

SRM의 자기동조 방식에 의한 최대토크의 턴-온/오프각 제어

서종윤*, 차현록**, 서정철*, 양형열*, 김광현*, 임영철*, 장도현***
 *전남대학교 전기공학과, ** (주)삼성광주전자, ***호서대학교 전기공학과

Turn-on/off Angle for Maximum Torque of SRM by Using Self-tuning Control

Jong-Yun Seo*, Hyun-Rok Cha**, Jung-Chul Seo*, Hyong-Yeol Yang*,
 Kwang-Heon Kim*, Young-Cheol Lim*, Do-Hyun Jang***

*Dept. of Electrical Engineering and RRC/HECS, Chonnam National University

**Samsung Gwangju Electronics

***Dept. of Electrical Engineering Hoseo University

ABSTRACT

The control of the SRM(Switched Reluctance Motor) is usually based on the non-linear inductance profiles with positions. So determination of optimal switching angle is very different. This paper proposed that the determination method of turn-on/off angle in the SRM drives is to maintain the high torque, which is realized by using self-tuning control method. During the sampling time, a number of pulses from the encoder are checked by using micro-controller. And compared with pre-checked a number of pulses. After calculating difference between two data, turn-on/off angle moves forward or backward direction by using self-tuning method. The optimal turn-on/off angle is determined by iterating such a process and the maximum torque is maintained. Experimental results are provided to demonstrate the validity of the self-tuning controller.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 눈부신 발전으로 고성능 스위칭 소자의 개발과 전기·전자회로분야의 발전으로 과거 이상적인 제어방법들이 현실화되어졌다. 이에 따라 전동기 부분에서도 고성능 및 고효율 운전이 가능하게 됨으로써 기존의 BLDC나 인버터 구동 유도 전동기보다 구조 및 효율 그리고 단위 체적 당 토크와 인버터 용량 등에서 뛰어난 특성을 보이는 SRM이 다양한 분야에서 관심을 가지게 되었다. 그러나 기존의 SRM의 인덕턴스의 포화

전류와 위치에 따른 인덕턴스의 비 선형성 때문에 제어에 큰 어려움을 가지고 있었다.^{[3][6]} 또한 이런 구조적 특징 때문에 진동과 큰 소음을 발생하는 단점을 지니고 있다. 따라서 전동기 철심에서 자기포화 현상이 발생하므로 이를 감안하여 턴-온/오프각을 제어하여야 한다.

본 논문에서는 위상각 제어에서 최대 토크를 유지하기 위해서 적절한 턴-온/오프각(optimal turn-on/off)을 자기동조방식(self-tuning method)에 의해 결정하는 방식을 제안하였다. 먼저 적절한 턴 오프각을 추종하고 다시 턴 온각을 어드밴스 시켜가면서 최적의 오프각을 결정해 최대의 토크 값을 유지하기 위한 턴-온/오프각을 마이크로 컨트롤러에서 실시간으로 제어하였으며, 실험을 통해 제안된 방식이 타당함을 확인하였다.

2. SRM의 수학적 모델링

SRM의 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

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

여기서,

V : DC 링크 전압
 λ : 쇄교 자속
 r : 상의 권선 저항
 i : 상 전류

식 (1)의 두 번째 항인 쇄교 자속에 관한 미분항을 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서, $L(\theta, i)$: 자기 인덕턴스
전동기 속도가 일정하다고 가정하여 식 (2)의 $\frac{d\theta}{dt}$ 을 상수인 ω 로 둘 때 식 (2)은

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

와 같이 된다. 식 (3)을 전기적 순시 입력으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = r i^2 + w \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 + L(\theta) i^2 \frac{di}{dt} \quad (4)$$

식 (4)의 각 항은 저항에서 발생하는 손실과 자계에 저장된 에너지의 미분 값과 기계적 출력의 항으로 구분될 수 있다.

