

히스테리시스 전류 제어형 PWM 인버터에 의한 영구자석 동기 전동기의 약계자 제어

윤 병도, 김 윤호, 양 천석, 윤 명균, 유 보민
중앙대학교 전기공학과

Field Weakening Control of Permanent Magnet Synchronous Motor fed by Hysteresis Current Controlled PWM Inverter

Byung-Do Yoon, Yoon-Ho Kim, Chun-Suk Yang, Myung-Kyun Yoon, Bo-Min Yoo
Department of Electrical Engineering, Chung-Ang University

Abstract

The back e.m.f. of PMSM is increased as the speed is increased and it saturates the current regulator because it counteracts the available output voltage of the inverter. In the PM motor, however, the required armature terminal voltage can be reduced within the maximum output voltage of the inverter by field weakening control, in which the air gap flux is weakened by the d-axis armature current. In this paper, the field weakening control of the surface PMSM fed by a hysteresis current controlled PWM inverter based on the microprocessor is presented. To show the validity of the proposed control method, the simulation and experimental results are provided.

1. 서 론

오늘날 각종 산업분야의 자동화 및 제어기기 분야에서 동특성이 우수한 서보전동기가 요구되고 있으나, 직류서보전동기의 기계적 정류장치로 인해 파생하는 문제점으로 인하여 교류서보 시스템의 필요성이 증대되고 있다. 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 회전자가 영구자석으로 구성되어 있으며 인버터에 의한 전기적 정류회로로 운전하므로 기계적 정류로 인한 단점이 없을 뿐만 아니라 유도전동기 또는 권선계자형 동기전동기와 비교하여 높은 토오크대 관성비와 고효율을 갖고 있어 고성능 서보전동기에 적합하다[1].

인버터에 의하여 구동되는 영구자석 동기 전동기는 인버터의 최대 출력 전압, 전류 및 전동기 정격에 의해 운전 가능 범위가 결정된다. 즉, 어떤 일정한 토오크에서의 전동기 최대 속도는 속도에 의한 역기전력이 인버터 공급 가능 전압과 맞서게 되어 되어 전류 제어를 포화 시키지 않는 범위 내의 속도이다. 따라서 그 속도 이상에서 운전 하고자 하면 전류 제어가 포화되어 필요한 전류를 흘릴 수 없게 된다. 그러나 옴의 d-축 전기자 전류를 이용해 공극의 자속을 감소시키는 약계자 제어(Field Weakening Control)에 의해 필요한 전기자 단자 전압을 인버터의 최대 출력 전압 이내로 조절할 수 있으며 결과적으로 전동기의 운전 범위 확장이 가능하다[2]. 본 논문에서는 표면 자석형 영구자석 동기 전동기(Surface PMSM, SPMSM)를 대상으로하여 역기전력이 인버터 공급 가능 전압과 맞서기 직전 속도까지는 d-축 전기자 전류를 영으로 하여 모든 전기자 전류를 토오크분 전류 즉, q-축 전류로 사용함으로써 전류당 최대 토오크 운전실시하고 그 이상의 속도에서는 약계자 제어를 실시 함으로써 전동기의 운전 가능 영역을 확장할 수 있

음을 보인다. 전력을 변환기로는 히스테리시스 전류 제어형 PWM 인버터를 사용 하였으며 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 영구자석 동기 전동기의 수학적 고찰

Park 변환에 의해 고정자 변수를 회전자 기준좌표로 변환하면 d-q 변환된 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 다음과 같다[3].

$$v_{dq0} = r i_{dq0} + \omega_r \lambda_{dq} + p \lambda_{dq0} \quad (1)$$

여기서,

$$\lambda_{dq} = [\lambda_d \quad -\lambda_q \quad 0]^T \quad (2)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (3)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (4)$$

식(3), (4)을 식(1)에 대입하고 영상분을 제외하면 d,q성분에 의한 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_q = (r + pL_q) i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_m \quad (5)$$

$$v_d = (r + pL_d) i_d - \omega_r L_q i_q \quad (6)$$

따라서, 정상 상태 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_q = r i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_m \quad (7)$$

$$v_d = r i_d - \omega_r L_q i_q \quad (8)$$

발생 토오크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \left[\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (9)$$

본 논문에서 대상으로한 표면자석형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자의 표면에 설치된 구조로 자석자체의 투자율이 공극의 투자율과 거의 같기 때문에 d, q-축의 동기 리액턴스가 같다고 보아도 된다. 따라서, 식 (9)는

$$T_e = \frac{3}{2} P \cdot \lambda_m i_q = K_t \cdot i_q \quad (10)$$

와 같이 되어 토오크는 i_q 에 비례하게 된다. 따라서 단위 전류당 최대 토오크를 얻기 위해서는 q-축 전류만 흘려 주어야 한다.

