

SRM의 최대 토크, 효율 및 최소 토크리플 운전을 위한 스위칭 각

김현덕, 차현록, 김광현, 나석환, 임영철

전남대학교 전기공학과

Switching Angle for Maximizing Torque, Efficiency and Minimizing Torque Ripple in SRM Drive

Hyun-Dug Kim, Hyun-Lok Cha, Kwang-Heon Kim, Sock-Hwan Na, Young-Chol Lim

Chonnam National Univ. Electric Engineering

Abstract

This paper presents a driving method of 3-phase 4-poles SRM(switched reluctance motor) driven by switching angle control. In this study, the switching angle is determined from approximated analysis and computer simulation by using MATLAB[®] for high efficiency according to the speed and torque required by load, and then microcontroller controls the switching angle of asymmetrical inverter in SRM driver

Also, we experiment the maximum torque driving and maximum power driving by controlling switching angle available to electric vehicle.

1. 서론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 1980년대 초에 그 실용성이 입증되어 그 이후로 본격적인 연구가 활발하게 이루어지고 있다. SRM은 일반적인 전동기에 비하여 구조가 간단하여 가격이 저렴하고, 토크밀도, 효율이 높고, 인버터에 흐르는 전류의 극성과 상관없이 인버터가 간단하고 다양하게 시스템을 구성할 수 있다.

위와 같은 특성들로 인해 SRM은 현재 산업용뿐만 아니라 가정용으로 적용이 고려되고 있다. 본 논문에서는 비선형적인 인덕턴스 프로파일에 기초를 둔 적정 스위칭각의 조정특성 및 적정 전압원 여자 특성 그리고 전류, 토크를 해석함으로써 최대 효율각, 토크각, 최소 리플각을 구하기 위해 MATLAB[®]의 SIMULINK를 이용하여 SRM 모델링을 하였다. 실제 모터에 근사화 하기 위해 FLUX 2D를 이용하여 자속의 포화를 고려한 인덕턴스 프로파일을 계산하였다

[1~2]. 시뮬레이션을 통해 구해진 적정 스위칭 각은 SRM을 동력원으로 사용하는 응용 분야의 특성에 맞게 모터를 구동하면 된다. 즉, EV나 HEV에 적용할 때는 효율을 최대로 하도록 스위칭 각을 조정하고 가정용으로 적용할 때는 토크리플이 최소가 되도록 스위칭 각을 조정하고, 견인용으로 사용할 때는 토크가 최대가 되도록 스위칭 각을 조정할 수가 있다[3]. 모델링한 결과를 검증하기 위한 구동 시스템은 C167 원칩 마이크로프로세서를 사용하였다.

2. 스위칭 각 제어

2. 1. Advance 각도 제어

인덕턴스가 최소인 구간에서 턴 온하여 부하에 필요한 전류를 확립한다. [4]에 의하면 인덕턴스 값은 최소인 L_{\min} 으로 일정하므로 $dL/d\theta=0$ 이고 저항 r 은 작아서 무시할 수 있다. 그러므로, 이 구간에서 전압 방정식은

$$\theta_{AD} = \frac{\omega L_{\min}}{E} I \quad (2-1)$$

으로 된다. 즉, 확립되는 전류값은 전압과 속도가 일정할 때 θ_{AD} 의 크기에 의하여 결정된다. 그러나 실제 인덕턴스 프로파일에서는 포화가 존재하기 때문에 인덕턴스 변화분을 고려해야 한다.

2. 2. 턴 오프각 결정방식

SRM 컨버터에서 입력전압을 고정시킬 경우 전동기 토크는 상 스위치의 턴 온/오프각으로 제어하게 된다. 일반적으로 턴 온각 또는 턴 오프각을 결정하는 방식은 Dwell각 제어 방식과 토크각 일정 제어 방식 두 가지로 나눌 수 있다.

일정 Dwell각 제어 방식은 가변 속도 또는 부하

변동에 대해 θ_{dw} 를 일정하게 유지하면서 턴 온각을 조정한다. 속도를 증가시키거나 부하가 증가되더라도 일정 속도로 유지하기 위해 턴 온각을 앞으로 이동할 경우 역토크의 영향은 크지 않다. 그러나, 정격 출력의 한계가 크므로 과부하시 불안정하게 구동된다.

