

약계자 영역에서 PMSM 드라이브의 최대 토크제어

이홍균 · 이정철 · 김종관 · 정동화[†]

순천대학교 공과대학 전기제어공학과
(2002. 6. 7. 접수 / 2003. 2. 14. 채택)

Maximum Torque Control of PMSM Drive in Field Weakening Region

Hong Gyun Lee · Jung Chul Lee · Jong Gwan Kim · Dong Hwa Chung[†]

Department of Electrical Control Engineering, Suncheon National University

(Received June 7, 2002 / Accepted February 14, 2003)

Abstract : Permanent magnet synchronous motor(PMSM) is widely used in many applications such as an electric vehicle, compressor drives of air conditioner and machine tool spindle drives. PMSM drive system have become a popular choice in various application, due to their excellent power to weight ratio.

This paper is proposed maximum torque control for field weakening operation of PMSM drive. At low speeds, the reluctance torque is used to maximize the output for a given current level. This is achieved maximum torque per ampere(MTPA) by selecting an optimal value of the direct stator current component. At high speeds, the system reaches a point at which the inverter will not be able to supply the desired voltage. In this case it is necessary to make use of an increased value the direct current component.

The proposed control algorithm is applied to PMSM drive system, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail by simulation.

Key Words : PMSM, maximum torque control, MTPA control, field weakening control, vector control

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 에너지를 가진 NdFeB의 자성재료를 사용하여 유도전동기와 비교하여 효율, 역률, 전력밀도 및 토크밀도가 높고 브러시 없는 동작과 회전자의 간단한 구조로 되어 있다^{1,2)}. PMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하고 돌극성을 가지고 있으며 효율적인 공극으로 되어 있지 않는 단점으로 일정 토크 영역에서 일정 전력영역까지 운전하기가 어렵다. 특히, 종래의 고정 자속레벨을 사용할 경우 일정 전력영역에서 속도범위가 매우 낮으며 최대토크를 얻을 수 없다. 일정 전력영역에서 속도를 높이고 최대토크를 발휘할 수 있는 약계자 제어에 관한 연구가 많이 이룩되고 있다^{3,4)}.

Bose는 일정 전력영역에서 6 스텝 전압제어의 방

법을 제시하였다³⁾. 이 방법에서는 전동기 파라미터에 무관하며 약계자 운전을 위하여 6 스텝 전압을 인가하여 DC 링크전압의 이용률을 최대화시켰다. 그러나 일정 토크영역에서 일정 전력영역까지 제어 모드를 변경시키기 위하여 자속의 정보가 필요하였다. MacMinn은 피드포워드 약계자 방법을 제시하였으나 약계자 영역에서 모든 전동기 파라미터는 전동기의 전류를 조절하여 얻었다⁴⁾. Morimoto는 피드포워드 비간섭 제어기에 의해 전압보상기와 전류제어기를 약계자 운전을 위하여 제시하였다⁵⁾. 이 전압보상기는 동작조건을 동조할 경우 양호하게 동작할 수 있다. 그러나 온도의 상승과 DC 링크전압 등이 변화하여 영구자석의 자속이 약화되는 특별한 전압오차가 발생한다면 전압보상기의 부적절한 동작 때문에 드라이브 시스템의 성능이 악화될 수 있다. 확장된 속도영역에서 PMSM 드라이브 시스템의 성능은 전동기 파라미터에 강력하게 의존된다. 이는 고정자 전압방정식의 모델이 기본적으로 약계자 제어를 위하여 사용하기 때문이다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
hwa777@sunchon.ac.kr

본 연구에서는 PMSM의 약계자 영역에서 최대 토크제어를 제시한다. 최대 토크를 발생하기 위하여 전류 조절기의 출력인 인버터의 출력전압은 DC 링크전압을 최대로 이용할 수 있도록 제어한다. 본 연구에서 제시한 최대 토크제어로 PMSM의 다양한 응답성능을 분석하고 종래의 방법과 비교하여 본 연구의 타당성을 입증한다.

2. 시스템의 모델링과 동작

전기 각속도에 의해 동기회전 d - q 기준축에서 전 동기의 모델을 구할 수 있다. Fig. 1은 PMSM의 d 와 q 축의 등가회로를 나타낸다.

