

광범위한 속도영역의 운전을 위한 IPMSM의 순시 토크제어

이정철, 이홍균, 정택기, 정동화  
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Instantaneous Torque Control of IPMSM for Drive of Wide Speed Range

Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Tack-Gi Jung, Dong-Hwa Chung  
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

**Abstract** - The paper is proposed instantaneous torque control of IPMSM for drive of wide speed range. The control scheme is based on the mathematical model of the motor and is applicable to the constant torque and field weakening operations. The scheme allows the motor to be driven with maximum torque per ampere(MTPA) characteristic below base speed and it maintains the maximum voltage limit of the motor wide field weakening and the motor current limit under all conditions of operation accurately. For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current  $i_d$  for maximum torque operation is derived.

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

1. 서 론

최근, IPMSM(Interior Permanent Magnet Motor)는 일정 토크동작이 요구되는 서보 드라이브 및 일정 전력동작이 요구되는 전기자동차와 스핀들 드라이브 등 산업용 드라이브 분야에 다양하게 적용되고 있다. IPMSM은 영구자석을 회전자 철심에 매입하여 기계적으로 강인한 회전자 구조로 되어 있다. 그리고 회전자는 돌극성이고 유효 공극은 작아 전기자반작용 효과가 현저한 장점이 있으나 자속의 직접제어가 불가능하다. 이러한 특성 때문에 일정 토크영역과 자속을 감소시켜 고속까지 운전할 수 있는 일정 전력영역에서 용이하게 동작할 수 없다. 그러나 공극자속을 d축 전기자반작용에 의한 감자작용의 영향에 의해 약화시킬 수 있는 약제자 제어가 가능하다.[1]

고속과 과도동작에서 동작조건은 dq축 전류에 의존하며 이 전류의 조합을 적절하게 선정하여 제어하면 최대 토크를 얻을 수 있다. 기저속도 이하에서는 MTPA(Maximum Torque per Ampere)에서 동작시키고 기저속도 이상이 되면 약제자 제어를 수행하며 최대 전압한계 내에서 최대 토크로 운전이 가능하다. Morimoto는 피드포워드 비간섭 제어기에 의해 전압보상기와 전류제어기를 약제자 운전을 위하여 제시하였다.[2] 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. Krishnan은 약제자와 토크를 동시제어[3] 및 Zhu는

온라인으로 수행되는 최적 약제자 제어[4] 등을 제시하였으나 토크제어는 dq축 전류평면의 관점에서 접근하였다. 이러한 토크제어는 전기자전류의 제어에 기초하며 토크 식은 비선형으로 나타므로 토크와 속도 제어기의 출력 사이의 관계도 비선형이다. 따라서 토크와 d축 전류에 관계된 식을 변형하여 선형화하고 토크와 공극자속을 직접제어할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 광범위한 속도영역의 운전을 위하여 IPMSM의 순시 토크제어를 제시한다. 토크와 속도 제어기의 출력 사이에 선형관계를 유지하는 동시에 순시 토크제어가 가능하다. 종래의 dq축 전류평면을 변환하여 토크와 d축 전류평면에서 토크의 최대조건을 구한다. 본 논문에서 제시한 순시 토크제어로 IPMSM에 적용하여 다양한 응답성능을 분석하고 타당성을 입증한다.

2. 전류평면에서 제어레직

2.1 CTR에서 운전

기저속도 이하에서 전동기의 토크는 주로 최대의 인버터전류에 의해 제한된다. 주어진 전류레벨에서 출력 토크를 최대화하는 방법이 중요하다. 전압과 전류의 제한에 도달하지 않을 경우에도 인버터와 전동기의 손실이 최소가 되는 점에서 요구되는 출력토크를 얻기 위하여 d와 q축 전류의 조합을 적절하게 선정하여 기준전류를 발생시켜야 한다. CTR(Constant Torque Region) 영역에서는 MTPA를 발생하기 위하여 전류벡터를 제어한다.

IPMSM이 인버터에 의하여 구동될 경우 전기자 전류와 전압은 인버터 전류와 DC 링크전압의 정격을 초과하지 않는 범위에서 제어해야 한다. 따라서 전압과 전류조건은 다음 식과 같다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \tag{1}$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \tag{2}$$

여기서,  $I_{am}$ 과  $V_{am}$ 은 전동기와 인버터에서 이용 가능한 최대 전류와 전압을 나타낸다.