토크각 일정제어 방식은 턴 오프각을 고정하는 방식으로서 가변 속도 또는 부하 변동에 대해 턴 오프각을 고정시키고 턴 온각을 조정한다. 정격 출력까지는 효율의 변동이 적으나 전동기 토크를 증가시키기 위해 턴 온각을 크게 앞으로 이동할 경우 인덕턴스 감소 지역에서도 전류가 흐르게 되어 역토크가 발생하며, 이에 따라 효율이 감소하게 된다.

따라서 턴 온각의 위치와 상전류에 대해 고정 Dwell 각 제어 방식 또는 고정 턴 오프각 방식에 의해 결정되는 턴 오프각이 아닌, 적절한 지점에서 턴 오프해야 할 필요가 있다. 왜냐하면 부하변동으로 턴 온각이 변할 때 턴 오프각을 초기값의 설정으로 고정으로, 최대 토크를 유지하기가 어렵기 때문이다.

반면에 턴온을 고정시켜놓고 턴 오프각을 가변할 경우에는 턴 오프각이 인덕턴스 프로파일의 최대치 부근일 때, 전류는 인덕턴스 감소영역에서도 흐르게 되므로 큰 부토크가 발생하며 이로 인하여 총 토크는 감소한다. 최대 토크가 나타나는 턴 오프각을 지나 더욱 θ_{dw} 를 줄일 경우 총 토크가 줄어드는 현상이 발생한다. 이러한 영역에서는 토크 리플이 발생하고 효율이 급격히 감소하는 불안정 운전영역으로서 과부하에 대해 한계가 나타난다. 턴 온각이 다를 경우 최대 토크가 나타나는 턴 오프각은 일정한 Dwell각도를 유지하지는 않는다. 따라서 최대 토크를 발생시키기 위해서는 턴 온각과 턴 오프각을 모두 부하에 따라 변화시켜 주어야 한다. 이를 위해 시뮬레이션을 통하여 그 값을 도출해 내고 그 값을 ROM 테이블에 입력하여 부하 변동시 신속하게 스위칭 각을 변화시켜 최대 효율 및, 최대 토크 및 최소 토크리플이 발생하도록 모터를 구동한다.

3. SRM 모델링

3.1 SRM의 수학적 모델

SRM을 모델링하기 위해 다음 그림1과 같이 SRM의 스위칭시의 회로를 등가화 하였다. SRM의 한 상의 권선 저항 R과 자속 쇄교에 관한 전압방정식은 다음과 같다.

$$E = r \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (3-1)$$

식 3-1 우변의 두 번째 항인 자속 쇄교에 관한 미분항을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} + L(\theta, i) \frac{di}{dt} \quad (3-2)$$

전동기 속도가 일정하다고 가정하여 식 3-2의

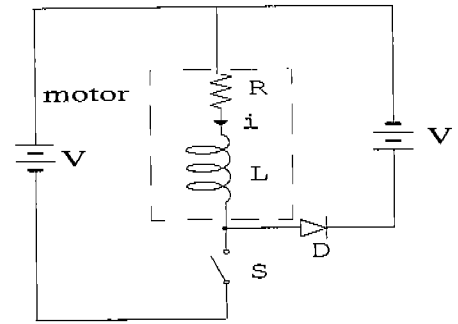


Fig. 1 Equivalent circuit of switching circuit.

$\frac{d\theta}{dt}$ 를 상수인 w 로 둘 때 식 3-2는

$$E = ri + w \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} \quad (3-3)$$

와 같이 된다.

SRM의 전기적 토크 방정식은 식 3-4와 같다.

$$T_E = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta - 30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta - 60^\circ)}{d\theta} \quad (3-4)$$

모터의 기계적 토크 방정식은 식 3-5와 같다.

$$T_M = \frac{dw(t)}{dt} J_m + B_m w_m(t) + T_L \quad (3-5)$$

J_m : 전동기 관성 모멘트, B_m : 전동기 점성 마찰계수, T_L : 부하토크

위의 관계식을 이용하여 SIMULINK을 통하여 6/4 SRM을 모델링하였다.

