

최소자승법을 이용한 Switched Reluctance Motor의 최대 평균토크 제어

(Maximization average torque control of Switched Reluctance Motor using
least square method)

김춘삼* · 정연석

(Choon - Sam Kim · Yeon - Suk Jeong)

요 약

SRM 토크는 인덕턴스 프로파일과 전류에 의해 발생한다. 발생한 SRM 토크는 전류제어시 turn-off 각을 제어함으로써 최대화 할 수 있고, 본논문에서는 최소자승법을 이용하여 구한 함수를 통해 Turn-off 각을 제어할 수 있는 방안을 제안하였다. 시뮬레이션은 3상 6/4극 SRM을 대상으로 하였고, 제안한 방법에 의해 최대 평균토크가 됨을 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

Abstract

RM(Switched Reluctance Motor)'s Torque is generated by phase-current and inductance profile. A new analytical concept is proposed to determine the turn-off angle for maximization of the torque output. This paper describes a new method to maximization the average torque of a current control Switched Reluctance Motor. It is based on the simplified turn-off angle equation using least square method.

Simulations carried out on a three-phase 6/4 pole SRM justify the algorithm is described. The suggested maximization average torque is verified by simulation in this paper.

Key Words : SRM, Turn-off angle, Turn-on angle

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 고정자에 감

겨진 권선에 전원을 인가함으로써 회전자를 구동하는 전동기이다. 고정자 각상에 +/-의 권선이 감겨있는 반면, 회전자에는 권선이 없는 철심으로 되어있기 때문에 제조 단가를 낮출 수 있고 제어에 따라 효율을 높일(90[%]이상) 수 있지만, 고정자와 회전자 위치에 따라 변하는 인덕턴스 프로파일에 따라 제어를 하여야 한다. 한 상의 인덕턴스 프로파일이 상승할 때 스위치를 Turn-on, Turn-off하면 토크가 발생하는데

* 주저자 : 삼척대학교 컴퓨터응용제어공학과 부교수

Tel : 033-570-6381, Fax : 033-570-6389

E-mail : Jae6090@samchok.ac.kr

접수일자 : 2002년 7월 8일

1차심사 : 2002년 7월 12일

심사완료 : 2002년 8월 7일

Turn-off시 토크는 비선형이므로 다음 상에 발생하는 토크와 중첩하여 부토크가 발생하게 된다. 이로 인해 평균토크를 최대화할 수 없게된다. SRM의 평균토크를 최대로 하기 위해 전압, 전류제어시 Turn-off angle을 제어하게 된다[1]. 본 논문에서는 전류제어시 평균토크가 최대인 Turn-off angle을 각 전류별(1~3[A])로 모의시험(Psim)을 통해 구하여, 3상(6/4) SRM 전류제어 범위가 1~3[A]인 경우 최적의 Turn-off angle을 구할 수 있는 함수를 최소자승법으로 구하였다. 그리고 최소자승법으로 구한 2차 함수를 이용하여 전류제어 범위가 1~3[A]인 경우 최적의 Turn-off angle을 구함으로써, SRM의 최대 평균토크를 쉽게 발생시킬 수 있음을 모의시험(Psim)을 통해 비교하였다.

2. SRM 일반

그림 1은 SRM 전류제어시 전류, 파워스위치 그리고 토크 파형을 나타낸 것이다. 그림 1에 나타낸 Turn-on angle은 회전자와 고정자가 정렬되었을 때이고, 이때의 회전자 위치는 30°이다. Turn-off angle은 회전자와 고정자가 정렬되지 않았을 때이고, 이때의 회전자 위치는 0°이다. 회전자 위치에 대한 Turn-on, Turn-off angle의 범위를 식(1)에 나타내었다. 그리고 전류제어용 초평 신호는 SRM 전류가 기준신호에 도달하도록 하는 스위칭 신호가 된다.

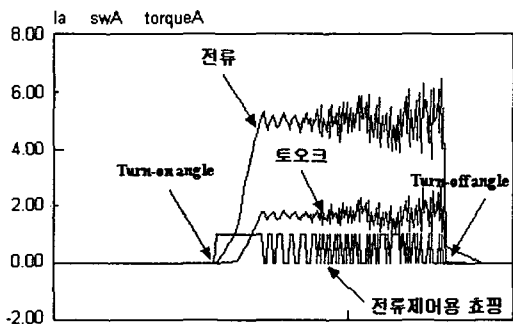


그림 1. SRM 전류제어시 한상의 전류, 스위칭 그리고 토크파형
Fig. 1. Current, switching and torque waveform of SRM current control

Turn-on Angle $\geq -30^\circ$ (정렬되지 않았을 때)

Turn-off Angle $\leq 0^\circ$ (정렬되었을 때) (1)

본 논문에서는 Turn-off angle만 변화시킴(Turn-on angle 고정)으로써 최대 평균토크를 발생하는 최적의 Turn-off angle 값을, 최소자승법을 통해 함수화하여 쉽게 최대 평균토크가 발생하도록 전류제어하였다.