일반적으로 발생토크는 co-energy 개념에서 유도할 수 있다. co-energy는 자기 포화를 무시하는 경우에 식 (5)과 같다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^i L(\theta) i dt = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (5)$$

발생토크는 co-energy를 위치 각 θ 로 미분한 값으로 식 (6)과 같다.

$$T = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (6)$$

식 (5)을 식 (6)에 대입하여 계산하면 SRM의 발생토크는 식 (7)과 같다.

$$T_{out} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta - 15^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta - 30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_d^2 \frac{dL(\theta - 45^\circ)}{d\theta} \quad (7)$$

여기서, i_a, i_b, i_c, i_d : 각상의 전류

SRM의 운동방정식은 식 (8)과 같다.

$$T_m = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + T_l + T_f \quad (8)$$

여기서, J_m : 전동기 관성 모멘트

B_m : 전동기 점성 마찰계수

T_l : 부하토크

식 (8)에서 일정한 입력전원에서 부하토크가 일정하고 정상상태 운전을 한다고 생각했을 때 토크

는 식 (9)과 같이 속도에 비례하게 된다.

$$T_m \propto \omega_m(t) \quad (9)$$

결국 엔코더 펄스를 받아들여 최대 속도로 운전하고자 했을 때 최대 토크 운전을 됨을 알 수 있다.

3. Self-tuning에 의한 턴-온/오프 각 결정 방식

최대의 토크를 구하기 위해 턴-온/오프각을 종속적으로 자기동조방식(self-tuning method)에 의한 스위칭 각을 결정하는 방식을 제안하였다. 그림 1은 턴 온 각이 초기 설정 값으로 고정되었을 때 턴 오프 각 시점에 따라 나타내는 순시 토크를 보여주고 있다. 그림 1(a)은 최대토크가 발생하는 턴 오프 각보다 앞선 시점에서 턴 오프를 할 때 나타나는 순시 토크를 보여주고 있고 그림 1(b)은 인덕턴스 프로파일 최고점에서 턴 오프를 할 때 순시 토크를 보여주고 있다. 그림 1(c)은 적절한 턴 오프를 한 경우로 미소한 부 토크가 발생하나 정 토크가 크므로 총 토크 값은 크게 된다.^[1]

그림 2는 위와 같이 적절한 턴 오프 각이 결정되고 이에 턴 온 각을 어드밴스 시켜가면서 최대 토크 점을 찾아가는 모습을 보여주고 있다. 그림 2(a)는 최대토크가 발생하는 턴 온각보다 앞선 시점에서 턴 오프를 할 때 나타나는 순시 토크를 보여주고 있다. 부 토크가 발생하지 않아 효율은 좋은 반면 총 토크가 크지 않아 부하 변동에 불안하다.^[3] 그림 2(b)는 인덕턴스 프로파일 최고점에서 턴 온을 할 때 순시 토크를 보여주고 있다. 정 토크는 큰 반면 부 토크가 크게 발생하여 총 토크는 감소된다. 그림 2(c)는 적절한 턴 온 각을 찾은 경우로 미소한 부 토크가 발생하나 정 토크가 크므로 턴 오프각 제어만 할 때보다 총 토크 값은 최대가 된다.

그림 3은 초기에 턴-온/오프각이 고정되고 부하가 일정하다고 가정하였을 때 자기동조방식으로 의해 턴-온/오프각을 조정하는 서브루틴과 그 흐름도이다. 여기서 초기 설정 값 턴 온 각(θ_{on})과 턴 오프각(θ_{off})을 설정해 주고 현재의 샘플링 시간에서 구해진 펄스수인 $T(n)$ 과 바로 이전의 펄스 수를 $T(n-1)$ 라고 할 때 차이 값 $Dif(n)$ 는 식(10)과 같다.

$$Dif(n) = T(n) - T(n-1) \quad (10)$$

$Dif(n)$ 가 식 (11)과 같이 주어진 허용 한 계치 m 내

에서 존재할 때까지 one step(0.5°)씩 이동하면서 최대 토크가 형성되는 θ_{off} 가 결정한다.

$$m < Dif \parallel Dif < -m \quad (11)$$

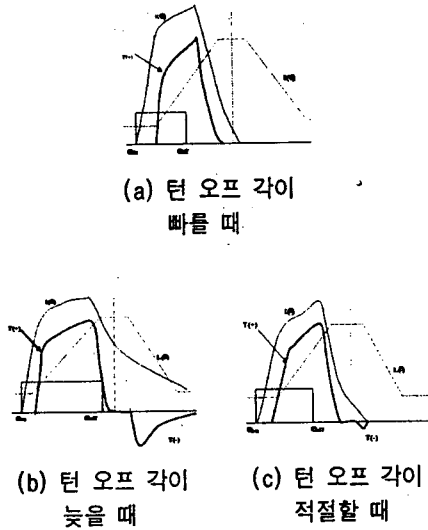


그림 1 고정 턴 온 각에 대한 가변 턴 오프 각에서 나타내는 순시 토크
Fig. 1 Instantaneous torque of SRM with the fixed turn-on angle and variable turn-off angle

