

영구자석형 동기전동기의 약계자제에 관한 연구

\*이철균  
서울대학교

원종수  
서울대학교

A study on Field-Weakening Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

Lee cheol-gyun  
S. N. U.

Won jong-soo  
S. N. U.

ABSTRACT

A permanent magnet synchronous motor(PMSM) differs from an ordinary synchronous motor in that the former has no field winding and the field flux can not be controlled by field current. A field-weakening control of PMSM utilizing the demagnetization due to d-axis armature reaction is equivalent to reducing the field current. In this paper, the armature resistance is considered for the optimum field-weakening control.

I. 서론

인버터로 구동되는 영구자석형 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)의 운전 가능 영역은 모터의 정격과 인버터의 최대 출력 전압, 전류에 의해 결정된다. 즉 어떤 일정한 토크에서의 최대속도는 속도에 의한 역기전력이 인버터의 공급 가능 전압과 맞서게 되어 전류제어기(current regulator)를 포화시키지 않는 한도내의 속도이다. 전류제어기가 포화되면 필요한 전류를 흐르게 할 수 있는 능력을 잃어버린다. 그러나, d축전기자 반작용을 이용해 공극의 자속을 감소시켜 필요한 전기자 단자전압을 인버터의 최대출력전압 이내로 조정하는데 이것을 약계자제(Field Weakening Control)라 말한다.

기존의 약계자제 방법들은 필요한 d축 전기자전류를 간단히 계산하기 위해 전기자 저항에 의한 전압강하를 무시한다. 그러나, 이것을 무시하면 필요한 d축 전류를 정확히 계산하지 못하여 전류제어기의 포화를 완전히 막지 못한다. 그 결과 제어 시스템의 응답성이 저하된다. 그러므로, 본 논문에서는 전기자 저항을 고려하여 전류제어기의 포화를 막아 제어 시스템의 전류, 속도응답성을 개선하였다.

II. 영구자석형 동기전동기의 전압방정식

rotor의 d-q축으로 변환한 stator의 정상상태 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L_q \\ \omega L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \phi_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서,  $L_d, L_q$ : d, q축 인덕턴스
- $V_d, V_q$ : d, q축 전기자전압
- $i_d, i_q$ : d, q축 전기자전류
- $R$  : 1상당 전기자저항
- $\phi_m$  : 영구자석에 의한 전기자 쇄 자속
- $\omega$  : 전기각속도
- $\omega_m$  : 기계각속도

d축은 회전자의 자석에서 발생하는 자속을 기준으로 한다. q축은 d축에서 전기각으로 90° 떨어져 있는 곳이다. 그림 1과 같이 자석이 회전자의 표면에 돌출되어 있는 surface type permanent magnet (SPM) motor에서는 페라이트와 같은 영구자석재료의 투자율이 공극의 투자율과 거의 같기 때문에 d축과 q축의 전기자 인덕턴스가 같다고 보아도 무방하다.

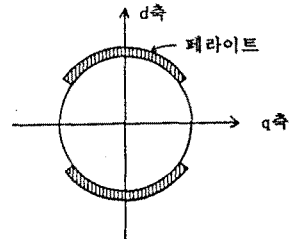


그림 1. surface type PMSM의 회전자

그리고, PMSM의 토크식은 다음과 같이 표현된다.

$$T = 3/2 * P * [\phi_m * (L_d - L_q) * i_d] * i_q \quad (2)$$

그런데, surface type PMSM에서는  $L_d = L_q$  이므로 토크 성분은 존재하지 않아 토크는

$$T = 3/2 * P * \phi_m * i_q \quad (3)$$

로 표현된다. 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 단위전류당 최대토크를 얻기 위해서는 q-축전류만 흘려 주어야 한다. d-축 전류도 존재하는 경우, PMSM의 기본 벡터도는 그림 2와 같다.

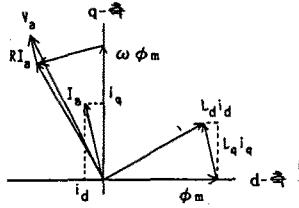


그림 2. PMSM의 기본 벡터도

III. Field Weakening Control

(1) PMSM의 전압, 전류 제한

인버터에 의해 구동되는 PMSM은 전기자전류  $I_a$ , 단자 전압  $V_a$ 에는 제한이 있다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{lim} \quad (4)$$

$$V_a = \sqrt{(\omega\phi_m + \omega L_d i_d + R_i i_q)^2 + (R_i i_d - \omega L_q i_q)^2} \leq V_{lim} \quad (5)$$

전류 제한  $I_{lim}$ 은 모터의 연속 정격전류와 인버터의 출력 가능 전류로 결정된다. 전압 제한  $V_{lim}$ 은 인버터의 최대 출력 전압에 의해 결정된다.