발생토크는 돌극에 의해 발생하는 영구자석의 자속과 리플턴스 토크에 의한 전자기적 토크로 구성되어 있다. 이러한 토크의 두 성분은 고 토크와 고 효율을 위하여 적절하게 제어할 수 있다. 토크식 식4에서 MTPA 제어를 위한  $i_d$ 와  $i_q$  사이의 관계를 구한다. 고정자전류는  $i_s$ 는  $i_d$ 와  $i_q$ 로 표현하면 식5와 같다.

$$T_e = P_n [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{3}$$

$$i_s^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (4)$$

식(4)에서  $i_q$ 를 구하고 이를 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = P_n[\phi_a \sqrt{i_s^2 - i_d^2} + (L_d - L_q)i_d \cdot \sqrt{i_s^2 - i_d^2}] \quad (5)$$

최대토크가 되기 위한 조건은 토크 식을  $d$ 축 전류로 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_d} = 0 \quad (6)$$

이 식의 조건에서 다음 식을 얻는다.

$$-P_n \phi_a i_d + P_n(L_d - L_q)(i_s^2 - i_d^2) = 0 \quad (7)$$

식(7)에서  $i_d$ 를 구하면 다음과 같다.

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

## 2.2 CPR에서 운전

전압제한 조건을 다시 표현한다.

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

식(9)의 조건을 이용하면 정상상태에서 전압방정식에서 다음 식을 얻는다.

$$v_{d0} = -\omega_r L_q i_q \quad (10)$$

$$v_{q0} = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (11)$$

$$V_{0m} = V_{am} - R I_{am} \quad (12)$$

식(11)과 (12)을 식(9)에 대입하여  $i_d$ 를 구한다.

$$i_d = \frac{1}{L_d} \left[ -\phi_a + \sqrt{\frac{V_{0m}^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \right] \quad (13)$$

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

식(1)에서  $i_q^*$ 를 구하면 다음과 같다.

$$i_q^* = \sqrt{I_{am}^2 - i_d^{*2}} \quad (14)$$

제어의 구현은 식(8), (13) 및 (14)로부터 지령전류의 실시간 계산에 기초한다. 기저속도 이하에서는 MTPA 제어에 의해 이용 가능한 최대 토크를 얻을 수 있으며 기저속도 이상에서는 최대 전압한계 내에서 CPR에서 동작한다.

## 3. 순시토크제어

전기자전류의 제어에 의해 전동기 토크의 제어는 식(3)에 기초하며 이는 비선형이다. 따라서 속도 제어기의 출력과 토크 사이의 관계도 비선형이다.

식(7)에서  $i_q$ 를 구한다.

$$i_q = \sqrt{i_d^2 + \frac{\phi_a i_d}{L_d - L_q}} \quad (15)$$

식(15)를 식(3)에 대입하여  $T_e \rightarrow T_e^*$ ,  $i_d \rightarrow i_d^*$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$T_e^* = P_n \sqrt{i_d^{*2} + \frac{\phi_a i_d^*}{L_d - L_q}} [\phi_a + (L_d - L_q)i_d^*] \quad (16)$$

식(16)을 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e^* = P_n \sqrt{I_{am}^2 - i_d^{*2}} [\phi_a + (L_d - L_q)i_d^*] \quad (17)$$

식(9)에서  $i_q$ 를 구한다.

$$i_q = \frac{1}{L_q} \sqrt{\left( \frac{V_{0m}^2}{\omega_r} \right)^2 - (L_d i_d^* + \phi_a)^2} \quad (18)$$

식(18)을 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e^* = P_n \cdot \frac{1}{L_q} \sqrt{\left( \frac{V_{0m}^2}{\omega_r} \right)^2 - (L_d i_d^* + \phi_a)^2} \cdot [\phi_a + (L_d - L_q)i_d^*] \quad (19)$$

식(16)과 (19)는  $i_d^*$ 에 대한 4차 방정식으로 나타난다.

$$a i_d^{*4} + b i_d^{*3} + c i_d^{*2} + d i_d^* + e = 0 \quad (20)$$

식(17)에서 계산한 파라미터는 다음과 같다.