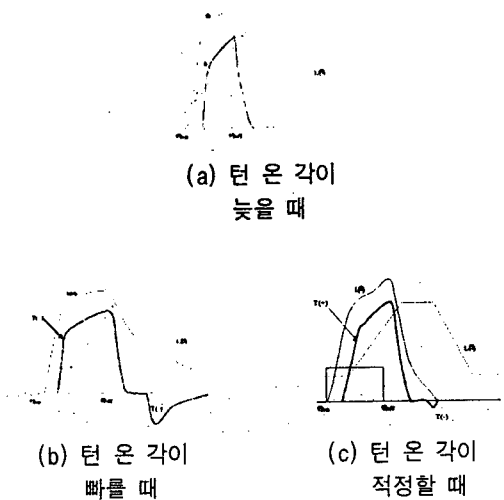


그림 2 고정 턴 오프 각에 대한 가변 턴 온 각에서 나타내는 순시 토크
Fig. 2 Instantaneous torque of SRM with the fixed turn-off angle and variable turn-on angle

θ_{off} 가 결정되고 된 후, 기동시인 과도상태부터 θ_{off} 가 결정된 정상상태에 이르기까지 최고 속도 값으로 저장된 H_{speed} 값이 θ_{on} 을 어드밴스 시켜가면서 그때마다 적절한 θ_{off} 을 찾을 때 현재 H_{speed} 값이 이전 값보다 크거나 같아 질 때까지 θ_{on} 을 이

동시키고 다시 θ_{off} 를 결정한다. 만약 θ_{on} 을 변화시킨 후 현재속도가 이전 H_{speed} 보다 떨어졌을 경우, θ_{on} 을 전 값으로 변화시킨 후 최고 속도를 유지하게 된다. 운전 중 속도가 일정할 경우 θ_{on} 과 θ_{off} 는 변화가 되지 않으나, 부하가 가해질 경우나 입력 전원에 의해 속도가 가변되어지는 경우에 자동적으로 자기동조방식에 의해 턴 오프각을 결정되어 운전하게 된다.

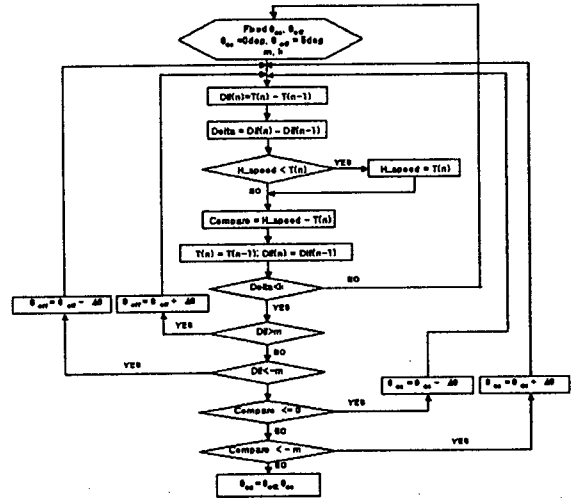


그림 3 최적 턴-온/오프각 결정을 위한 서브루틴의 흐름도

Fig. 3 Flowchart of subroutine for determination of optimal turn-on/off

SRM의 최대토크에 대한 제안된 방안을 실험하기 위해 그림 4와 같이 하드웨어를 구성하였다. 전력 컨버터는 비대칭형 브리지형(Asymmetric bridge converter)이며 대 전력용 MOSFET로 구성되어 있다. 회전자 축에는 엔코더가 부착되었고, 엔코더에서 측정된 위치각 및 속도데이터로부터 자기동조방식으로 턴-온/오프 각을 조정하였다.

4. 실험결과 및 검토

일정 부하라고 가정하고 입력전원을 고정한 뒤 SRM을 운전할 때 기존의 초기 값 θ_{on} 과 θ_{off} 로 운전하였을 때 전류 파형은 그림 5(a)와 같고 약 657[rpm]속도로 운전하였다. 그림 5(b)는 초기 값 θ_{on} 으로 고정한 뒤 θ_{off} 를 자기동조방식으로 최적의 각으로 추종한 뒤 전류 파형이다. 속도는 약 760[rpm]으로 운전하였다. 그림 5(c)는 자기동조방식으로 최적의 θ_{on} 과 θ_{off} 를 결정한 뒤 전류 파형을 보여주고 있다. 위 두 가지 모드와 같은 조건에서 실험하였을 때, 운전속도는 3100[rpm]정도로

