전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

자기동조 제어에 의한 SRM의 최대 토크/효율 운전

서종윤*, 차현록**, 김광헌***, 임영철***, 장도현****
*뉴모텍㈜, **광주삼성전자, ***전남대학교 전기공학과, ****호서대학교 전기공학과

The Maximum Torque/Efficiency of SRM Driving for Self-Tuning Control

J.Y. Seo*, H.R. Cha**, K.H. Kim***, Y.C. Lim***, and D.H. Jong****
*NEWMOTECH Co., Ltd., **Samsung Kwangju Electronics Co., Ltd,
***Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University,
****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. we present self-tuning control of SRM for maximum torque and efficiency with phase current and shaft position sensor. During the sample time, micro-controller checks the number of pre-checked pulse. After micro-controller calculates between two data, it move forward or backward turn-off angle. When the turn-off angle is fixed optimal turn-off angle, turn-on angle moves forward or backward by a step using self-tuning control method. And then, optimal turn-off angle is searched once again. As such a repeating process, turn-on/off angle is moves automatically to obtain the maximum torque and efficiency. The experimental results are presented to validate the self-tuning algorithm.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 눈부신 발전으로 과거 이상적인 제어방법들이 현실화되어졌다. 이에 따라 전동기 부분에서도 고성능 및 고효율 운전이 가능하게 됨으로써, 구조 및 효율 그리고 단위 체적 당 토크와 인버터 용량 등에서 뛰어난 특성을 보이는 SRM을 여러 분야에서 관심을 가지게 되었다. 그러나 SRM은 인덕턴스의 포화로 전류와 위치에 따른 인덕턴스의 비선형성 때문에 제어에 큰 어려움을 가지고 있다. 따라서 전동기 철심에서 자기포화 현상이 발생하므로 이를 감안하여 턴-온/오프각을 제어하여야 한다.[3][5][6]

본 논문에서는 최대 토크/효율 운전을 하기 위해서 적절한 턴-온/오프각 제어를 자기동조방식(self-tuning method)에 의해 결정하는 방식을 제안하였다. 먼저 적절한 턴-오프각을 추종하고 다시 턴-온각을 추종 시켜가면서 종속적으로 최적의 턴-온/오프각을 결정해 최대의 토크 및 효율 값을 유지하기 위한 턴-온/오프각을 실시간으로 제어하였으며, 실험을 통해 제안된 방식이 타당함을 확인하였다.

2. SRM의 수학적 모델링

2.1 SRM의 토크 특성

SRM의 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

$$V = r\,i + w\frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\,i + L(\theta)i\frac{di}{dt} \qquad (1)$$

여기서,

V : DC 링크 전압
λ : 쇄교 자속
r : 상의 권선 저항
i : 상전류
L : 자기 인덕턴스

식 (1)을 전기적 순시 입력으로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 각 항은 저항에서 발생하는 손실과 자계에 저장된 에너지의 미분 값과 기계적 출력의 항으로 구분될 수 있다.

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

일반적으로 발생토크는 Co-energy개념에서 유도할 수 있다. Co-energy는 자기 포화를 무시하는 경우에 식 (3)과 같다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^{i_o} L(\theta) i dt = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (3)$$

발생토크는 Co-energy를 위치 각 θ로 미분한 값으로 식 (4)과 같다.

$$T = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (4)$$

식 (3)을 식 (4)에 대입하여 계산하면 8/.6형태의 SRM의 발생토크는 식 (5)과 같다.

$$T_{out} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-15^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_d^2 \frac{dL(\theta-45^\circ)}{d\theta} \quad (5)$$

여기서, i_a, i_b, i_c, i_d : 각상의 전류

SRM의 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$T_m = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + T_l + T_f \quad (6)$$

여기서, J_m : 전동기 관성 모멘트
B_m : 전동기 점성 마찰계수
T_l : 부하토크

식 (6)에서 일정한 입력전원에서 부하토크가 일정하고 정상상태 운전을 한다고 생각했을 때 토크는 식 (7)과 같이 속도에 비례하게 된다.

$$T_m \propto \omega_m(t) \quad (7)$$

결국 엔코더 펄스 및 상전류 값을 받아들여 최대 속도로 운전하고자 했을 때 최대 토크 운전이 됨을 알 수 있다.

2.2 SRM의 효율 특성

턴-온/오프각에 따라 변화되는 전류와 그 효율특성을 비교 분석하고자 선형적 조건과 상전류 형태와 관계없이 토크와 속도가 일정하다는 가정 속에서 토크발생구간에서 전류 A, B 및 C의 실효 값이 I_T로서 모두 같다고 가정한다.