3. 최대 평균토크

그림 2는 SRM 전류제어시 최대 평균토크를 발생시키기 위한 제어 흐름도이다. 3상(6/4극) SRM의 전류지령치는 범위는 1[A]~3[A]이고 2차 함수로 피드백 되는 전류가 0[A]보다 작거나 3[A]보다 클 경우 Turn-off angle을 제한하였다.

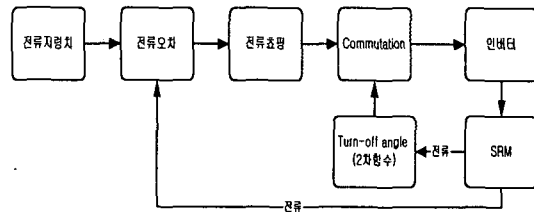


그림 2. 최대 평균토크를 발생시키기 위한 제어 흐름도
Fig. 2. Flow chart for Maximization average torque

4. Turn-off angle을 최적화하기 위한 2차함수

전류제어 범위가 1[A]~3[A]일 때 평균토크가 최대가 되는 최적의 Turn-off angle을 구하기 위한 함수를 최소자승법을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

최적의 Turn-off angle 함수의 차수가 M 개이고 계수가 $M+1$ 개인 다항식을 구해보도록 한다.

차수가 M 인 다항식을 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_j(x) = \sum c_j x^{j-1}, (j=1, j=M+1) \quad (2)$$

식(2)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = c_1 + c_2x + c_x^2 + c_{M+1}x^M \quad (3)$$

식(3)에서 다항식의 차수가 2차라면 식(3)을 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = f(x) = Ax^2 + Bx + C \quad (4)$$

함수 $f(x) = Ax^2 + Bx + C$ 와 모의시험 수치 y 에 대한 오차값을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = Ax^2 + Bx + C - y \quad (5)$$

식(5)에서 오차값이 '0'

($E = Ax^2 + Bx + C - y$) 이라면 구한 함수값이 Turn-off angle과 일치함을 뜻하는 것이 된다. 따라서 함수를 구하기 위해 먼저 식(5)의 양변에 제곱을 한다.

$$E(A, B, C) = \sum_{k=1}^N (Ax^2 + Bx + C - y_k)^2 \quad (6)$$

계수 A, B, C는 식(6)을 각각의 계수에 대해 편미분 ($\frac{\partial E}{\partial A}, \frac{\partial E}{\partial B}, \frac{\partial E}{\partial C}$)하여 구한 다항식을 통해 구할 수 있다. 다항식은 식(7), 식(8) 그리고 식(9)와 같다.

$$0 = \frac{\partial E(A, B, C)}{\partial A} = 2 \sum_{k=1}^N (Ax^2 + Bx + C - y_k)(x_k^2) \quad (7)$$

$$0 = \frac{\partial E(A, B, C)}{\partial B} = 2 \sum_{k=1}^N (Ax^2 + Bx + C - y_k)(x_k) \quad (8)$$

$$0 = \frac{\partial E(A, B, C)}{\partial C} = 2 \sum_{k=1}^N (Ax^2 + Bx + C - y_k)(1) \quad (9)$$

식(7), 식(8) 그리고 식(9)로 부터 계수 A, B, C를

구하기 위해 필요한 값은 $x_k, x_k^2, x_k^3, x_k^4, y_k, x_k y_k, x_k^2 y_k$ 이고 여기에서 x_k 는 전류이고 y_k 는 Turn-off angle이다. 계수 A, B, C를 구하기 위해 먼저 SRM이 1[A], 2[A], 3[A]에서 전류제어가 될 경우 Turn-off angle 변화에 따른 평균토크의 변화를 모의 시험을 통해 구하였고 그것을 표 1에 나타내었다.

