로 구동장치를 구성하는데 적은 수의 전력 소자가 이용된다[2].

그러나 SRM은 인덕턴스가 크고 변화가 심하며, 구동회로 설계시 문제가 있고, 초기 기동에 문제가 있다[3]. 또한 고정된 스위칭 방식으로 구동하는 경우, 자기포화등의 영향으로 특히 고속 구동에서 토크 리플이 크며 이에 따라 다른 모터보다 높은 유효전압이 발생한다[5]. 따라서 SRM은 구조가 간단하여도 적절한 제어를 통하여 이들에 대한 보상이 필요하며, 속도에 따른 스위칭 각을 다르게 할 필요가 있다.

지금까지 여러 논문에서 SRM의 설계와 구동회로, 토크 리플의 개선, 속도제어에 관한 연구가 활발히 이루어 지고 있다 [1][3][4][5][6][7].

본 논문에서는 SRM의 토크 리플의 감소와 다양한 속도운전을 위한 단순한 스위칭 방법을 연구하였다. 실험에 사용된 모터는 그림 1 과 같이 고정자 극수 6, 회전자 극수 4의 SRM이며, 회전자 치폭을 β_r , 고정자 치폭을 β_a 라 하였다. 그리고 실험 및 해석에 사용된 구동회로는 고전력 인 인버터를 사용하였다.

2. SRM의 특성

SRM은 회전자의 위치에 따라 공극의 자기저항이 달라진다. 이러한 자기저항의 변화는 공극에서의 저장 에너지의 변화를 초래하게 되고, 에너지 보존의 법칙에 의하여 자기 에너지의 변화량 만큼 기계적인 에너지로 바뀌게 된다. 이러한 자기저항의 변화는 곧 인덕턴스의 변화이며 만약 자기포화 현상 및 히스테리시스 현상을 무시하고 프리징 영향을 무시하면 인덕턴스는 회전자의 위치에 따라 그림 2 와 같은 사다리꼴 형태를 갖는다고 할 수 있

다.[8] 이때 β_r 은 50도이고, β_a 는 30도이다.

그림 2 에서 회전자 치의 전면적이 고정자의 치의 전면과 완전히 일치하는 경우 인덕턴스는 최대이며 완전히 어긋난 경우 최소이다. 그림 3 은 SRM의 고정자와 회전자 극폭에 따른 인덕턴스 형상을 간략히 나타내고 있다. 모터의 효율적인 회전을 위하여 삼각형으로 형성된 부분에서 모터의 설계가 이루어져야 한다.[1]

본 논문에서는 SRM이 삼각형의 밑 부분의 굵은 실선으로 표시된 부분에서의 모터의 설계를 조건으로 하며 이러한 SRM의 설계시 인덕턴스의 형태가 그림 2 에 나타나 있다. 이 경우, 어떠한 한 상의 인덕턴스가 상승할때 다른 상은 인덕턴스의 상승 구간이 없으며 연속적으로 인덕턴스가 상승하는 상이 존재한다. 이러한 SRM 인덕턴스 변화의 크기는 토크를 결정한다.

본 연구에서는 SRM의 설계가 그림 2 와 같은 경우를 기본으로 하며, 그렇지 못한 경우에 대해서도 고려한다.

SRM의 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \sum_{j=1}^p k_j(\theta) i_j^2 \quad (1)$$

$$T : \text{토크}, k_j(\theta) = \frac{\partial L_j(\theta)}{\partial \theta}$$

$L_j(\theta)$: j상의 인덕턴스, j : 상수, θ : 회전자 위치
 식(1)에서 알 수 있듯이 모터의 위치에 대한 인덕턴스의 미분이 토크의 부호를 결정한다. 이러한 의미에서 모터의 효율적인 회전을 위하여 부(-)의 토크를 없애야 한다. 이를 위하여 인덕턴스의 미분이 음(-)인 영역에서 상 전류를 영으로 만들어 부(-)의 토크를 없앨 수 있다. 이러한 부(-)의 토크의 제거는 스위칭 ON/OFF각의 조절에 의하여 가능하다. 또한 인덕턴스의 미분이 영이 되는 구간에서는 토크가 발생하지 않으며 전류의 제곱에 의하여 토크가 결정되므로 전류의 방향에는 무관하다.