우선, 전류확립구간에서 여자전류에 의해서 토크가 발생되지 않기 때문에 이 구간에서 전류 A, B 및 C에 대한 각각의 손실 P_{lossA}, P_{lossB} 및 P_{lossC}의 관계는 다음과 같은 조건식으로 쓸 수 있다.

$$P_{lossA} > P_{lossB} > P_{lossC} \quad (8)$$

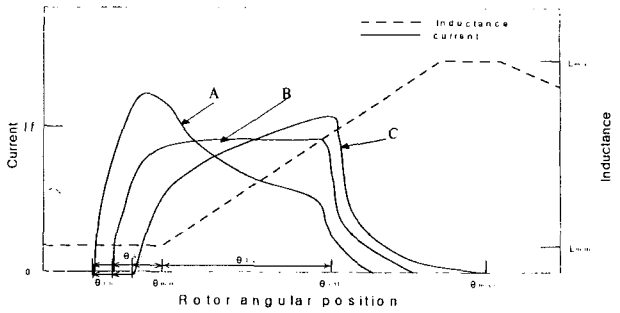

그림 1 Advance 각도에 따른 전류 파형
Fig. 1 Current shapes according to advance angle

실제로 전류 A와 B는 회전자 자극의 중첩각도가 커지면서 전류가 감소하거나 일정하게 유지하므로 포화에 의한 영향이 거의 없어서 선형적으로 볼 수 있다. 그러나 전류 C는 회전자의 중첩각도가 커짐과 동시에 전류가 상승하므로 자기회로의 포화가 가중된다. 따라서 전류 C에 대한 등가적인 인덕턴스의 기울기 K_L가 작아지기 때문에 발생되는 토크를 T_A, T_B 및 T_C라고 할 때 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_A = T_B > T_C \quad (9)$$

운전조건으로는 속도와 토크의 변동이 없고 토크 발생구간에서의 입력전력을 P라고 할 때 각 전류의 실효 값과 인가전압이 같기 때문에 동일한 입력전력을 갖는다. 그리고 각각의 효율을 η_a, η_b 및 η_c라고 할 때 효율은 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_{a,b,c} = \frac{\omega T_{A,B,C}}{P_{loss_{A,B,C}} + P} \quad (10)$$

포화로 인한 발생토크의 감소분은 포화의 정도에 따라 다르며 일반적으로 정격부하에서 자기회로가 적정하게 포화되도록 제어한다. 따라서 포화의 영향이 심한 전류 C가 효율이 가장 낮을 것이다. 또한 전류 확립구간에서의 손실발생은 저항이 매우 작아서 효율에 미치는 영향이 거의 적지만 조건에 의해서 속도와 토크의 변동이 없다면 전류 A보다는 전류 B가 효율이 높게 된다.

하지만 이와 같은 결론은 단지 일정한 속도로 운전하는 경우 토크값에 변동이 없었을 때 발생할 수 있는 제한적인 경우이다. 실제적으로 일정한 전원을 SRM 전용 인버터에 인가한 후 턴-온/오프각을 변동하였을 경우 운전 속도 증가와 평균 토크 증가됨을 이론과 실험을 통해서 알 수 있다. 결국 턴-온각이 B의 상태에서 Advance 되었을 때 권선저항에 의한 손실에 따른 효율의 영향보다 속도와 토크의 변동에 의한 발생되는 효율의 영향이 크기 때문에 전류가 A와 같은 형태 시 속도와 평균토크

가 현저히 증가한다고 가정하면 다음과 같이 효율 관계가 성립하게 된다.

$$\eta_a > \eta_b > \eta_c \qquad (11)$$

3. 자기동조에 의한 턴-온/오프각 제어

그림 2은 실제 회로에서 부하가 일정하다고 가정하였을 때 자기동조방식에 의해 턴-온/오프각을 조정하는 서브루틴(subroutine)의 순서도 이다.

여기서 초기 설정된 턴-온/오프각을 각각 θ_{on}, θ_{off}로 설정한다. 그리고 현재의 샘플링 시간에서 구해진 펄스 수 T(n)와 바로 이전의 펄스 수 T(n-1)라고 할 때 차이 값 Dif(n)는

$$Dif(n) = T(n) - T(n-1) \qquad (12)$$

이다. Dif(n)가 주어진 허용 오차(m)내에 존재할 경우 현 시점이 최대 토크가 형성되는 턴-오프각이므로 최적 턴-오프각 θ_{op}로 결정된다. 그러나 Dif(n) >m 일 경우 현시점의 턴-오프각에서 루프를 반복하여 θ_{off}를 각도 편차 $\Delta\theta$ 만큼 이동한다.