$$a = (L_d - L_q)^2, \quad b = 3\phi_a(L_d - L_q), \quad c = 3\phi_a^2,$$

$$d = \frac{\phi_a^3}{(L_d - L_q)}, \quad e = -\left( \frac{T_e^*}{P_n} \right)^2 \quad (21)$$

식(19)에서 계산한 파라미터는 다음과 같다.

$$a = I_d^2 (L_d - L_q)^2, \quad b = 2I_d^2 (L_d - L_q)\phi_a + 2L_d(L_d - L_q)^2\phi_a,$$

$$c = L_d^2\phi_a^2 + 4L_d(L_d - L_q)\phi_a^2 + \phi_a^2(L_d - L_q)^2 - (L_d - L_q)^2 \left( \frac{V_{0m}}{\omega_r} \right)^2,$$

$$d = 2L_d\phi_a^3 + 2(L_d - L_q)\phi_a^3 - 2\phi_a(L_d - L_q) \left( \frac{V_{0m}}{\omega_r} \right)^2$$

$$e = \phi_a^4 + \left( \frac{T_e^* L_q}{P_n} \right)^2 - \phi_a^2 \left( \frac{V_{0m}}{\omega_r} \right)^2 \quad (22)$$

식(20)은 식(17)과 (19)에서 구할 수 있다. 식(21)은 CTR, 식(22)는 CPR에 적용하여 4차 NR(Newton-Raphson) 반복법으로  $i_d^*$ 를 구한다.

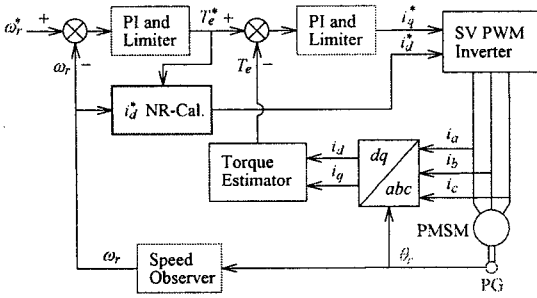


그림 1 제시한 제어 시스템의 블록도

토크 추정자는 다음과 같다.

$$T_e = P_n(\phi_d i_d - \phi_q i_q) \quad (23)$$

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_a \quad (24)$$

$$\phi_q = L_q i_q \quad (25)$$

## 4. 시스템 성능 결과

### 4.1 시스템의 운전

PMSM의 속도를 영에서 기저속도까지 모드 I에서는 식(21)의 파라미터로  $i_d^*$ 를 구하여 운전한다. 이는 CTR 영역의 운전으로 MTPA 제어가 수행된다. 기저속도 이상에서 모드 II에서 식(22)로  $i_d^*$ 를 구하여 운전하며 이 FWR 영역에서는 최대 토크제어가 수행된다.

### 4.2 결과 및 고찰

그림 2은 종래의  $i_d=0$  제어방법에 의한 결과이다. 0.5[sec]에서 지령속도 3600[rpm]으로 운전중 1.5[sec]에서 부하토크를 4[N·m]을 인가 하였을 경우 확장된 속도영역에서의 동작특성을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는  $q$ 축 전류, (c)는  $d$ 축 전류 및 (d)는 발생토크를 나타낸다.

그림 3는 그림 2과 같은 조건으로 본 논문에서 제시한 제어방법에 의한 결과이다. 그림(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 기저속도 이상인 CPR 영역에서는 최대토크로 운전한 응답결과이다. CPR는 실제 속도가 1800[rpm]이상에서 시작되며  $d$ 축 전류가 감소하므로 약제자 제어가 수행되고 있다. 3600[rpm]에서는 기저속도의 2배의 속도이며 확장된 속도영역에서 응답특성의 결과는 양호하게 나타난다.

그림 4와 5는 그림 2와 3에서 본 논문에서 제시한 최대 토크제어와 종래의  $i_d=0$  제어방법에서 속도와  $d$ 축 전류를 비교한 결과로 그림 4는 과도상태에 대한 비교이고 그림5은 부하응답에 대한 비교 결과이다. 본 연구에서 제시한 방법이 종래의 방법보다 속도가 매우 상승되고 부하응답에도 양호한 응답특성이 나타났다. CTR에서 MTPA 제어가 수행되고 CPR에서는 전압과 전류의 조건을 고려하여 동작하는 속도에서 최대토크로 운전한 결과이다.