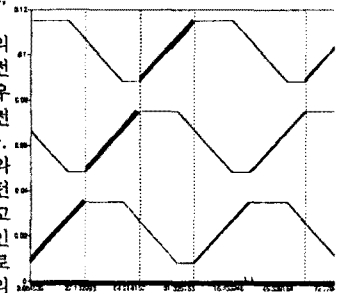


그림2 SRM의 인덕턴스 형상

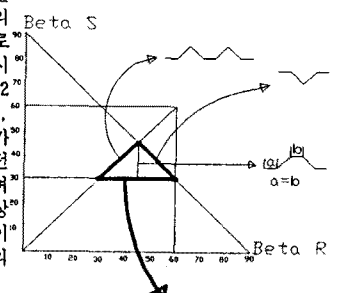


그림 3 SRM의 효율적 회전을 위한 β_r 과 β_a 의 값

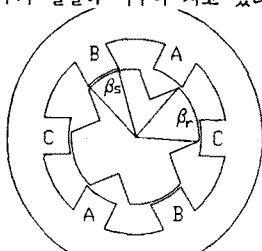


그림 1 SRM의 구조

3. 토크 리플의 개선

앞장에서 서술했듯이 SRM의 인덕턴스는 근사적으로 사다리꼴이라 할 수 있으며, 사다리꼴의 형태는 그림 3에서 알 수 있듯이 회전자 극폭(β_r)과 고정자 극폭(β_s)에 의하여 결정된다. 인덕턴스의 상승, 하강구간의 크기는 다음과 같다.

$$L_{\min} \text{ 구간} : 90^\circ - \beta_r - \beta_s, L \text{ 상승구간} : \beta_s$$

$$L_{\max} \text{ 구간} : \beta_r - \beta_s, L \text{ 하강구간} : \beta_s \quad (2)$$

여기서 $\beta_r > \beta_s$ 이다

토크 리플의 개선은 다음과 같은 방법을 이용한다.

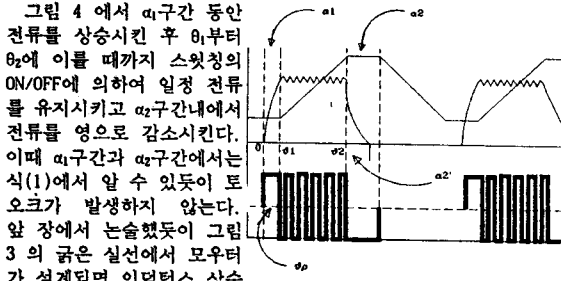


그림 4 토크 리플 개선을 위한 전류 파형

일정 전류의 유지를 위한 상의 ON/OFF에 의한 리플을 갖는 평할한 토크를 항상 얻을 수 있다.

SRM 한상의 전기적 동 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L(\theta)} i + \frac{1}{L(\theta)} V - k(\theta) \omega i \quad (3)$$

R : 권선 저항, ω : 회전 속도, V : 인가 전압
따라서 α_1 구간에서 $L(\theta)=L_{\min}$ 이고, $k(\theta)=0$ 이므로 다음 식이 성립한다.

$$i = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_{\min}} t}) \quad (4)$$

초기 전류 : 0

그리고 α_2 구간에서는 다음식이 성립한다.

$$i = \frac{-V}{R} + (i_s + \frac{V}{R}) e^{-\frac{R}{L_{\min}} t} \quad (5)$$

초기 전류 : i_s , 인가 전압 : -V

그림 4와 식(4), 식(5)에서 알 수 있듯이 α_1 구간에서 전류는 i_s 로 상승하고, α_2 구간에서 전류는 i_s 로부터 영으로 된다. 그리고 SRM의 속도가 일정하다고 하면 다음식이 성립한다.