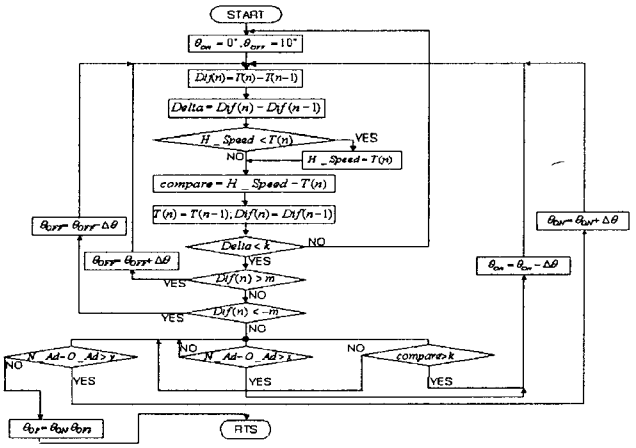

그림 2 최적의 턴-온/오프각을 결정하는 서브루틴의 순서도

Fig. 2 Flowchart of subroutine for determination of optimal turn-on/off angle

Optimal 턴-오프각을 기준으로, 왼쪽 영역에서는 Dif(m) < -m 일 경우, 현시점의 턴-오프각에서 루프를 반복하여 θ_{off}를 각도 편차 $-\Delta\theta$만큼 감소하게 된다.

이렇게 적절한 턴-오프각인 θop을 찾은 후, 그리고 Compare 값이 k보다 작을 경우에 턴-온각을 $\Delta\theta$씩 변화시키는데 기존에 변환된 최대 상전류 값(O_Ad)과 현재 받아들은 최대 전류값(N_Ad)을 비교하여 턴-온각을 어드밴스 시키거나 다시 복구시켜 적절한 턴-온각을 찾게 된다. 여기서 각각 x와 y값은 오차의 한계를 줄이고자 혀용 한계치를 설정하였다.

결과적으로, 턴-오프각과 턴-온각은 서로 종속적인 관계이므로 턴-온각을 $\pm\Delta\theta$ 변화시키고 나서 다시 적절한 턴-오프각을 찾는다. 이런 방식을 소프트웨어적으로 계속 반복시켜 최적의 턴-온/오프각을 스스로 찾도록 한다. 속도가 일정할 경우, 즉 정상상태에서는 θ_{off}와 θ_{on}은 거의 변화가 되지 않는다. 그러나 부하가 가해질 경우와 입력전원이 가변될 경우에 변화하는 상황에 맞추어 리셋 되어 자동적으로 턴-오프각과 턴-온각이 순서적으로 자기동조방식에 의해 자동적으로 최적의 턴-온/오프각을 결정하여 운전하게 된다.

4. 실험 결과

그림 3과 4은 자기동조 턴-온/오프각 제어로 SRM이 최대 토크 및 효율 운전을 됨을 증명하고자 할 때, 엔코더 펄스를 Feedback 받아서 정상상태에서 나타나는 전류 및 전압 파형과 속도 파형이다. 그림 3에서 나타나는 전압 파형은 턴-온/오프각의 흔들림으로 왜곡되어 짐을 보여주고 있다. 그리고 그림 4에서는 정상상태에서 파형이 출렁거림을 확인할 수 있다. 따라서 고속 운전상태에서 하나의 제어요소인 엔코더 펄스로 두 개의 제어대상은 턴-온/오프각을 제어하는 데는 어느 정도 한계가 있음을 알 수 있었다.

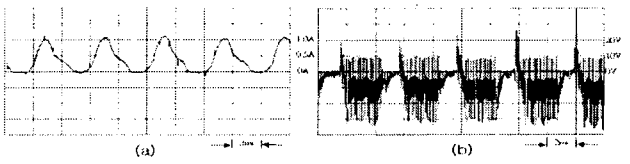

그림 3 엔코더 펄스를 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어시 파형: (a)전류, (b)전압

Fig. 3 The waveform of Self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse: (a)Current, (b)Voltage

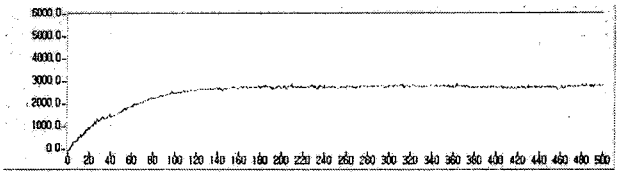

그림 4 엔코더 펄스를 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어시 속도 추이 파형

Fig. 4 The speed waveform of Self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse.

