

PMSM 드라이브의 약계자 운전을 위한 속도제어

이정철, 이홍균, 정택기, 정동화

순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Speed Control for Field Weakening Operation of PMSM Drive

Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Tack-Gi Jung, Dong-Hwa Chung

School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

ABSTRACT

This paper is proposed maximum torque control for electric vehicle 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.

1. 서론

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. PMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하고 돌극성을 가지고 있으며 효율적인 공극으로 되어 있지 않는 단점으로 일정 토크영역에서 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.[1]-[2]

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

그림 1은 전동기가 정방향으로 운전될 경우 토크-속도 곡선을 나타낸다.

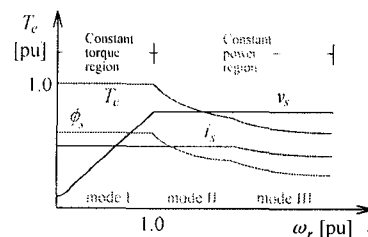


그림 1 정방향 전동기 운전에서 토크-속도 곡선
Fig. 1 Torque-speed curve in forward motoring

그림 2는 전류와 전압 한계조건에서 전류궤적을 i_d-i_q 평면에 도시하면 성능을 파악할 수 있다.

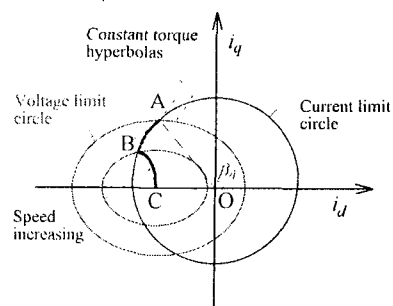


그림 2 i_d-i_q 평면에서 전류궤적
Fig. 2 Current locus in i_d-i_q plane

3. 최대 토크제어

3.1 CTR에서 운전

전압과 전류의 조건을 고려하면 전기자전류 및 단자전압은 다음과 같이 제한된다.

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

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

PMSM의 돌극성이 있는 전동기는 $L_d < L_q$ 의 조건이 있으므로 리럭턴스 토크를 이용한다. CTR 영역에서는 MTPA를 발생하기 위하여 전류벡터를 제어한다.

고정자전류 i_s 는 i_d 와 i_q 로 표현하면 다음과 같다.

$$i_s^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (3)$$

식 (3)을 토크식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = P_n [\phi_a \sqrt{i_s^2 - i_d^2} + (L_d - L_q) i_d] \sqrt{i_s^2 - i_d^2} \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_d} = 0 \quad (5)$$

식 (5)을 만족하는 i_d 를 구하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{-\phi_a + \sqrt{\phi_a^2 + 4 \cdot (L_d - L_q)^2 \cdot i_s^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (6)$$

3.2 CPR에서 운전

최대 설정토크에서 전동기를 가속할 경우 기저속도 근방에서는 SV PWM 인버터에 의해 공급되지 않는 요구 전압에 도달한다. 낮은 출력 또는 음 출력에서는 배터리 전압은 높고 단지 d 축 전류만 필요로 한다. 매우 큰 양 출력에서 배터리 전압은 더욱 작아져 악화되며 이럴 경우에 매우 큰 d 축 전류가 필요하다.

고속과 저 배터리 전압에서 고 전력으로 드라이브를 운전할 경우 출력전압을 제한해야 한다. 인버터에서 전동기에 공급되는 최대전압 V_{om} 은 배터리 전압과 PWM 방식에 의해 제한된다. 전압제한을 방지하기 위하여 요구전압의 크기를 제한치 내에서 동작하도록 하고 기준전류의 발생은 d 축 전류를 감소시켜야 한다.

CPR 영역에서 제어 알고리즘을 간단하게 처리하기 위하여 전압조건을 식 (2) 대신에 다음 식을 이용한다.

$$V_o = \sqrt{v_{d0}^2 + v_{q0}^2} \leq V_{om} \quad (7)$$

식 (7)의 조건을 이용하면 다음 식을 얻는다.

$$v_{d0} = -\omega_r L_q i_q \quad (8)$$

$$v_{q0} = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (9)$$

$$V_{om} = V_{am} - R I_{am} \quad (10)$$

전류의 d 와 q 축 성분은 CPR 영역에서 V_o 가 V_{om} 과 같은 값으로 유지하기 위하여 제어한다. CPR 영역에서 i_d 와 i_q 의 관계는 식 (8)-(10)에서 유도할 수 있다.

$$i_d = -\frac{1}{L_d} \left[-\phi_a + \sqrt{\frac{V_{om}^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \right] \quad (11)$$

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

전류벡터가 식 (11)에 의해 제어되면 실제 단자전압 V_a 는 정상상태에서 V_{om} 내에서 항상 유지되어야 한다.