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (6)$$

t_1 : α_1 구간을 회전자가 움직이는데 걸리는 시간

t_2 : α_2 구간을 회전자가 움직이는데 걸리는 시간

식(6)에서 $\alpha_2' < \alpha_2$ 이면 $\omega(-)$ 의 토크는 발생하지 않는다.

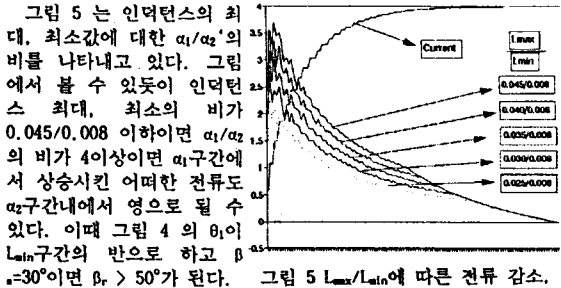


그림 5 L_{\max}/L_{\min} 에 따른 전류 감소, 상승에 대한 β_r/β_s 의 비

공극의 크기, 고정자와 회전자의 치폭, 권선수 등에 의하여 결정된다. 따라서 인덕턴스의 최대, 최소값의 비에 대한 조건에 따라 β_r 과 β_s 의 설계를 달리할 수 있다. 또한 α_2 에 α_1 의 크기를 조절함으로써 제시된 기법의 토크 리플의 개선이 가능하다. 설계조건에 관계없이 전류의 제어에 의하여 리플의 개선이 가능하다.

제시된 설계조건이 맞지 않을 경우에 대하여도 부분적으로 위의 방법으로 토크 리플을 개선할 수 있다.

4. 속도 제어

제시된 토크 리플 개선 방법하에서 속도 제어 방법에 대하여 설명한다.

제시된 토크 리플의 개선 방법에 의한 토크의 발생은 일정전류의 유지를 위한 전류 리플의 크기에 제곱의 크기를 갖는 토크가 항상 발생한다. 이러한 리플을 무시하면 평할한 토크가 발생한다고 볼 수 있다.

그림 6은 토크의 평할을 가질 수 있는 전류에 대한 최대속도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전류(i_s)는 속도에 종속된다.

SRM의 기계적 동 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [\sum_{j=1}^p k_j(\theta) i_j^2 - B\omega - T_l] \quad (7)$$

J : 관성 모멘트, B : 점성 마찰 계수, T_l : 부하 토크
윗 식에서 항상 토크가 평할하게 발생한다면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k i_s^2 - B\omega - T_l] \quad (8)$$

$$\omega = \frac{k i_s^2 - T_l}{B} (1 - e^{-\frac{B}{J} t}) + \omega_0 e^{-\frac{B}{J} t} \quad (9)$$

$k(\theta) = k$, ω_0 : 초기 속도

따라서 정상 상태의 속도는 $(k i_s^2 - T_l)/B$ 이며, i_s 에 의하여 결정되는 속도가 그림 6에서 보여지는 최대의 속도보다 크게 되면 앞서 제시된 토크 리플의 개선을 가져올 수 없다.