(2) d축 전류의 필요성

PMSM에서는 모터의 속도를 증가시키려면 전기자 단자 전압을 증가시켜야 한다. 그리고, 여기전력이 인버터의 최대 출력 전압과 맞서는 속도 이상에서는 전류제어의 포화를 막기 위해 전기자의 d축 감자작용을 이용해 공극의 자속을 감소시켜 필요한 단자전압을 최대 출력 전압이내로 조정한다. d축 총자속은  $\lambda_d = \phi_m + L_d i_d$ 로 표현되는데, 음의 d축 전류가 흐르면 d축 총자속이 감소되는것을 의미한다.

그림 3의 전압 벡터도에서 부하가 일정한 경우, 속도가 증가함에 따라 일정한 전류  $i_q$ 를 흘리려고 하면 전압 벡터  $V_o$ 는 전압제한  $V_{lim}$ 을 넘어서게 된다. 그러나, 이때 d축 전류를 흘려줌으로써 전압벡터  $V$ 를 그림 3과 같이  $V_{lim}$ 를 넘지 않게 만들 수 있다.

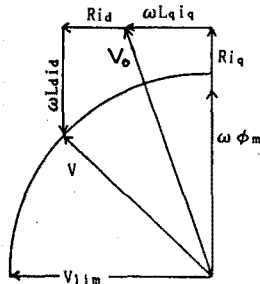


그림 3. 전압 벡터도

(3) 저항을 무시한 경우의 약계자제어

전기자 전압 방정식에서 저항에 의한 전압성분이 리액턴스에 의한 전압성분에 비해 작다고 보고 무시하면 전압 방정식은,

$$V_a = \sqrt{(\omega\phi_m + \omega L_d i_d)^2 + (\omega L_q i_q)^2} \quad (6)$$

로 표현이 된다.  $V_a = V_{lim}$  일때의  $i_d, i_q$ 의 관계는 다음

과 같이 표현된다.

$$\left( \frac{V_{lim}}{\omega L_q} \right)^2 = i_q^2 + \left( i_d + \frac{\phi_m}{L_d} \right)^2 \quad (7)$$

또, 식 (4)에서  $I_a = I_{lim}$  일때의  $i_d$ 와  $i_q$ 의 관계는 식 (8)과 같이 된다.

$$I_{lim}^2 = i_q^2 + i_d^2 \quad (8)$$

정격 이상의 속도에서 필요한  $i_d$ 값은 전압 제한 궤적과 전류 제한 궤적이 만나는 점으로 결정하는데 식 (8)을 식 (7)에 대입하여 구한다.

$$i_d = \frac{(V_{lim}/\omega)^2 - (\phi_m)^2 - (L_d * I_{lim})^2}{2 * \phi_m * L_d} \quad (9)$$

식 (7), (8)를  $i_d-i_q$ 평면에 나타내면 그림 4와 같이 된다. 식 (7)과 그림 (4)에서 알수 있듯이 속도가 증가함에 따라 ( $\omega_1 \rightarrow \omega_2$ ) 전압 제한 궤적의 반지름이 줄어들게 된다. 어떤 속도에서의 순시전류벡터  $i_a$ 는 전압, 전류 제한 궤적내에 존재하여야 한다. 그림 4에서  $\omega_1$ 은 d축 전기자 전류가 필요하지 않은 속도의 한계이다. 이 속도까지는 단 위전류당 최대의 토크를 위해 q축 전류만 흘린다.

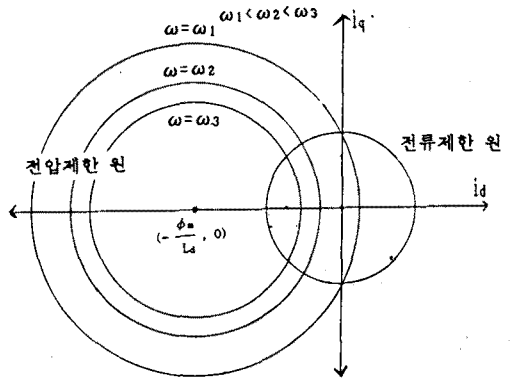


그림 4. 전류, 전압 제한 궤적

d축 전류를 흘리는 경우 모터의 운전 가능 영역이 정격 이상의 속도까지 확장되는데, 이것을 그림 5에 나타내었다.

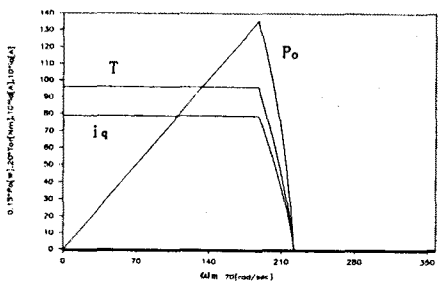


그림 5(a). 비약계자제어에 의한 전류, 토크, 출력특성

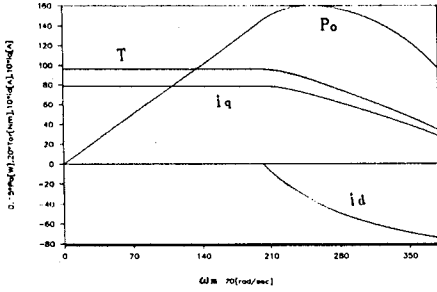


그림 5(b). 약계자제어에 의한 전류, 토크, 출력특성

(4) 저항성분을 고려한 약계자제어

그림 3의  $V_d-V_q$  평면의 전압제한 벡터를 다시 그리면 그림 6와 같다.