회전자의 위치에 따라 FEM을 통해서 구한 인덕턴스 프로파일의 값을 참조하여 전류 파형을 계산한다.

3-2. 인덕턴스 프로파일

SRM의 비선형적인 특성을 고려하기 위해 제작된 SRM 설계도를 통해 FLUX2D를 이용하여 FEM 해석을 행하였다. 이 값을 이용해 특업 테이블을 만들어 정확한 시뮬레이션이 되도록 전류와 회전자 위치에 맞는 인덕턴스 값을 참조하도록 하였다. 그림 2는 FEM을 통한 인덕턴스 프로파일이다. 전류가 작을수록 자속의 포화가 덜 일어나고, 인덕턴스가 최소인

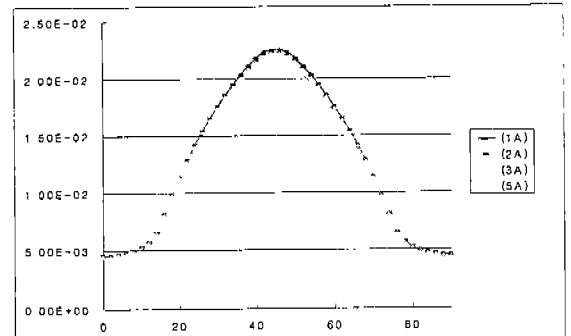


Fig. 2 Inductance profile obtained by FEM.

구간에서는 전류 값에 따른 포화의 영향이 거의 없고 인덕턴스가 커질수록 포화의 영향이 더 심해진다[5].
 사용한 모터의 인덕턴스는 중첩되는 구간이 짧고 인덕턴스 최소구간이 길어서 각도 제어시 턴 온 구간의 제어 범위가 넓다.

3. 3. 시뮬레이션 및 결과 검토

모델링한 결과를 가지고 스위칭 각 및 입력 전압에 따른 토크 발생을 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 부하가 주어지고, 속도가 일정할 때 부하 토크에 따른 최소 입력전압을 나타낸 그래프이다. 속도가 결정되어지면 입력되는 전압에 따라 토크의 크기는 변화하나 최대 토크를 발생하는 턴 온각과 턴 오프각은 변하지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 부하 토크의 크기에 따라 입력되는 전압의 크기 즉, 같은 토크를 발생하는 최소의 전압을 인가함으로써 최대 효율을 얻을 수가 있다. 그림 4는 속도 변화시 최대 토크를 발생하는 턴 온/오프 각을 나타낸 그래프이다. 그림 5는 모터의 효율 곡선이다. SRM은 스위칭 각에 따라 효율의 변화가 심하다. (-15°, 23°)로 운전시 가장 효율이 높다. 최대 토크 발생 포인트와 비교했을 때 부토크가 거의 발생되지 않는 포인트이다. 따라서 효율이 높은 운전 포인트와 발생 토크가 큰 포인트는 차이가 있다.

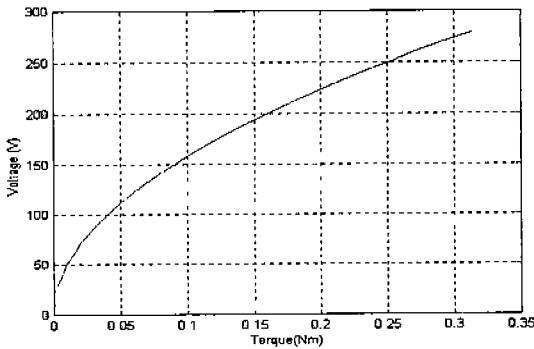


Fig. 3 Input voltage according to torque at 30000rpm.