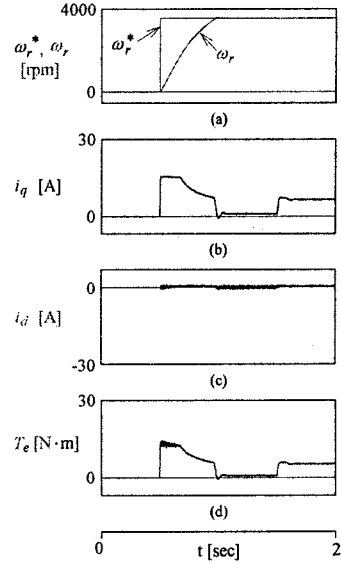


그림 2  $I_d=0$ 제어의 응답특성

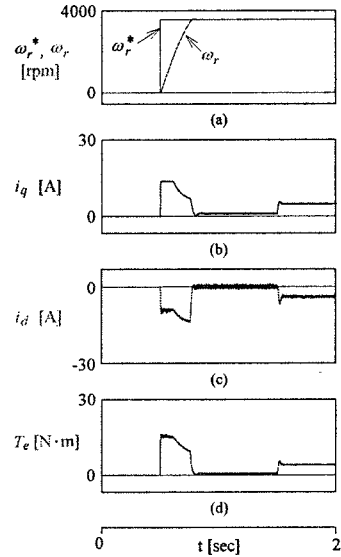


그림 3 최대토크제어의 응답특성

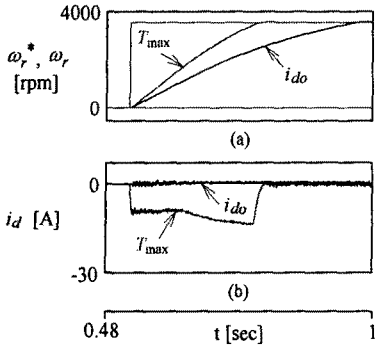


그림 4 스텝속도변화에 대한 응답 비교

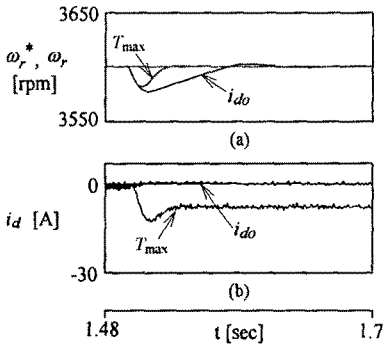


그림 5 스텝 부하변화에 대한 응답 비교

## 5. 결론

본 논문에서는 광범위한 속도영역의 운전을 위한 IPMSM의 순시 토크제어를 제시하였다. 최대토크로 제어하기 위하여  $d$ 와  $q$ 축 전류의 최적 구성을 선정하는 방법을 제시하여 최적전류를 구하였다. 기저속도 이하인 저속에서는 MTPA 제어가 가능하였고 고속에서는 약제자 제어가 가능하였으며 응답특성에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 지령속도를 스텝으로 인가하였을 때 CTR와 FWR의 응답특성이 양호하게 나타났으며 약제자 제어가 양호하게 수행되었다.
- (2) 속도에 따른 토크는 본 논문에서 제시한 기법이 종래의  $i_{d0}$  방법보다 매우 크게 상승된 결과로 나타났다.
- (3) CTR에서 MTPA 제어가 가능하였으며 FWR에서는 전압과 전류의 조건을 고려하여 동작하는 속도에서 최대토크를 얻을 수 있었다.
- (4) 속도 및 부하토크의 변동에도 응답특성은 양호하게 나타났다.

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

- [1] S. R. Macmin and T. M. Jahns, "Control technique for interior high speed performance of interior PM synchronous motor drives," IEEE Trans. IA, vol. 27, no. 5, pp. 997-1004, 1991.
- [2] 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.
- [3] R. Monajemy and R. Krishnan, "Implementation strategies for concurrent flux weakening and torque control of the PM synchronous motor," in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meet., vol. 1, pp. 238-245, 1995.
- [4] Z. Q. Zhu, Y. S. Chen and D. Howe, "Online optimal flux weakening control of permanent magnet brushless AC drives," IEEE Trans. on IA vol. 36, no. 6, pp. 1661-1668, 2000.