

마이크로 프로세서에 의한 영구자석 동기 전동기의 自己制御器 설계 및 구동

윤병도 김운호 이용석* 김일환
 중앙대학교 전기공학과

- Microprocessor - based Self - controllers for the drive of Permanent Magnet Synchronous Motors -

Byung-Do Yoon, Yoon-Ho Kim, Young-Suk Lee, Eel-Hwan Kim
 Department of Electrical engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT

This paper presents a microprocessor based Self-Controller for a Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM), fed by voltage source inverter. The proper operation of the PMSM can be ensured only if the stator current is always synchronized with the its Back-E.M.F. The use of incrementtal encoder with high resolution makes it possible to design a Self-Controlled P.W.M.inverter. The pulse ratios are controlled to reduce the torque ripple in the low-speed drive region. And during the operation, torque - speed charactoristics are improved by the control of optimal load angle.

1. 서 론

각종 산업분야의 자동화나 제어기기 분야에 사용되는 서어보 전동기는 크게 직류기와 교류기로 나눌 수 있다. 교류 서어보 전동기는 직류 서어보 전동기와 같은 기계적 결함이 없기 때문에 구조적으로 견고하며 사용환경에 따른 문제나 유지보수 면 등 여러가지 장점을 가지고 있어서 사용상 유리하다는 것이 널리 알려져 있다.(1)

하지만 제어하기가 어렵고 제어장치가 복잡하다는 단점을 지니고 있어서 이를 개선시키고자 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.(2)

교류 서어보 전동기중 특히 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 회전자가 영구자석이므로 동손이 없어 효율이 높고 출력비가 높아 크기와 중량면에서 유리하다.(3)

또한 최근에 와서 영구자석 재료의 발달로 인해 저관성 및 효율적인 면에서 대단히 우수한 특성을 가지므로 고성능의 중소형 교류서어보 전동기로 주목을 받고 있다. PMSM을 고성능 서어보 전동기로 사용하기 위해서는 기동특성이 우수해야 하고, 순간적인 과부하에

도 일정한 토오르크를 발생시켜야 한다.(4,5)

본 연구에서는 특성이 우수한 PMSM을 제어하기 위한 구동장치로서 정전파 PWM을 사용한 자기제어(SELF-CONTROL)를 도입하고 인크리멘탈 엔코더(INCREMENTAL ENCODER)에 의해 정확한 위치를 검출하여 PMSM의 상전류를 역기전력에 동기화 시킴으로서 고성능 운전특성을 보여준다. 또한 시스템구성을 간단히 하기 위해 인크리멘탈 엔코더를 사용한 디지털적인 위치 검출 회로와 마이크로프로세서에 의한 제어기를 설계하였다. 구동시 토오크리플을 감소시키기 위해 PWM 펄스 수를 1주기당 16개, 30개, 60개로 나누고 속도에 따른 시뮬레이션 및 실험을 하여 검토하였다. 또한 운전시 부하각의 변화는 토오르크에 영향을 주는데 특히 고속운전 영역에서 최적 부하각의 제어는 토오르크-속도 특성의 향상에 크게 도움이 되는 것을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

전기적 토오르크를 다시 표현하면 다음 식과 같다.

$$T_e = 1/\omega_m (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \\
 = 1/\omega_m [E_m a \sin\omega t \cdot I_m a \sin(\omega t - \phi + \delta) \\
 + E_m b \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot I_m b \sin(\omega t - \phi + \delta - 120^\circ) \\
 + E_m c \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot I_m c \sin(\omega t - \phi + \delta + 120^\circ)] \quad (1)$$

각 상의 역기전력 및 전류의 크기가 같다면 식(1)은 다음과 같다.

$$T_e = (1/\omega_m) E_m \cdot I_m [\sin\omega t \sin(\omega t - \phi + \delta) + \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - \phi + \delta - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(\omega t - \phi + \delta + 120^\circ)] = 3/2 (E_m / \omega_m) \cdot I_m \cos(\phi - \delta) \quad (2)$$

(E_m, I_m : 역기전력 및 상전류의 최대값, ϕ : 역률각
 δ : 부하각 ω_m : 회전자 각속도, ω : 전기 각속도)

식(2)에서 토오르크가 최대로 되기 위해서는 $\phi - \delta$ 의 조건이 필요하다. 따라서 δ 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\delta = \tan^{-1}(\omega(L - M) / R) \quad (3)$$

식(3)에서 δ 는 ω 와 함수 관계가 있음을 알 수 있고 최대의 토크-속도 특성을 얻기 위해서는 ω 에 따른 최적 δ 를 구하여 상전류의 위상제어를 하여야 한다.