3. 영구자석 동기 전동기의 약계자 제어

인버터에 의해 구동되는 영구자석 동기 전동기는 인버터의 용량을 고려하면 다음과 같이 단자전압과 전기자 전류를 제한이 있다.

$$I_a \leq I_{lim} \quad (11)$$

$$V_a \leq V_{lim} \quad (12)$$

전류 제한 I_{lim} 는 인버터의 출력 가능 전류와 전동기의

연속 정격 전류로 결정되며, 전압 제한 V_{lim} 는 인버터의 최대 출력 가능 전압으로 결정된다[4]. 영구자석 동기 전동기는 속도를 증가시키려면 전기자 단자 전압을 증가시켜야 한다. 그러나 인버터로 구동되는 영구자석 동기 전동기의 전기자 단자 전압은 위의 식 (12)로부터 제한이 있으므로 어느 속도 이상에서는 역기전력이 인버터 최대 출력 전압과 맞섬으로써 전류제어기를 포화시킨다. 그러나 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 약계자 제어 즉, d-축 전류를 음의 값으로 가하면 공극의 총자속을 감소시켜 필요한 단자 전압을 최대 출력 전압이내로 조정할 수 있으며 전류제어기의 포화를 막을 수 있다. 전기자 전압 방정식에서 저항에 의한 전압 강하는 고속의 운전 범위에서는 리액턴스 성분에 의한 전압 강하에 비하여 매우 작으므로 무시할 수 있다. 그러므로 식 (7), (8)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$v_q = \omega_r \lambda_m + \omega_r L_d i_d \quad (13)$$

$$v_d = -\omega_r L_q i_q \quad (14)$$

그러므로,

$$V_a = \sqrt{(\omega_r \lambda_m + \omega_r L_d i_d)^2 + (\omega_r L_q i_q)^2} \quad (15)$$

식 (12)로부터 $V_a = V_{lim}$ 일때 전기자 전압 방정식은 표면 자석형 동기 전동기의 경우 $L_d = L_q$ 이므로 다음과 같이 i_d 와 i_q 에 대한 원의 방정식으로 표현된다.

$$\left(\frac{V_{lim}}{\omega_r L_q} \right)^2 = i_q^2 + \left(i_d + \frac{\lambda_m}{L_d} \right)^2 \quad (16)$$

또한 $I_a = I_{lim}$ 일때 식 (11)로부터 i_d 와 i_q 의 관계는 다음과 같다

$$I_{lim} = i_d^2 + i_q^2 \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)을 $i_d - i_q$ 평면에 나타내면 그림 1과 같으며[5]. 정격 이상의 속도에서 필요한 i_d 값은 전압 궤적과 전류 궤적이 만나는 점으로 결정 한다. 그러므로 i_d 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$i_d = \frac{(V_{lim}/\omega_r)^2 - \lambda_m^2 - (L_d * I_{lim})^2}{2 * \lambda_m * L_d} \quad (18)$$

식 (18)과 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 전동기의 속도가 증가함에 따라 전압 제한 궤적의 반지름은 줄어들게 되며 어떤 속도에서의 전기자 전류는 전류 제한 궤적내에 존재하여야한다. 그림 1에서 d-축 전류가 필요하지 않은 속도의 한계는 ω_{r1} 이며, 이 속도 까지는 전류당 최대 토크운전을 위하여 i_q 전류만 흘러준다.

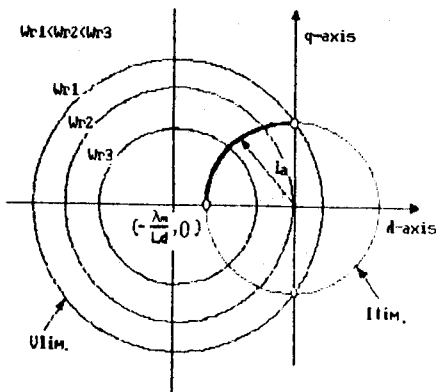


그림 1. 전압 및 전류 원선도
Fig. 1. Voltage and current circle diagram.

d-축 전류를 음의 값으로 가하는 약계자 제어에 의하여 영구자석 동기 전동기의 운전 가능 영역은 그림 2와 같이 정격이상의 속도까지 확장 가능하다.