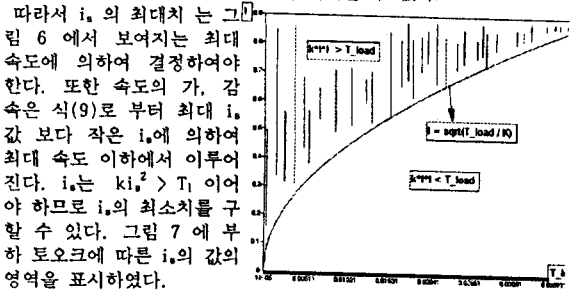


그림 7 부하 토크에 따른 전류의 영역

따라서 i_s 의 최대치는 그림 6에서 보여지는 최대 속도에 의하여 결정하여야 한다. 또한 속도의 가, 감소는 식(9)로부터 최대 i_s 값 보다 작은 i_s 에 의하여 최대 속도 이하에서 이루어진다. i_s 는 $k i_s^2 > T_l$ 이어야 하므로 i_s 의 최소치를 구할 수 있다. 그림 7에 부하 토크에 따른 i_s 의 값의 영역을 표시하였다.

5. 시뮬레이션
시뮬레이션은 다음과 같은 데이터를 이용하였다.

회전자 극수	4	[개]
고정자 극수	6	[개]
권선 저항	2.5	[Ω]
최대 인덕턴스	35	[mH]
최소 인덕턴스	8	[mH]
관성 모멘트	0.09543	[Kg cm ²]
점성 마찰계수	1.0205×10^{-4}	[Kg/cm]
부하 토크	0.2045	[Kg cm]
인가 전압	200	[V]
최대 정격 전류	5	[A]
β_r	50	[도]
β_s	30	[도]

표 1 SRM 시뮬레이션 데이터

그림 8에는 SRM의 제어가 이루어지지 않은 경우, 즉 일반적인 고정 스윗칭 각에 의하여 구동했을 시의 시뮬레이션 결과이다. 이때 고속도의 운전이 가능하나 토크 리플이 크게 나타남을 볼 수 있다.

데이터로 부터 모우터의 구동을 위한 최소 전류는 0.6235 [A]이며 본 논문에서 제시된 방법을 전류(i_a)를 0.8[A]로 하여 제어한 결과가 그림 9이다. 그림에서 알 수 있듯이 토크 리플이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션은 스윗칭을 이상적으로 행할 수 있다는 가정하에서 행하여 졌다.

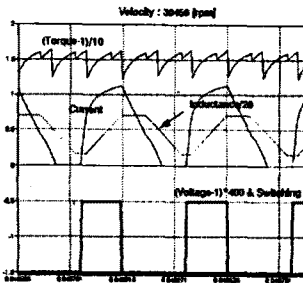


그림 8 단순한 스윗칭에 의한 SRM의 구동 결과

	최대 토크(Nm)	최소 토크(Nm)	리플율(%)
그림 8	0.0633	0.0253	21.4
그림 9	0.0341	0.0308	2.5

표 2 토크의 리플율과 최대, 최소 토크

6. 실험

제시된 스윗칭 기법에 대한 실험은 연구실에서 소유한 SRM에 대하여 행하였으며 스윗칭 소자의 조건에 의하여 표1의 데이터를 아래 표2와 같이 부분적으로 변경하여 실험하였다. 스윗칭에 대한 문제점은 고성능 소자를 이용하므로 해결할 수 있을 것이다. SRM제어를 위한 시스템은 그림 10 와 같다.

그림 11는 단순한 스윗칭에 의한 SRM의 구동시 전류와 상 여자 파형을 나타내고 있다. 그림 12은 이 경우 제시된 기법을 이용하여 제어한 결과이다.

인가 전압	110 [V]
B_r	32 [도]
B_s	26 [도]

표 3 SRM 실험 데이터

그림에서 보여지듯이 시뮬레이션의 이상적 스윗칭을 할 수 없기 때문에 생기는 문제점이 보이고 있다. 그림 11의 경우 저주파의 큰 잡음이 발생하며, 그림 12의 경우는 고주파의 잡음이 발생하기는 하나 매우 작다.

제시된 기법에 부합하는 최적의 설계 상태를 모우터가 가지지 않았으나 부분적으로 특성이 개선됨을 전류제어에 의한 발생 소음을 통하여 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 SRM의 토크 리플의 제거와 가변 속도 제어를 위한 단순한 스윗칭 기법을 제시하였으며, 또한 제시된 제어 기법을 위한 SRM의 최적 설계조건을 보였다.