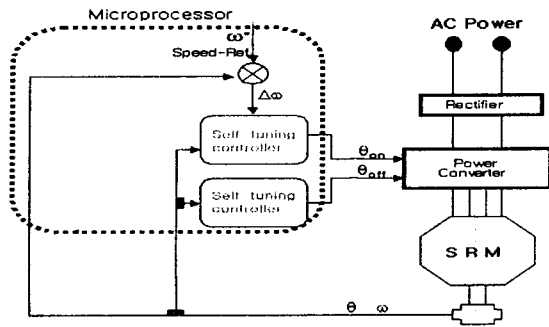
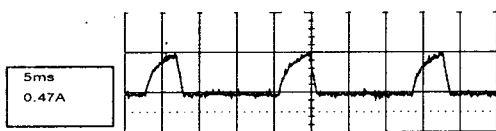
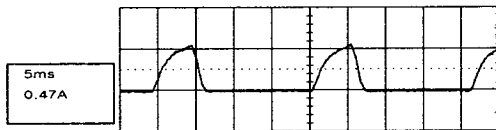


그림 4 전체 시스템 구성
Fig. 4 Configuration of experimental system



(a) The waveform of open-loop control



(b) The waveform of self-tuning turn-off angle control



(c) The waveform of self-tuning turn-on/off angle control

그림 5 SRM의 각 모드에 따른 운전 시 나타나는 전류 파형
Fig. 5 The current waveform with SRM's each driving mode

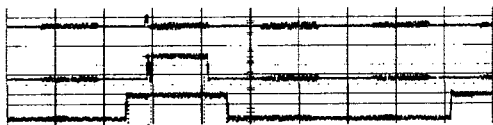


그림 6 비자기동조방식과 자기동조방식에 의한 스위칭각변화 비교
Fig. 6 The compare waveform of before the self-tuning and after the self-tuning

고속운전을 하였고 이에 따라 최대 토크운전을 하

고 있음을 알 수 있었다. 그림 6에서는 자기동조 방식과 상관없이 적절한 턴-온/오프각을 설정하여 운전하였을 경우 한 상의 게이트 파형과 자기동조 방식으로 추종된 턴-온/오프각을 보여주고 있으므로 턴-온/오프각이 변화되었음을 증명해주고 있다.

결론

SRM의 운전 시 최대 토크 및 효율 그리고 최소 리플을 유지하기 위한 턴-온/오프각은 자기포화 현상으로 적절한 각을 구하기가 어렵다. 그러나 실험으로부터 일정부하 운전 시에 고정된 턴-온/오프각으로 운전한 경우와 자기동조방식으로 턴 오프각으로 운전할 때보다 턴-온/오프각을 같이 제어할 때의 운전이 더욱 빨라짐을 알 수 있었다. 결국 모터의 운전방정식으로부터 SRM이 최대 토크운전이 됨이 증명되었다. 응용분야로는 과도상태의 응답성 때문에 제안방식은 정밀제어가 요구되는 서보 시스템 등에 적용하기보다는 제철소나 제품 생산라인 등에 적합하리라 생각된다.

앞으로 이 방식은 정상상태에서 도달한 후 부하 변동으로 인한 기준 속도가 변화할 때 퍼지 및 신경망과 같은 제어 알고리즘을 이용해 과도상태 응답성을 개선시키는 연구가 필요하다.

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 장도현, 문진영 "SRM 컨버터에서 자기동조 방식에 의한 턴 오프 각의 결정," 전력전자학회논문지 vol. 3, no. 4, Dec. 1998, pp. 418~425.
- [2] 공관식, 황영문. "SRM의 고효율 구동을 위한 가변 스위칭 각도 조정방식에 관한 연구," 대한전기학회, 44권 1호, pp. 25~33, 1995년 1월.
- [3] T.J.E Miller "Switched reluctance motors and their control," Magna physics publishing 1993
- [4] T.J.E Miller."Switched Reluctance Motors and Their Control," Oxford England, Oxford Press, 1993
- [5] P.C. Kjaer, P. Nielsen, L.Anderson, and F.Blaabjerg, "A New Energy Optimizing control strategy for Switched Reluctance Motors," IEEE trans, on Industry Applications, vol. 31, no. 5, pp. 1088~1095, September 1995.
- [6] Hyun-Rok Cha, Jong-Yun Seo., "A Study on Voltage and Switching Angle for Maximum Torque / Efficiency and Minimum Torque Ripple of SRM by using SIMULINK," J.P.E, vol. 1, no. 1, April 2001.