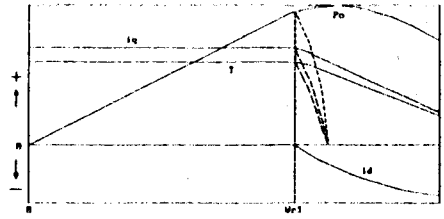


그림 2. 전류,토크 및 출력 특성
Fig. 2. Current, torque and power characteristics.

4. 제어 시스템의 구성

본 연구에서는 표면 자석형 영구자석 동기 전동기의 약계자 제어를 위하여 그림 3과 같이 제어 시스템을 구성하였다. 전류 제어기는 실제 전류와 전류 기준치의 오차가 히스테리시스 밴드 내에 들어오도록 스위칭하는 히스테리시스 전류 제어형 PWM 인버터를 채택하였다.

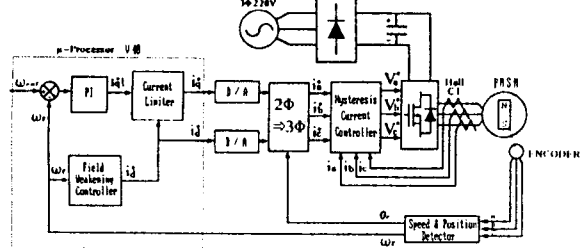


그림 3. 약계자 제어 시스템
Fig. 3. Scheme of field weakening control system.

5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 및 실험에 사용된 영구자석 동기 전동기의 제 정수는 표 1과 같으며 V_{lim} 및 I_{lim} 는 모터의 정격 전압 및 정격 전류로 하였다.

표 1. 영구자석 동기 전동기의 제 정수
Table 1. Parameter of PMSM.

정격출력	200[W]
정격토크	0.7105 [N·m]
정격속도	261.75 [rad/s]
정격전압	120 [V]
정격전류	3.1 [A]
상당 저항	3.61 [Ω]
상당 인덕턴스	15 [mH]
역기전력 상수	0.200573 [V/rad/s]
회전자 관성모멘트	0.0004214 [N·m·s ²]
점성마찰 계수	0.001394 [N·m/rad/s]
극수	2극

그림 4(a)는 무부하시 속도 지령을 기동시 2500[rpm] 그리고, 기동 후 0.8[sec]에서 5000[rpm]으로 주었을 때약계자 제어를 하지않은 경우로써 전동기의 속도는 4300[rpm]이상 올라가지 못함을 보이고있다. 그러나, 그림 5(a)는 약계자 제어를 한 경우로써 5000[rpm]까지 올라가 속도 지령에 잘 응답함을 알 수 있다. 그림 4(b),(c),(d)와 그림 5

(b), (c), (d)는 각각 약계자 제어를 하지않은 경우와 약계자 제어시의 토오크, q-축, d-축 전류 파형으로써, 약계자 제어시 전동기의 운전 가능 영역을 확장 시키고 있음을 나타내고있다. 그림 6은 2500[rpm] 및 5000[rpm]시의 정상 상태 상전류 파형이다.