표 1. Turn-off angle에 따른 평균토크
Table 1. Average torque at Turn-off angle

Turn-off angle / 전류	1[A]	2[A]	3[A]
0° (Nm)	0.08831	0.28212	0.43926
-0.5° (Nm)	0.08866	0.28543	0.44179
-1° (Nm)	0.08902	0.27922	0.44431
-2° (Nm)	0.09318	0.27822	0.45043
-3° (Nm)	0.09767	0.2748	0.45998
-4° (Nm)	0.09774	0.26548	0.46694
-5° (Nm)	0.09987	0.25994	0.46278
-6° (Nm)	0.09438	0.25181	0.46049
-7° (Nm)	0.09183	0.2419	0.45424
-8° (Nm)	0.08998	0.23145	0.43601

그림 3은 표 1을 그래프로 나타낸 것이고 표 1과 그림 3을 통해 알 수 있는 것은 다음과 같다. 전류제어가 1[A]인 경우 최대 평균토크의 Turn-off angle은 -5° 이고 2[A]인 경우 -0.5° 그리고 3[A]인 경우는 -4° 이다.

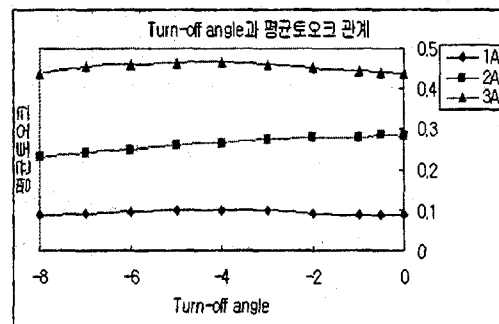


그림 3. Turn-off angle과 평균토크 관계
Fig. 3. Relation between Turn-off angle and Average torque

최소자승법을 이용한 Switched Reluctance Motor의 최대 평균토크 제어

표 2는 각각의 전류인 1[A], 2[A] 그리고 3[A]로 전류제어 할 경우 최대 평균토크가 발생하는 Turn-off angle을 나타내었다.

$$36A + 14B + 6 = 18 \quad (11)$$

$$14A + 6B + 3C = 9.5 \quad (12)$$

표 2. 각각의 전류에서 최대 평균토크의 턴오프 각
Table 2. Turn-off 각angle of average torque at each current

x_k (전류)	y_k (Turn-off angle)
1[A]	-5°
2[A]	-0.5°
3[A]	-4°

표 2의 값을 식(7), 식(8) 그리고 식(9)의 계수를 구하도록 한다. 계수 A, B, C를 구하기 위해서 $x_k, x_k^2, x_k^3, x_k^4, y_k, x_k y_k$, 그리고 $x_k^2 y_k$ 값들이 필요하므로 각각의 값들은 표 3과 같다

식(10), 식(11), 식(12)으로부터 계수 A, B, C를 구할 수 있고 최적의 Turn-off angle을 구할 수 있는 2차함수는 식(13)과 같다.

$$f(x) = 4x^2 - 16.5x + 17.5 \quad (13)$$

식(13)은 전류값에 대한 Turn-off angle 값을(양수)음수를 취하여 적용하여야 한다. SRM 전류제어시 기준전류 변화 범위를 1[A] ~ 3[A]이고 모의시험 시간은 0 ~ 50[ms]로 하였다.

표 3. 계수를 구하기 위한 편미분 값
Table 3. Partial differential value for coefficient

x_k (전류)	1[A]	2[A]	3[A]	합
y_k (Turn-off angle)	-5	-0.50	-4	
x_k	1	2	3	6
x_k^2	1	4	9	14
x_k^3	1	8	27	36
x_k^4	1	16	81	98
y_k	5	0.5	4	9.5
$x_k y_k$	5	1	12	18
$x_k^2 y_k$	5	2	36	43

표 3에 나타난 것과 같이 계수를 구하기 위해 필요한 값들, 즉 $x_k, x_k^2, x_k^3, x_k^4, y_k, x_k y_k$ 그리고 $x_k^2 y_k$ 각각의 합을 식(7), 식(8) 그리고 식(9)에 대입하면 식(10)에서 식(12)가 된다.

$$98A + 36B + 14C = 43 \quad (10)$$

표 4. 전류제어가 1[A]에서 3[A] 사이인 경우
평균토크 비교

Table 4. Comparison of average torque at each current

전류([A])	평균토크(Nm)	
	Normal(0°)	Turn-off angle
1→2→3	0.385341	0.419869
3→2→1	0.262058	0.28878
3→1→2	0.262058	0.28878
1→3→2	0.309441	0.339548