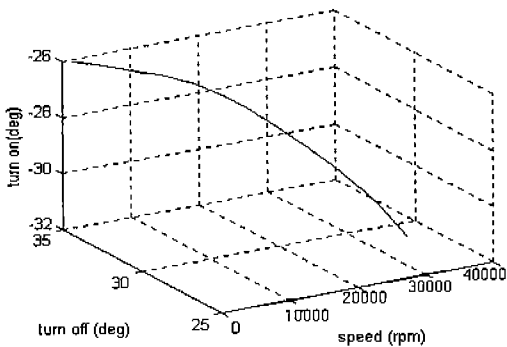


Fig. 4 Switching angle according to speed.

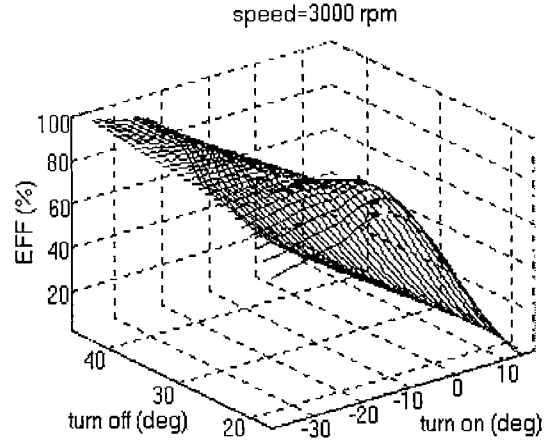


Fig. 5 Efficiency according to switching angle

따라서, 전기자동차에서 SRM을 동력원으로 사용할 경우 한정된 에너지원으로 최대 토크를 내기 위해서는 효율이 높은 스위칭 각에서 운전을 해야한다.

그림 6은 스위칭 각에 따른 토크 리플을 나타낸 곡선이다. SRM은 비선형성이 강해 다른 교류기 보다 훨씬 큰 맥동 토크를 포함하고 있다[6]. 그림에서 보는 바와 같이 턴 온각 6°, 턴 오프각 31°로 스위칭을 할 때 최소 리플이 발생된다.

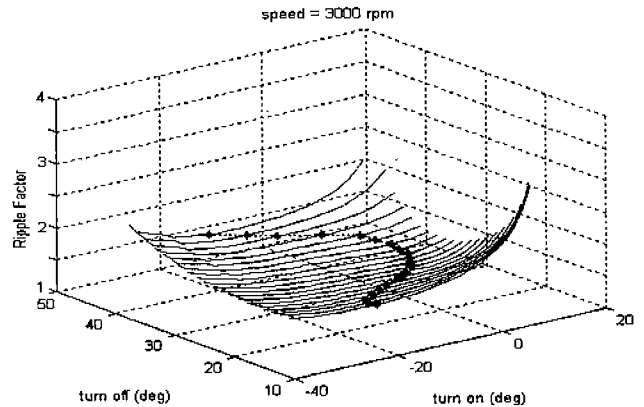


Fig. 6 Torque ripple according to switching angle.

4. 시스템 구성

4. 1 시스템의 구성

최적의 스위칭 각도를 행하기 위해 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터를 가지고 모터를 구동하기 위해 그림 7처럼 하드웨어를 구성하였다.

부하토크를 검출하기 위해 모터에 입력되는 전류를 검출하고, 회전자의 위치를 판별하기 위한 엔코더로부터 위치 신호를 받아서 이를 이용해 속도를 검출하고 이 값으로 ROM의 주소를 참조한다. 실험에 사용한 전동기 정수를 표 1에 나타내었다.

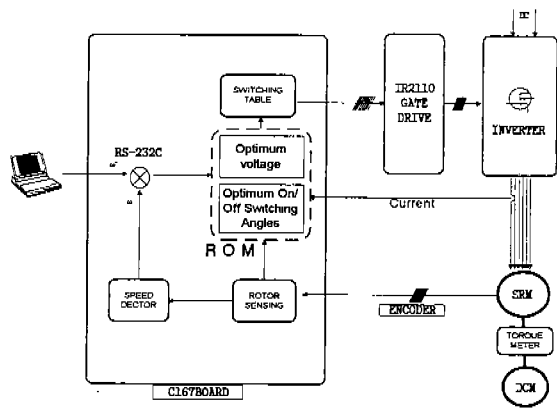


Fig. 7 Hardware configuration system.