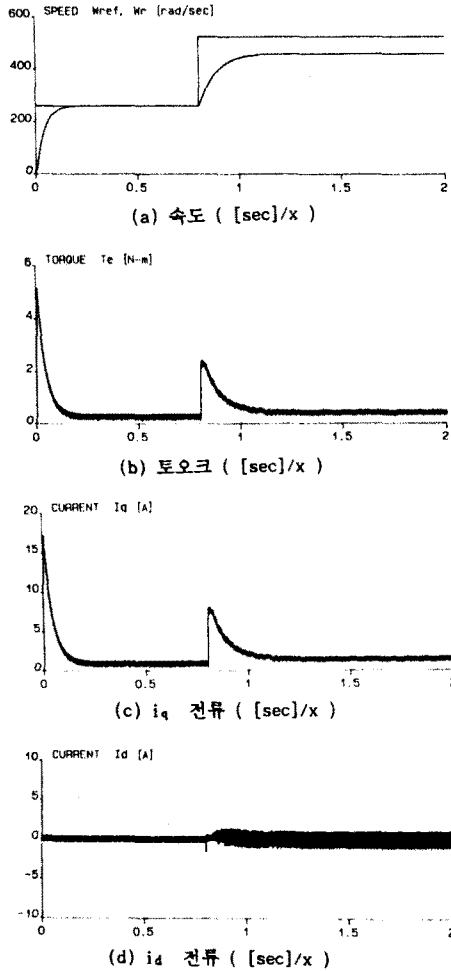


그림 4. 약계자 제어를 하지 않았을 시 응답 특성
Fig. 4. Responses without field weakening.

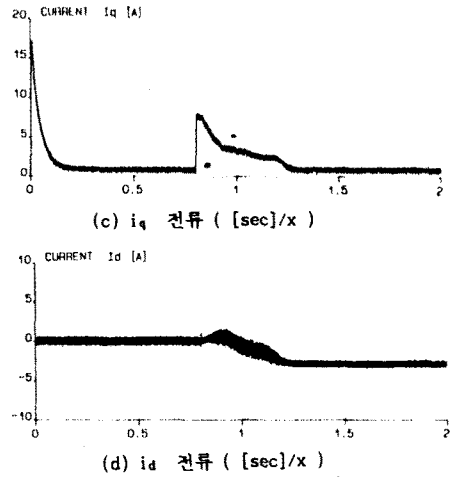
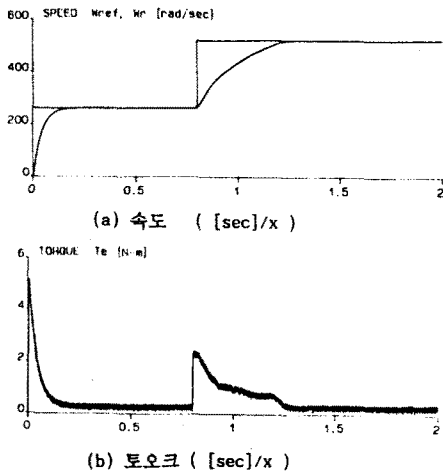


그림 5. 약계자 제어시 응답 특성
Fig 5. Responses with field weakening.

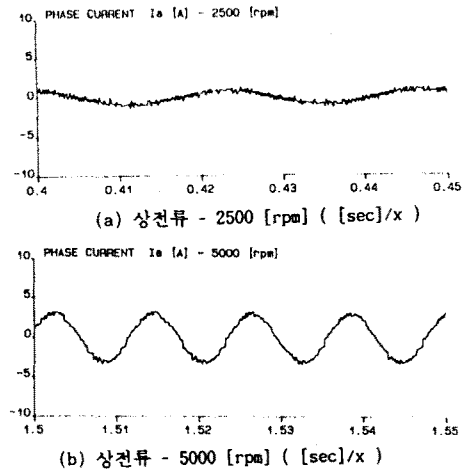


그림 6. 약계자 제어시 정상 상태 상전류 파형
Fig. 6. Steady state phase current waveforms with field weakening.

6. 실험 결과

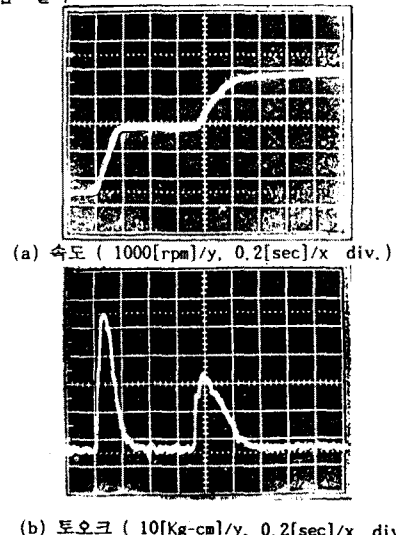
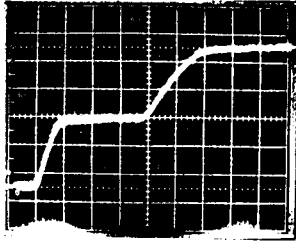
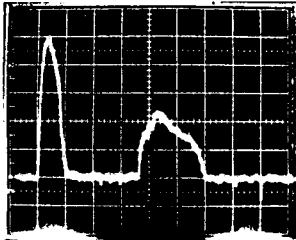


그림 7. 약계자 제어를 하지 않았을 시 응답 특성
Fig. 7. Responses without field weakening.