따라서 두 개의 제어대상을 제어하기 위해서 두 개의 제어 요소를 도입하고 자 기존의 엔코더 펄스와 상전류 최대값으로 턴-온/오프각을 제어하였다.

실질적으로 본 논문에서 추구하고자 하는 SRM이 최대 토크 및 효율 운전을 증명하고자 할 때, 그림 5와 그림 6은 정상상태에서 나타나는 전류 및 전압 파형과 이때 나타나는 속도 파형이다. 초기 운전 조건은 앞 실험과 같이 일정 입력전원과 부하 그리고 open-loop control으로 얻어진 턴-온/오프각을 초기값으로 그대로 두고, 엔코더 펄스와 상전류 값을 가지고 자기동조 방법으로 턴-온/오프각을 제어하였다. 위 방법을 통해서 기존의 엔코더 펄스만을 이용한 방법보다 EMF영향이 현저히 줄어들었음을 전압 파형을 통해 확인 할 수 있었다. 그리고 정상상태에서 속도 추이가 흔들거림이 줄어들고 속도도 크게 향상됨을 알 수 있었다. 결과적으로 엔코더 펄스와 상전류 값을 가지고 제어하였을 경우, EMF 영향으로 인한 부토크가 줄어들어 평균 토크가 크게 향상됨을 알 수 있다. 그리고 고정된 입력전원을 통해서 운전 속도의 향상과 평균 토크의 증가됨을 볼 때, 효율 또한 향상되었음을 알 수 있다.[1][2][4]

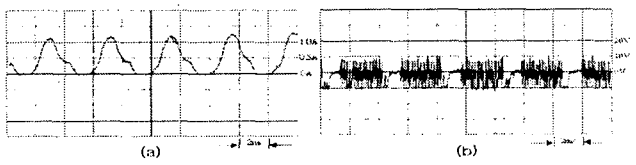

그림 5 엔코더 펄스와 상전류 값을 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어시 파형: (a)전류, (b)전압

Fig. 5 The waveform of Self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse and phase current: (a)Current, (b)Voltage

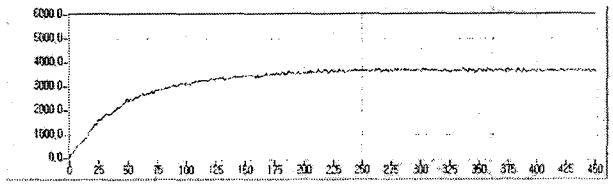

그림 6 엔코더 펄스와 상전류 값을 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어시 속도 추이 파형

Fig. 6 The speed waveform of Self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse and phase current.

5. 결 론

기존의 자기동조 제어방식에서 엔코더 신호만 가지고 턴-온/오프각 두 제어 요소를 다루는 데는 몇 가지 문제점들이 있었다. 정상상태의 고속 운전에서 엔코더 펄스의 계산오차 등으로 턴-온/오프각의 변동이 발생되고, 그 결과로 EMF 및 속도 흔들림이 나타났으며 전류 및 전압 파형의 왜곡이 심해졌다.[1]

본 논문의 자기동조 방식은 엔코더 펄스와 최대 상전류 값을 비교하여 각각 턴-오프각과 턴-온각을 제어하여 기존의 방식의 회전속도의 흔들림 문제를 해결하였다. 그리고 정상상태 운전시 속도의 변동을 최소화 하였고 기존방식보다 응답속도가 빨라짐을 실험을 통해 증명하였다. 전동기의 운전방정식으로부터 SRM이 최대 토크운전 및 SRM의 효율 특성을 볼 때, 고효율 운전이 됨을 할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 서종윤, 차현록, 서정철, "SRM의 자기동조 방식에 의한 최대토크의 턴-온/오프각 제어," 전력전자 학술대회 pp. 243~246, Jul. 2001.

[2] J.Y. Seo, H.R. Cha, J.C. SEO, K.H Kim, "Speed Control Method for Switched Reluctance Motors Drive using Self-tunning of Switching Angle," ISIE 2001, Vol.II, pp 811~814, June 2001.

[3] 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," JPE, vol 1, April 2001.

[4] 장도현, 문진영 "SRM 컨버터에서 자기동조 방식에 의한턴오프 각의 결정," 전력전자 학논문지 vol. 3, no. 4, pp. 418-425. Dec. 1998.

[5] 공관식, 황영문. "SRM의 고효율 구동을 위한 가변 스위칭 각도 조정방식에 관한 연구," 대한전기학회, 44권 1호, pp. 25~33, Jan. 1995.

[6] T.J.E. Miller, "Switched reluctance motors and their control," Magna physics publishing 1993.