PMSM에서 $\phi = \delta$ 이 되도록 역기전력에 대해 전류를 위상제어 하면 식(2)에 나타난 것과 같이 직류 본권 전동기와 같은 특성을 얻을 수 있다. 그림(1)은 $\delta=0$ 에서 PMSM이 동기화 운전 되었을 때 기준상의 역기전력, 상전류, 상전압의 파형을 나타낸다

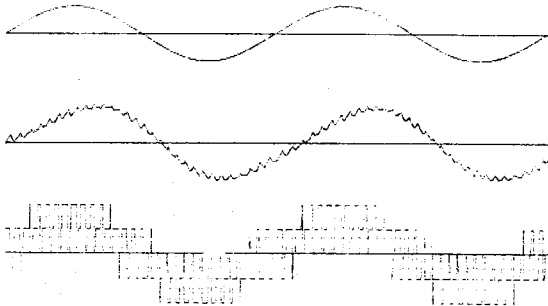


그림 1 PMSM의 역기전력, 상전류, 상전압

3. 제어시스템 구성

본 연구에서 PMSM을 구동하기 위한 전체 기능도는 그림(2)에 나타내었으며, 위치 검출부, 속도 검출부, 전력변환부 그리고 전원부와 시스템을 제어하기 위한 Z-80A 마이크로프로세서 및 인터페이스로 구성되어 있다. 주된 제어는 다음과 같다.

- (1) 회전자의 위치각에 따른 정확한 PWM 패턴의 위상 제어.
- (2) 저속, 중속, 고속에 따라 PWM 펄스 수를 60개, 30개, 16개 출력.
- (3) 기동시 제어.

PMSM이 1회전에 필요한 정현파 PWM의 DATA를 ROM에 기억시키고 회전자의 위치를 검출한다면 이 위치 정보에 의해 회전자와 동기된 정현파 PWM 신호를 얻을 수 있고, 인버터 스위칭 작용에 의해 동기된 상전류를 얻을 수 있다. 역기전력 e의 위상은 인크리멘탈 엔코더를 사용하여 회전자의 위치를 검출함으로써 정확한 검출이 가능하다.

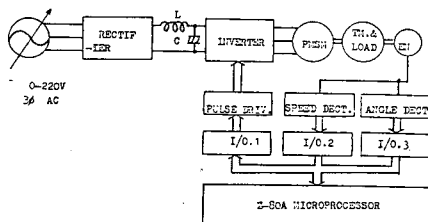


그림 2 자기제어형 PMSM의 전체기능도

PWM 패턴은 그 펄스 수가 1주기에 16개, 30개, 60개의 3종류의 패턴을 기억시켰다. 이때, 각 펄스 폭은 정현파 PWM 기법을 기초로 하여 구하였다. 사용한 프로그램의 FLOW-CHART는 그림(3)에 나타내었다.

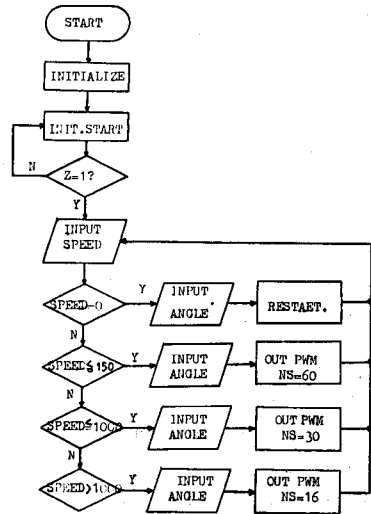


그림 3 제어 프로그램 흐름도

4 시뮬레이션 및 실험 결과, 고찰

NS=16개의 PWM 정현파로 무부하시 구동시켰을 때 PMSM의 전압-속도 응답특성은 그림(4)와 같다. 직류 본권 전동기와 같이 인가전압에 따라 전동기의 속도가 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있다.