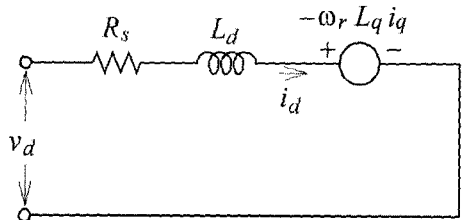
Fig. 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

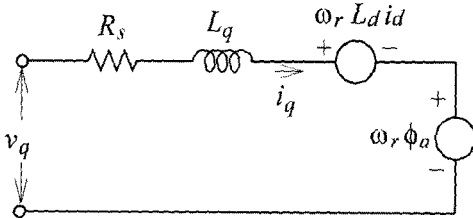
$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (2)$$

여기서, v_d 와 v_q 는 고정자의 d 와 q 전압, i_d 와 i_q 는 고정자의 d 와 q 전류, L_d 와 L_q 는 고정자의 d 와 q 인덕턴스 및 R_s 는 저항을 나타낸다.

식(1)-(2)를 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.



(a) d axis



(b) q axis

Fig. 1. Equivalent circuit of PMSM

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r \phi_a}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

발생토크 T_e 는 전류의 성분 i_d 와 i_q 에 비례한다.

$$T_e = P_n [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

여기서, $P_n = 3P/4$ 이다.

또한 발생토크는 부하토크 T_L 과 관련된 관계식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + B\omega_r + Jp\omega_r \quad (5)$$

정방향 전동기 운전에서 일정 토크영역(CTR: Constant Torque Region)과 일정 전력영역(CPR: Constant Power Region)으로 구분한다. CTR에서는 MTPA로 운전하고 고정자 자속과 전류도 일정하며 전압만 변화한다. CPR는 약계자 제어의 영역을 나타내며 전류와 전압은 일정하며 토크와 자속은 감소한다. Fig. 2는 전류와 전압 한계조건에서 전류제어를 i_d - i_q 평면에 도시하면 성능을 파악할 수 있다.

3. 최대 토크제어

3.1. CTR에서 운전

기저속도 이하에서 전동기의 토크는 주로 최대의 인버터전류에 의해 제한된다. 주어진 전류레벨에서

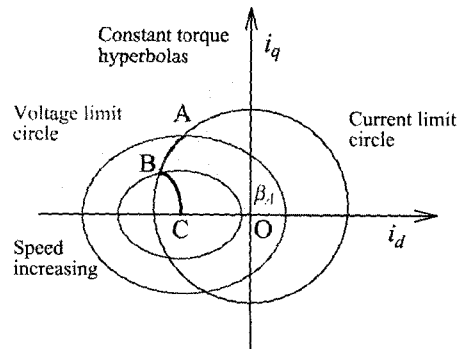


Fig. 2. Current locus in i_d - i_q plane

출력 토크를 최대화하는 방법이 중요하다. 전압과 전류의 제한에 도달하지 않을 경우에도 인버터와 전동기의 손실이 최소가 되는 점에서 요구되는 출력토크를 얻기 위하여 d 와 q 축 전류의 조합을 적절하게 선정하여 기준전류를 발생시켜야 한다.

전압과 전류의 조건을 고려하면 전기자전류 및 단자전압은 다음과 같이 제한된다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad (6)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (7)$$

최대토크가 되기 위한 조건은 토크 식을 d 축 전류로 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있으며 이를 만족하는 i_d 를 구하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{-\phi_a + \sqrt{\phi_a^2 + 4 \cdot (L_d - L_q)^2 \cdot i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (8)$$

CTR에서 운전하는 PMSM 드라이브 시스템의 블록도는 Fig. 3과 같다.

3.2. CPR에서 운전

CPR 영역에서 제어 알고리즘을 간단하게 처리하기 위하여 전압조건을 식을 이용한다.

$$V_0 = \sqrt{v_{d0}^2 + v_{q0}^2} \leq V_{0m} \quad (9)$$

CPR 영역에서 i_d 와 i_q 의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{1}{L_d} \left[-\phi_a + \sqrt{\frac{V_{0m}^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \right] \quad (10)$$

여기서 $|i_d| \leq V_{0m}/(\omega_r L_d)$, i.e. $|v_{d0}| \leq V_{0m}$ 이다.