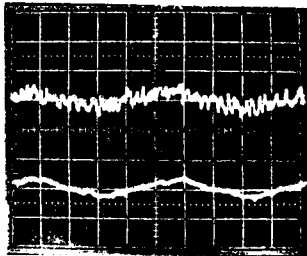


(a) 속도 (1000[rpm]/y, 0.2[sec]/x div.)

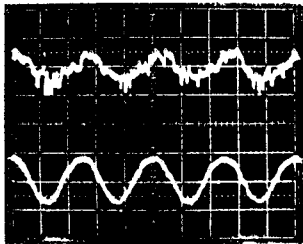


(b) 토크 (10[Kg-cm]/y, 0.2[sec]/x div.)

그림 8. 약계자 제어시 응답 특성
Fig. 8. Responses with field weakening.



(a) 상전류 - 2500 [rpm] (5[A]/y, 5[ms]/x div.)



(b) 상전류 - 5000 [rpm] (5[A]/y, 5[ms]/x div.)

그림 9. 약계자 제어시 정상 상태 상전류 지령치 및 실제 상전류

Fig. 9. Steady state phase current command and actual current with field weakening.

그림 7은 속도 지령을 시뮬레이션 조건과 마찬가지로 2500[rpm]에서 5000[rpm]으로 주었을 때 약계자 제어를 하지 않은 경우의 속도 및 토크 파형으로써, 속도 지령에 응답하지 못하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림 8은 약계자 제어시의 속도 및 토크 파형으로써 속도 지령에 훌륭히 응답하고 있음을 알 수 있다. 위의 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치 한다. 따라서, 영구자석 동기 전동기는 약계자 제어를 실시함으로써, 운전 영역의 확장이 현저하게 이루어짐을 알 수 있다. 그림 9는 2500[rpm] 및 5000[rpm] 시의 정상 상태 상전류 지령치와 실제 상전류 실험 파형으로써, 또한 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다.

7. 결 론

영구자석 동기 전동기의 운전 범위를 확장하기 위하여

표면 자석형 영구자석 동기 전동기를 대상으로 히스테리시스 전류 제어형 PWM 인버터에 의한 약계자 제어 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템에 의하여, 표면 자석형 영구자석 동기 전동기에 대해 약계자 제어를 실시함으로써, 전동기의 역기전력이 인버터 공급 가능 전압과 맞서는 속도가 상으로 전동기의 운전 가능 영역을 확장 할 수 있음을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보였다. 따라서, 고속 및 정출력 특성의 서보 전동기 제어가 요구되는 산업 분야에서 일정한 용량의 인버터로 같은 타입의 영구자석 동기 전동기를 운전 시 약계자 제어에 의해 그러한 요구의 실현이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 윤 병도, "마이크로프로세서에 의한 영구자석 동기전동기의 구동", 대한전기학회 논문지, VOL.35, DEC 1986.
- [2] T.J.E.Miller, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Oxford University Press, 1989.
- [3] Paul C. Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill, 1987.
- [4] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasaka and K. Taniguchi, "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Optimum Flux-Weakening", IEEE/IAS, Annual Meeting Conf.Rec., pp51-56,1989.
- [5] S. Morimoto, Y. Takeda and T. Hirasaka, "Current Phase Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. on PES., Vol. 5, No.2, Apr., pp133-139, 1990.
- [6] S. Ogawasawara, M. Nishimura, H. Akagi, and A. Nabae, "A High Performance AC Servo System with Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. on IES., Vol. IE-33, No. 1., pp87-91, Feb., 1986.
- [7] Y. Takeda and T. Hirasaka, "Current Phase Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Saliency", PESC Conf. Rec., pp409-414, Apr. 1988.
- [8] R. Schiferl and T. A. Lipo, "Power Capability of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motors in Variable Speed Drive Applications", IEEE/IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp23-31, 1988.
- [9] T. M. Jahns, "Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. on IAS., Vol. IA-23, pp681-689, July/Aug., 1987.
- [10] Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. on IAS., Vol.25, No.2, March/April 1989.
- [11] Hilding Elmquist, Karl Johan Åström, tomas Schönthal, Björn Wittenmark, Simnon User's Guide for MS-DOS Computers, SSPA SYSTEMS, 1990.