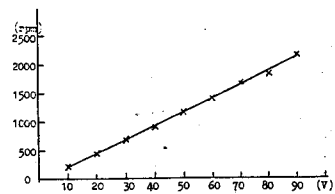


그림 4 전압-속도 응답 특성 (NS=16, $\delta=0^\circ$)
(NS : 주기당 PWM 펄스 수)

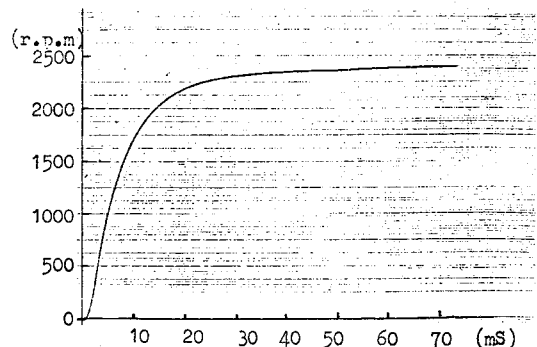


그림 4-2 속도과도응답특성

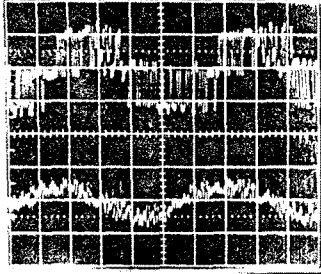


그림 6(a) 150 rpm NS=60 $\delta=30^\circ$
 上:10(V)/div, 下:1(A)/div
 H : 50mS / div

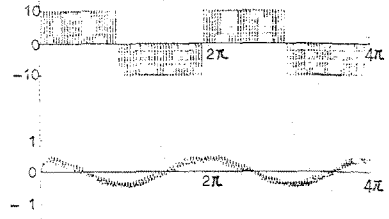


그림 7(a) 150 rpm NS=60 $\delta=30^\circ$
 上:10(V)/div, 下:1(A)/div

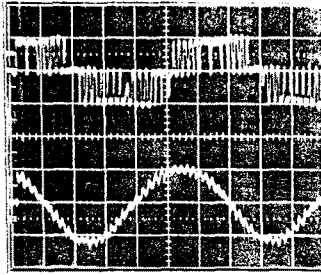


그림 6(b) 1000 rpm NS=30 $\delta=30^\circ$
 上:50(V)/div, 下:2.5(A)/div
 H : 10mS / div

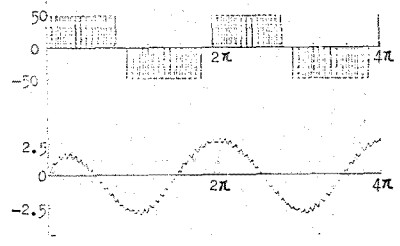


그림 7(b) 1000 rpm NS=30 $\delta=30^\circ$
 上:50(V)/div, 下:2.5(A)/div

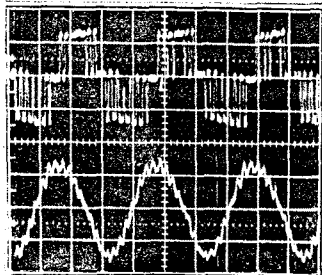


그림 6(c) 2000 rpm NS=16 $\delta=30^\circ$
 上:50(V)/div, 下:2.5(A)/div
 H : 10mS / div