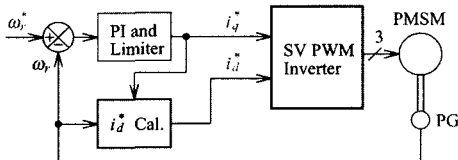


Fig. 3. Control block diagram of drive system in CTR

Table 1. Parameter of PMSM

극수	4
전기자 저항 R_s	0.57[Ω]
영구자석 쇠교자속 ϕ_a	0.108[Wb]
정격 주파수	60[Hz]
전기자 최대전류 I_{am}	15[A]
전기자 최대전압 V_{am}	120[V]
d 축 인덕턴스 L_d	8.72[mH]
q 축 인덕턴스 L_q	22.8[mH]
정격 속도	1800[rpm]

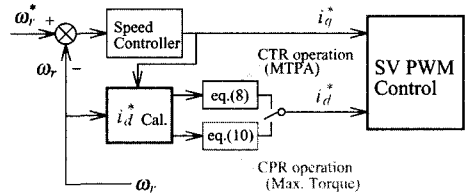


Fig. 4. Control block diagram of system

전류벡터가 식(10)에 의해 제어되면 실제 단자전압 V_a 는 정상상태에서 V_{am} 내에서 항상 유지되어야 한다.

기저속도를 초과하여 CPR 영역으로 진입하면 Fig. 3의 시스템 블록도에서 i_d^* 는 식(10)을 사용하여 제어한다.

4. 시스템 운전과 성능 결과

4.1. 시스템의 운전

본 연구에서 사용한 PMSM의 파라미터는 Table 1과 같다.

PMSM 드라이브 시스템의 최대 토크제어를 위한 제어 블록도는 Fig. 4와 같다.

PMSM의 속도를 영에서 기저속도까지는 식(8)에서 i_d^* 를 구하여 운전한다. 이는 CTR 영역의 운전으로 MTPA 제어가 수행된다. 기저속도 이상에서는 식(10)에서 i_d^* 를 구하여 운전하며 이 CPR 영역에서는 최대 토크제어가 수행된다.

4.2. 결과 및 고찰

Fig. 5는 부하토크를 1.5[N·m]로 인가한 상태에서 0.25[sec]에서 지령속도 4800[rpm]으로 상승하였을 경우 확장된 속도영역에서의 동작특성을 나타낸다. Fig. (a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 q 축 전류, (c)는 d 축 전류 및 (d)는 발생토크를 나타낸다. 기저속도 이하인 CTR 영역에서는 MTPA로 운전하고 기

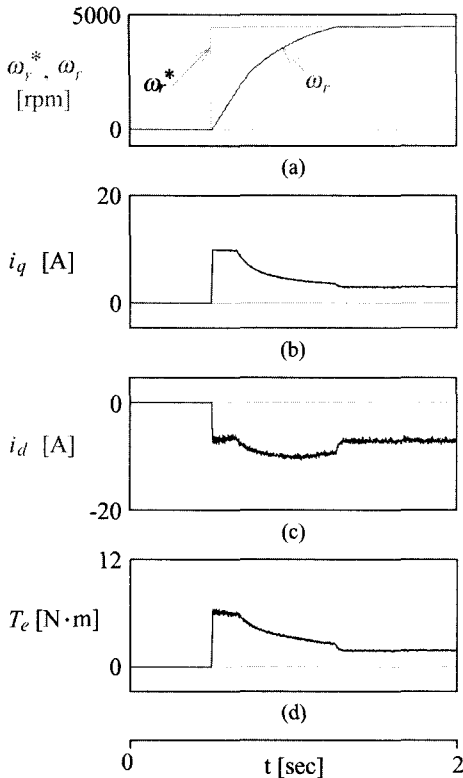


Fig. 5. Response with step command speed

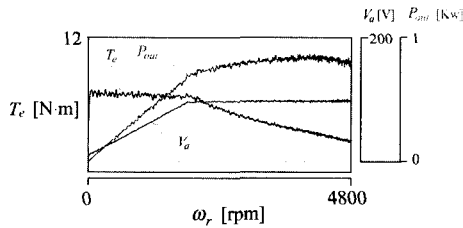


Fig. 6. Response of torque, power and armature voltage

저속도 이상인 CPR 영역에서는 최대토크로 운전한 응답결과이다. CPR는 실제 속도가 1800[rpm]이상에서 시작되며 d 축 전류가 감소하므로 약계자 제어가 수행되고 있다. 4800[rpm]에서는 기저속도의 3배의 속도이며 확장된 속도영역에서 응답특성의 결과는 양호하게 나타난다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 운전할 경우에 속도에 대한 토크, 출력 및 전기자전압의 응답특성을 나타낸다.