4. 시스템 운전과 성능 결과

PMSM 드라이브 시스템의 최대 토크제어를 위한 제어 블록도는 그림 3와 같다.

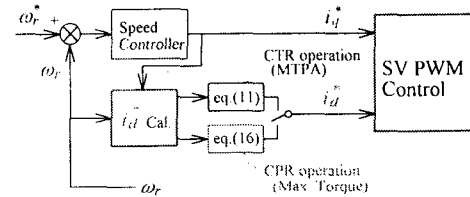


그림 3 시스템의 제어 블록도

Fig. 3 Control Block diagram of system

PMSM의 속도를 영에서 기저속도까지는 식 (3)에서 i_d^* 를 구하여 운전한다. 이는 CTR 영역의 운전으로 MTPA 제어가 수행된다. 기저속도 이상에서는 식 (8)에서 i_d^* 를 구하여 운전하며 이 CPR 영역에서는 최대 토크제어가 수행된다.

그림 4는 부하토크를 1.5[N·m]로 인가한 상태에서 0.25[sec]에서 지령속도 4800[rpm]으로 상승하였을 경우 확장된 속도영역에서의 동작특성을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 d 축 전류, (c)는 q 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 약계자 제어가 수행되고 있다. 4800[rpm]에서는 기저속도의 3배의 속도이며 확장된 속도영역에

서 응답특성의 결과는 양호하게 나타난다.

그림 5는 그림 4와 같은 조건에서 운전할 경우에 나타나는 토크, 출력 및 전기자 전압의 응답특성을 나타낸다.

그림 6는 본 논문에서 제시한 최대 토크제어와 종래의 $i_d=0$ 제어방법의 토크를 비교한 결과이다.

그림 7은 무부하 상태에서 2500[rpm]으로 운전 중 0.5-0.8[sec]에서 부하토크를 $2[N \cdot m]$ 로 스텝으로 인가할 경우에 응답특성을 나타낸다.

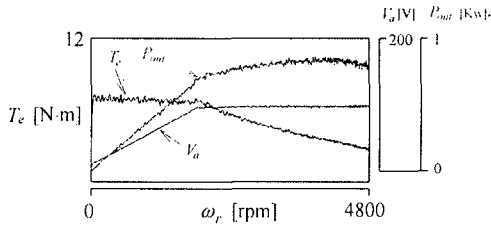


그림 5 토크, 출력 및 전기자 전압의 응답
Fig. 5 Response of torque, power and amature voltage

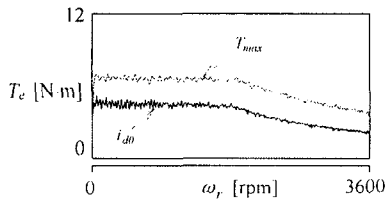


그림 6 T_{max} 와 I_{d0} 방법의 토크 비교
Fig. 6 Torque comparison of T_{max} and I_{d0}

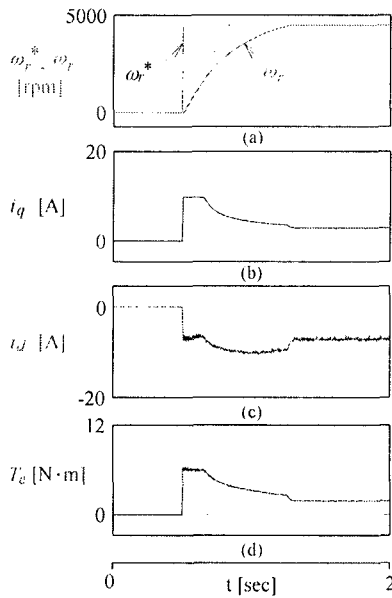


그림 4 스텝 지령속도에 대한 응답
Fig. 4 Response with step command speed

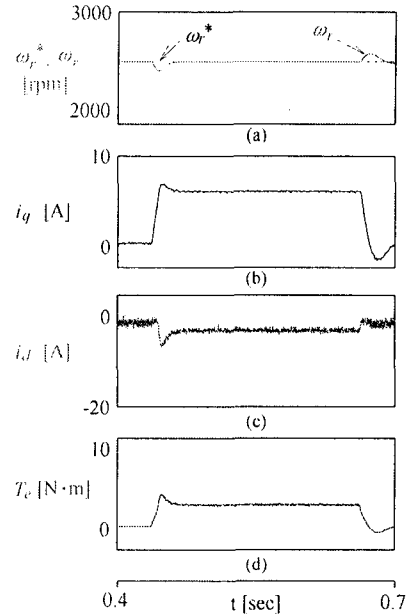


그림 7 스텝 부하토크에 대한 응답
Fig. 7 Response with step load torque

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 가능하였으며 본 연구에서 제시한 제어방법이 종래의 i_{d0} 제어 보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA제어와 CPR에서 약계자 제어가 양호하게 수행하여 최대토크를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 최대 토크제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.