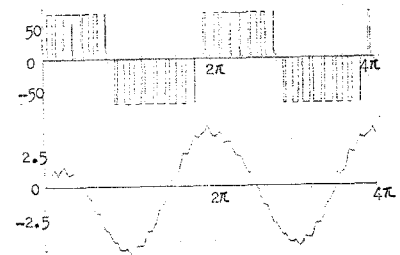


그림 7(c) 2000 rpm NS=16 $\delta=30^\circ$
 上:50(V)/div, 下:2.5(A)/div

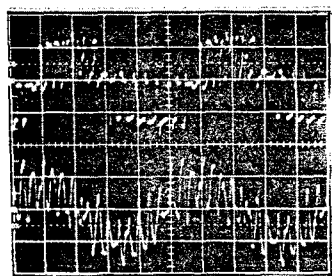


그림 6(d) 150 rpm NS=16 $\delta=30^\circ$
 上:10(V)/div, 下:1(A)/div
 H : 50mS / div

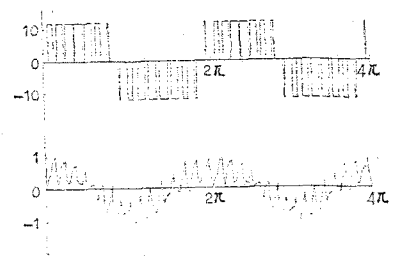


그림 7(d) 150 rpm NS=16 $\delta=30^\circ$
 上:10(V)/div, 下:1(A)/div

그림 6 선간전압 및 상전류의 실험결과

그림 7 선간전압 및 상전류의 시뮬레이션 결과

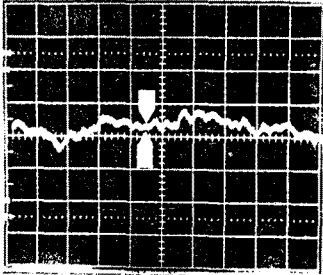


그림 8(a) 150rpm NS=60 $\delta=0^\circ$
V:0.002Kg·m/div H:50mS/div

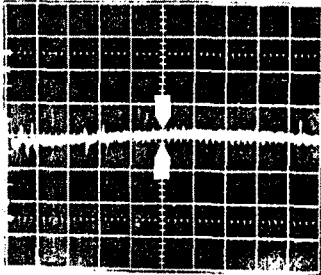


그림 8(b) 1000rpm NS=30 $\delta=0^\circ$
V:0.002Kg·m/div H:10mS/div

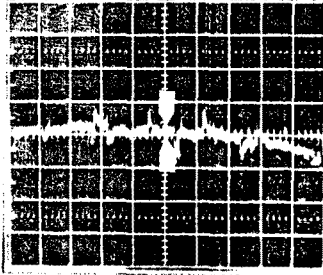


그림 8(c) 2000rpm NS=16 $\delta=0^\circ$
V:0.002Kg·m/div H:10mS/div

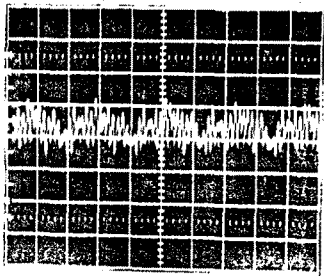


그림 8(d) 150rpm NS=16 $\delta=0^\circ$
V:0.002Kg·m/div H:50mS/div

그림 8 보오크 리플의 실험결과



그림 9(a) 150rpm NS=60 $\delta=0^\circ$
V : 0.002Kg·m/div

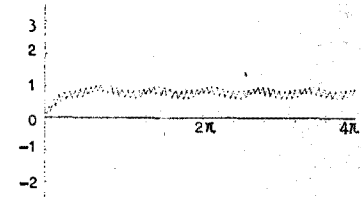


그림 9(b) 1000rpm NS=30 $\delta=0^\circ$
V : 0.002Kg·m/div

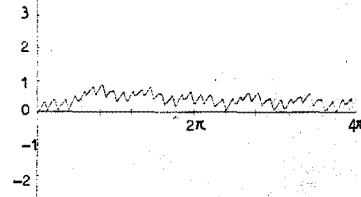


그림 9(c) 2000rpm NS=16 $\delta=0^\circ$
V : 0.002Kg·m/div

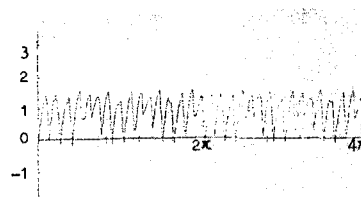


그림 9(d) 150rpm NS=16 $\delta=0^\circ$
V : 0.002Kg·m/div

그림 9 보오크 리플의 시뮬레이션 결과

그림(5)는 무부하 정지상태에서 일정전압을 걸었을때 속도 과도응답 특성을 X-Y 레코더로 측정한 결과를 나타낸다. 직류 전동기와 같이 빠른 응답성이 있음을 알 수 있다. 그림(6)과 그림(7)은 NS 및 회전자 속도를 변수로 한 PMSM의 선간전압 및 상전류의 실험 결과와 시뮬레이션 결과이다. 저속으로 갈 수록 또, NS가 증가할 수록 상전류는 정현파에 가깝게 되었고 또한, 토오크 리플이 감소하였다.

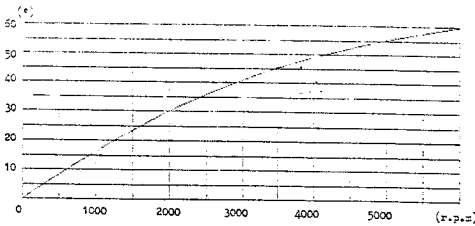


그림 10 속도에 따른 최적 부하각의 시뮬레이션 결과

그림(8)은 실험에 의한 토오크 리플이고, 그림(9)는 시뮬레이션에 의한 토오크 리플을 나타낸다. 실험시 토오크 메타 및 부하의 커플링이 완전치 않아 측정값에 진동을 포함하였다. 그림(8)에서 토오크 리플은 화살표로 표시되어 있는 부분이다. 토오크 리플은 기계적 부하에 의해 더욱 작아진다.