Fig. 7은 지령속도의 스텝변화에 대한 과도응답을 나타낸다. 0에서 기저속도인 1800[rpm]까지 CTR 영역에서는 점 A 근방에서 운전되고 CPR 영역에서

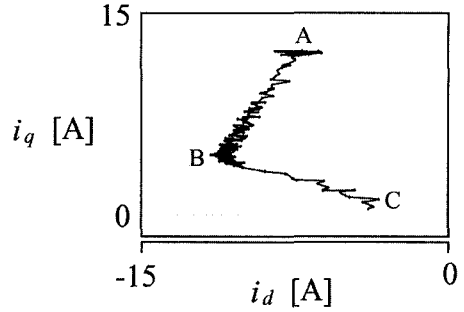


Fig. 7. Transient response for step change of command speed

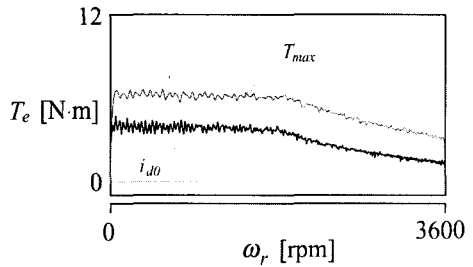


Fig. 8. Torque comparison of T_{max} and i_{d0}

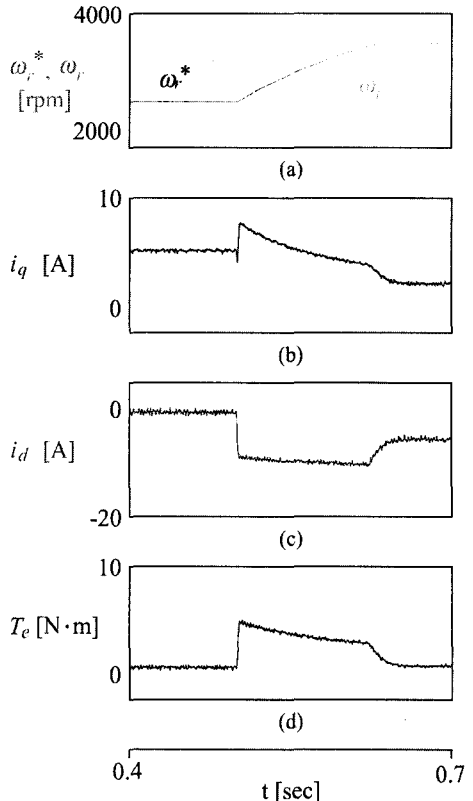


Fig. 9. Response of speed variation

약계자 제어가 시작되면 속도가 증가하면 점 B로 이동한다. 이 경우 d 와 q 축 전류는 감소하게 된다. 3600[rpm]이상의 고속에서는 고정자전류가 감소하고 있다.

Fig. 8은 본 논문에서 제시한 최대 토크제어와 종래의 $i_d=0$ 제어방법의 토크를 비교한 결과이다. 본 연구에서 제시한 방법이 종래의 방법보다 CTR와 CPR 영역에서 토크가 매우 상승된 응답성능이 나타난다. CTR에서 MTPA 제어가 수행되고 CPR에서는 전압과 전류의 조건을 고려하여 동작하는 속도에서 최대토크로 운전한 결과이다.

Fig. 9는 부하토크 1[N·m]에서 2500[rpm]으로 운전 중 0.5[sec]에서 3500[rpm]으로 속도를 증가하였을 때의 응답특성을 나타낸다.

Fig. 10은 무부하 상태에서 2500[rpm]으로 운전 중 0.5-0.8[sec]에서 부하토크를 2[N·m]로 스텝으로 인가할 경우에 응답특성을 나타낸다. CPR 영역에서 속도 및 토크 변화를 변화할 경우에도 본 논문에서 제시한 최대 토크제어가 약계자 제어를 효율적으로 수행하며 응답특성이 양호하게 나타난다.