시뮬레이션과 실험을 통하여 제시된 스윗칭 기법이 효율적임을 보였다.

토크 리플의 감소를 갖는 상태에서 고속도 운전의 문제점이 있음을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었으며, 또한 실험을 통하여 고속에서 스윗칭 소자의 고속 스윗칭이 가능하여야 더욱 효율적임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] T.J.Miller, Bruchless Permanent-magnet and Reluctance Motor Drives, CLERENDON PRESS, OXFORD, 1989.
- [2] W.D.Harris, "Practical Indirect Position Sensing for a Variable Reluctance Motor", Master of Science in Electrical Engineering at the Massachusetts of Technology, 1987.
- [3] B.K.Bose, T.J.Miller, P.M.Seczesny and W.H.Bichnell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industrial Application, Vol 1A-22, No.4, July/August 1986.
- [4] P.J.Lawrenson, et. al., "Variable-Speed Switched Reluctance Motor", IEEE Proc., Vol.127, Part B, No.4, July 1980, pp. 253-256.

- [5] M.Ehsani, I.Husain, K.R.Ramani, S.Mahajan, "Senser Elimination in SRM : an overview and stator of the art", Proc. of ISPE '92, pp.378-386.
- [6] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives : Theory, Practice and Applications", An invited paper for publication in the first issue of MOTIONTECHNICS, September, 1989.
- [7] R.S.Wallace, D.G.Taylor, "A Balanced Commutator for Switched Reluctance Motor to Reduced Torque Ripple", IEEE Trans. on Power Electric, Vol.7, No.4, Oct.1992, pp.617-626.
- [8] D.O'Kelly, Performance and Control of Electrical Machines, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1991.
- [9] G.S.Buja, R.Memis and M.I.Valla, "Variable Structure Control of an SRM Drive", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.40, No.1, FEB 1993.

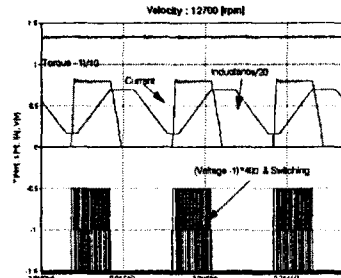


그림 9 제시된 제어 기법을 이용한 경우의 SRM의 구동 결과(전류=0.8[A])

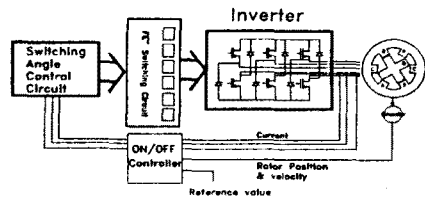


그림 12 SRM 제어 시스템 블럭도

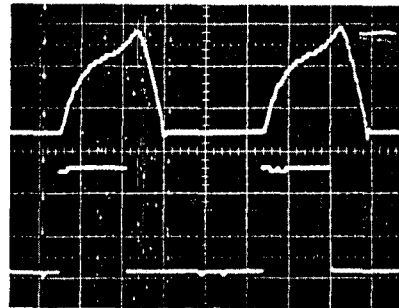


그림 11 단순한 스윗칭의 경우 전류 및 상 여자 파형 (1칸=1[A], 3000[rpm])

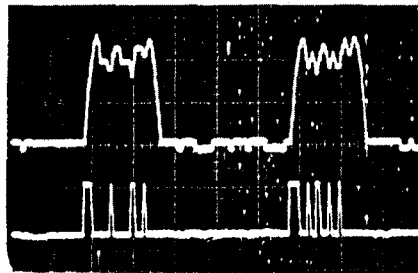


그림 12 제어하였을 경우 전류 및 상 여자 파형 (1칸=0.5[A], 3000[rpm])