그림(10)은 속도에 따른 최적 부하각 δ 를 시뮬레이션한 결과이다. 속도 증가에 따라 최적 부하각 δ 가 증가됨을 알 수 있다. 이것은 PMSM의 운전속도 증가에 따라 리액턴스분이 증가함에 기인된다.

그림(11)은 부하각을 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 로 변화했을 때 실험 결과의 그래프이다. 시뮬레이션 결과와 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있는데, 이 결과로 보아 토오크-속도 특성을 개선 시키기 위해서 제어할 필요가 있으며 특히, 고속운전으로 갈수록 많은 영향을 받는다.

*****실험에 사용한 PMSM의 특성*****

- 1) 결선방법: Y결선
- 2) 정격출력: 200[W]
- 3) 정격 토오크: 0.0725[Kg·m]
- 4) 정격회전수: 2500[r.p.m]
- 5) 정격전압: 120[V]
- 6) 정격전류: 3.1[A]
- 7)상당저항: 2.61[Ω]
- 8) 유기전압상수: 0.015[V/r.p.m]
- 9) 관성모멘트: 0.0043 [Kg·cm²]
- 10) 극수: 2[극]
- 11) 인덕턴스(상호인덕턴스 포함): 7.3[mH]

*****실험에 사용한 인크리멘탈 엔코더의 사양*****

- 1) 출력 펄스수/회전: 1000[개]
- 2) 최대회전수: 3000 [r.p.m]
- 3) 정격전압: 5[V]-12[V]
- 4) 관성모멘트: 95[g·cm²]
- 5) 기동토오크: 250[g·cm]
- 6) 출력형태: A, B, Z, 상 출력

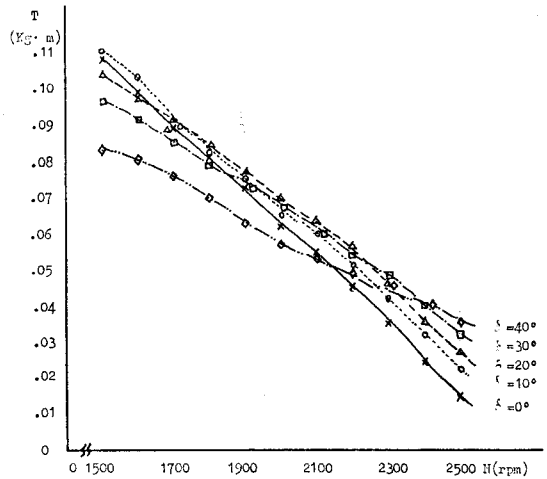


그림 11 실험에 사용한 PMSM의 토오크-속도 특성곡선

5. 결 론

본 연구에서는 정현파 PWM을 사용한 자기제어를 디지털적으로 실현한 영구자석 동기전동기 구동시스템을 설계하였고, 인크리멘탈 엔코더를 사용한 위치검출과 마이크로프로세서에 의한 제어기의 구성으로 전체시스템을 비교적 간단하게 하였다. 정현파 PWM을 사용한 자기제어에 의해 PMSM을 직류 분권전동기화 하였다. 따라서 인가전압에 따라 전동기 속도는 선형적으로 변화하였고, 저속에서 PWM 펄스 수를 증가 시키므로서 토오크 리플을 감소시켰다. 또한, 50 rpm 이하에서도 원활한 운전이 가능했으며 전동기 소음도 현저히 감소됨을 관찰할 수 있었다. 고속운전으로 갈수록 토오크가 저하되는데 이를 개선시키는 방안으로 속도에 따른 최적 부하각에 대해 검토하였다.

참 고 문 헌

1. 윤 병도, "마이크로 프로세서에 의한 영구자석 동기 전동기의 구동", 대한 전기학회 논문지 VOL 35 DEC/1986
2. Dietrich NAUNIN, Hans-Christian REUSS, "P.M. BRUSHLESS SERVO DRIVE CONTROLLED BY 16 BIT MICROCOMPUTER", IEEE PESC'88 RECORD APRIL/1988
3. "AC 사-보모-타 마이콘制御", 종합電子出版社
4. CHANDRASEKHAR NAMUDURI, PARESH C. SEN, "A servo control system Using a self-controlled Synchronous Motor (SCSM) with Sliding Mode Controller", IEEE. Trans. Ind. APRL VOL IA-23 MAR/APRIL/1987.
5. ROGER C. BECERRA, MEHRDAD EHSANI, " High-Speed Torque control of Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Ind. ELEC. VOL. 35 AUG/1988