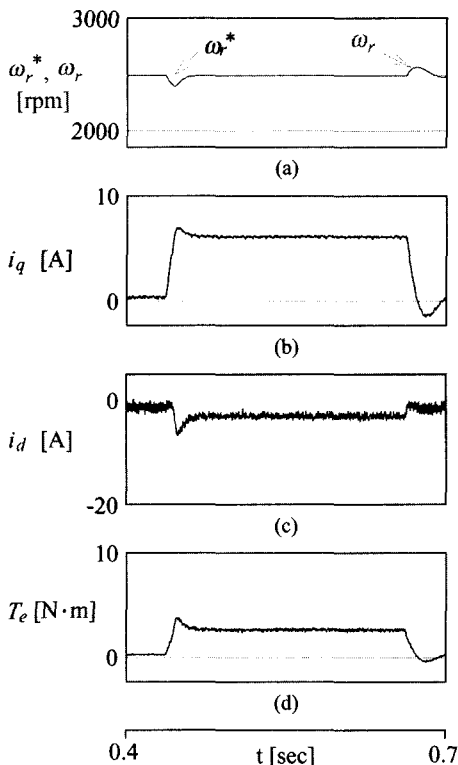


Fig. 10. Response with step load torque

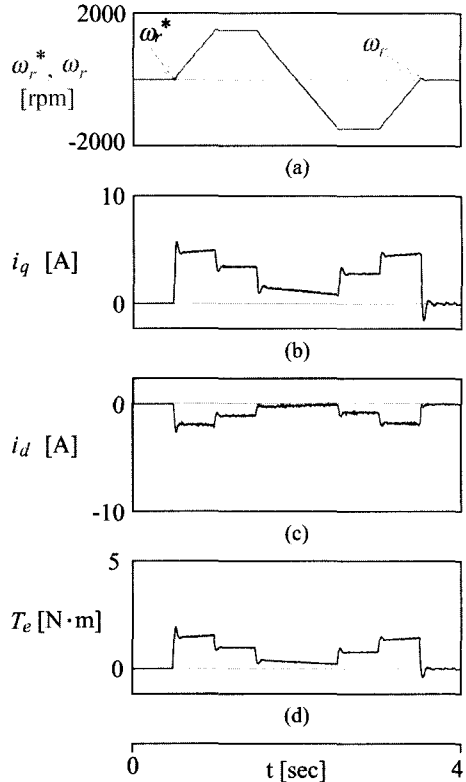


Fig. 11. Response with four quadrant operation

Fig. 11은 4상한 운전의 경우에 부하토크를 1[N·m] 인가한 상태에서 나타나는 응답특성이며 응답특성의 결과는 양호하게 나타난다.

5. 결론

본 논문에서는 PMSM 드라이브의 최대토크를 제어하기 위하여 d 와 q 축 전류의 최적 구성을 선정하는 방법을 제시하였다. 저속에서는 MTPA를 최적화하는 제어가 가능하였고 고속에서는 약계자제어 및 최대 토크제어가 가능하였다. 지령속도의 변화와 부하토크의 변동에서 본 연구의 최대 토크제어가 종래의 i_{d0} 방법 보다 성능이 양호하게 나타났다. 그리고 4상한 운전의 결과에서도 응답특성은 양호하게 나타났다.

본 연구에서 제시한 제어기법이 종래의 i_{d0} 제어보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA 제어와 CPR에서 약계자 제어가 양호하게 수행하여 최대토크를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 최대 토크제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000-00301-0(2002)) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) M. Bilewski, et al., "Control of high performance interior PM synchronous drives," IEEE Trans. on IA, vol. 29, no. 2, pp. 328-337, 1993.
- 2) P. Pillay and R. Krishan, "Modeling, analysis and simulation of permanent magnet synchronous drives, Part I" IEEE IA, vol. 25, no. 2, pp. 265-273, 1989.
- 3) B. K. Bose, "A high performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machines," IEEE Trans. IA., vol. 24, pp. 142-150, 1988.
- 4) S. R. MacMinn and T. M. Jahns, "Control techniques for improved high performance of interior PM synchronous motor drives," IEEE Trans. IA., vol. 27, pp. 997-1004, 1991.
- 5) S. Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator," IEEE Trans. IA., vol. 30, pp. 920-926, 1994.