표 4는 전류제어 변화 경우를 네가지로 하였을 때 각각의 평균토크를 비교하였다. 첫번째인 1→2→3은 시간이 0~19ms에서 1[A], 20[ms]~29[ms]에서 2[A] 그리고 30[ms]~50[ms]에서 3[A]로 SRM을 전류제어 하였을 경우 Normal(Turn-off angle : 0°)인 경우와 식(13)을 이용하여 최대 평균토크가 발생하게끔 Turn-off angle을 조절하였을 때와 비교한 경우이다. 두번째인 3→2→1은 시간이 0~19[ms]에서 3[A], 20[ms]~29[ms]에서 2[A] 그리고 30[ms]~50[ms]에서 1[A]로 SRM을 전류제어 하였을 경우이다. 세번째인 3→1→2는 시간이 0~19[ms]에서 3[A], 20[ms]~29[ms]에서 1[A] 그리고 30[ms]~50[ms]에서 2[A]로 SRM을 전류제어 하였을 경우이고 마지막인 1→3→2

는 시간이 0~19[ms]에서 1[A], 20[ms]~29[ms]에서 3[A] 그리고 30[ms]~50[ms]에서 2[A]로 SRM을 전류제어 하였을 경우이다. 전류의 크기가 0[A]보다 작을 경우 식(13)의 x 값을 '0'으로 하였을 때 값을 Turn-off angle로 하였고, 3[A]보다 클 경우 식(13)의 x 값을 '3'으로 하였을 때 값을 Turn-off angle로 하였다.

$$\text{Turn off angle} : f(0) = 4 \times 0^2 - 16.5 \times 0 + 17.5$$

(전류 < 0 경우)

$$\text{Turn off angle} : f(3) = 4 \times 3^2 - 16.5 \times 3 + 17.5$$

(전류 > 3 경우) (14)

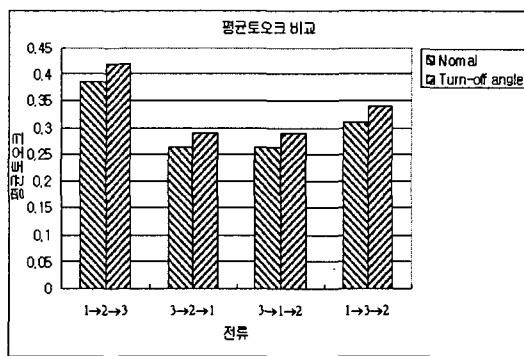


그림 4. 전류제어가 1[A]에서 3[A] 사이인 경우 평균토크 비교

Fig. 4. Comparison of average torque at each current

그림 4는 표 4를 그래프로 나타낸 것이며 그림 4를 통하여 알 수 있듯이 3상 SRM을 1[A]에서 3[A] 사이에서 가변하여 전류제어 할 때, Turn-off angle을 변화시킴으로써 평균토크를 최대로 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상(6/4극) SRM을 전류제어함에

있어서 평균토크를 최대화 하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 최소자승법을 통한 최적의 Turn-off angle을 정하는 2차함수를 구하였다. 최대 평균토크를 발생시키기 위해 2차함수를 적용 하기 위한 전류변화 범위가 1[A]에서 3[A] 사이인 경우를 채택하여 최대 평균토크가 발생됨을 시뮬레이션을 통하여 확인 할 수 있었다.

References

- (1) J.J.Gribble, P.C.Kjaer and T.J.E.Miller, "Optimal commutation in average torque control of switched reluctance motors." IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 1, January 1999.
- (2) John H.Mathews and Kurtis D.Fink. "Numerical Methods Using Matlab", Prentice-Hall, Inc., Third Edition, 1999, pp. 252-309.
- (3) H.C. Lovatt, PhD, and J.M. Stephenson, PhD, "Computer-optimized current waveforms for switched reluctance motor." IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 141, No. 2, March 1994.
- (4) John H.Mathews, Kurtis D.Fink. "Numerical Methods Using Matlab", Prentice-Hall, Inc., Third Edition, 1999, pp. 252-309.
- (5) T. J. E Miller, Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor drives, Clarendon Press 1989.
- (6) G. S. Buja and M. I. Valla, "control characteristics of the SRM drives-part I : operation in the linear region", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 38, pp. 313-321, Oct. 1991.
- (7) Husain, I., Sodhi, S. and Ehsani, M, Sliding mode observer based control for switched reluctance motors. IEEE-IAS Conf. Rec., 1994, pp. 635-643.
- (8) Lumsdaine, A. and Lang, J.H., State observers for variable-reluctance motors. IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. IE-37(1990), No. 2, pp. 133-142.

◇ 저자소개 ◇

김 춘 삼 (金春杉)

1960년 11월 12일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1988년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 삼척대학교 컴퓨터 응용제어공학과 부교수.

정 연 석 (鄭然奭)

1972년 7월 1일생. 1998년 삼척대학교 제어계측공학과 졸업, 2001년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)세빛.