표 1. 실험용 전동기 정수

고정자극수	6 [개]	고정자 극호각	28 [deg]
회전자극수	4 [개]	회전자 극호각	30 [deg]
전압	280 [V]	최대인덕턴스	25.6 [mH]
전류	5 [A]	최소인덕턴스	3.4 [mH]
출력	400 [W]	최대속도	35000 [rpm]

4. 2. 실험결과

그림 8은 1500rpm으로 회전했을 때 실제 계측한 전압, 전류 파형이다. 시뮬레이션 결과와 실제 전류 파형은 비슷함을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과에서는 스위칭 손실 등은 고려되지 않았고 이상적인 구조의 모터로 가정되었기 때문에 실제 전류 파형처럼 전류 소호가 빨리 되지 않는 것을 볼 수 있다.

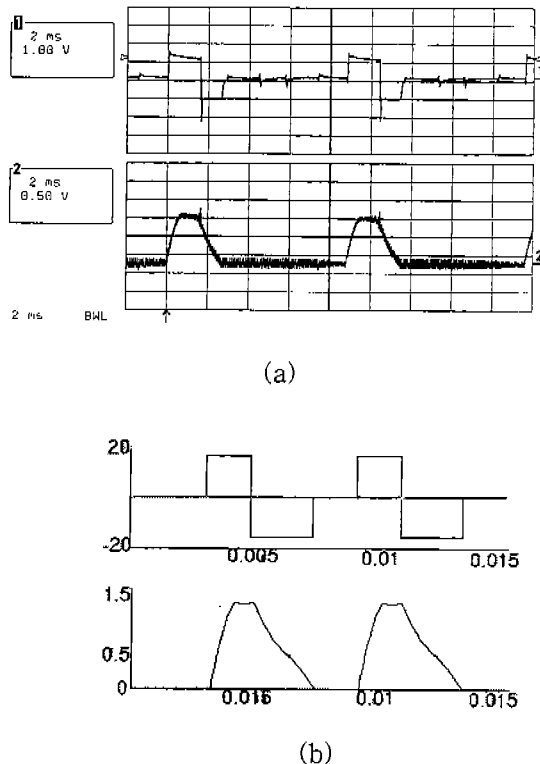


Fig. 8 Waveform of voltage and current at 1500: (a) measured, (b) calculated.

5. 결론

SRM의 상전류의 형상은 일반적인 교류기보다 효율에 미치는 영향이 크다. 상전류의 형상은 회전속도, 인가전압, 인덕턴스의 기울기 및 스위칭 각도 등의 운전조건에 따라서 다양하게 변한다.

본 논문에서는 최대 토크, 최대 효율, 최소 리플을 출력하는 스위칭 각을 검출하기 위해 SRM을 모델링하였고 이 값을 가지고 SRM을 구동하여 시뮬레이션에서 구한 값의 효용성을 보였다. 응용분야에 맞게 스위칭 패턴을 변화시키므로써 효율이 높게 모터를 구동할 수가 있다.

기존의 적정한 제어각도를 찾기 위해 실험적인 해석 결과로부터 스위칭 각을 찾는 것보다는 이런 시뮬레이션을 통한 초기 값을 검출하므로써 원하는 목표점에 더 빠른 응답을 가질 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 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, pp. 313-321, oct. 1991.
- [2] G.S.Buja and M.I.Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives-Part II: Operation in the Saturated Region." IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 41, no. 3, pp. 316-325, June. 1991.
- [3] R. Orthmann, A.Krautstrunk, H.P.Schoner, "Overload Protection and Maximum Power Operating Point Control of Switched Reluctance Motor Drives" EPE'97, pp. 3.602-3.607
- [4] 황영문, 공관식, "SRM의 고효율구동을 위한 가변 스위칭각도 조정방식에 관한 연구" 전기학회 논문지 vol. 44, no. 1, pp. 25-33, 1995. 1.
- [5] M.Moallem, C.M.Ong and L.E.Unnewehr. "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched-Reluctance Motor." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no. 2, pp. 364-369, March/April 1992
- [6] K.Russa, I.Husain, M.Elbuluk, " Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range" IEEE IAS pp.668-671, October 5-9, 1997