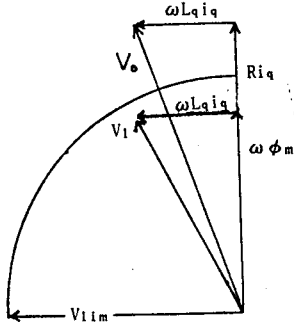


그림 6. 전압 벡터도

저항에 의한 전압 강하가 리액턴스에 의한 전압강하에 비해 작지만 그림 6에서 보듯이 저항성분을 고려하지 않으면, 전압벡터  $V_0$ 가  $V_{lim}$ 를 넘어섰는데도  $V_1$ 으로 판단하므로 전류제어의 포화를 초래한다.

식(5)의 전압방정식에서 저항에 의한 성분( $V_{corr.}$ )을 고려하기 위해 따로 분리하면,

$$V_a = \sqrt{(\omega L q i_q)^2 + (\omega L d i_d + \omega \phi_m)^2} + \frac{R^2(i_d^2 + i_q^2) + 2R\omega i_q \phi_m}{2\omega \phi_m} \quad (5-1)$$

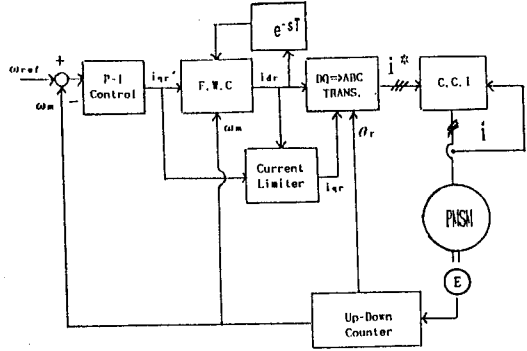
$$V_{corr.} = R^2(i_d^2 + i_q^2) + 2R\omega i_q \phi_m \quad (10)$$

그러므로, 저항을 고려하는 경우에는 식 (9)의  $V_{lim}$  대신  $\sqrt{V_{lim}^2 - V_{corr.}}$  으로 교체하여 약계자제어시 필요한  $i_d$  값을 구한다.

$$i_d = \frac{(\sqrt{V_{lim}^2 - V_{corr.}}/\omega)^2 - (\phi_m)^2 - (L_d * I_{lim})^2}{2 * \phi_m * L_d} \quad (11)$$

Field Weakening Control을 위한 시스템은 그림 7과 같다. 전류제어기는 Hysteresis controller를 사용하였다. 속도지령  $\omega_{ref}$ 와 피드백된 회전자의 실제 속도  $\omega_m$ 과의 차이가 PI제어기에 입력되어 토크지령( $i_{qr}'$ )이 출력된다. 약계자제어 블록에서는  $i_{dr}(n)$ 을 계산할 때 저항에 의한 전압강하를 고려하기 위해  $\omega_m(n)$ ,  $i_{qr}'(n)$ ,  $i_{dr}(n-1)$ 을

이용한다. 전류는 순간적으로 크게 변하지 않는다는 가정 하에  $i_{dr}(n-1)$ 값을 사용했다.



C.C.I: Current Controlled Inverter E: Encoder  
F.W.C: Field Weakening Control

그림 7. 약계자제어 시스템

전류 제한 블록에서는 약계자제어 블록에서 계산된  $i_{dr}$  값과 PI제어기의 출력  $i_{qr}'$ 으로 이루어진 전류 지령 벡터가 전류 제한을 넘는 경우, d축전류를 q축전류에 우선적으로 제어하여 전류제어기의 포화를 막는다.

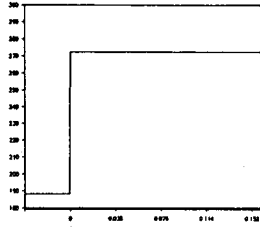
IV. 시뮬레이션 및 검토

표 1에 시뮬레이션에 사용한 모터의 사양을 나타냈다.

표 1. 모터의 사양

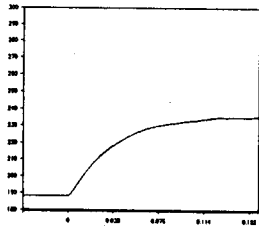
정격 출력	1 [kW]
정격 전류	7.9 [A]
정격 전압	90 [V]
정격 속도	1800 [rpm]
영구자석에 의한 전기자 쇄교자속	0.101[Wb]
관성 모멘트	31.4 [kgcm <sup>2</sup> ]
자극 수	8 [개]
전기자 저항	0.82 [Ω]
전기자 인덕턴스	6 [mH]

시뮬레이션에서는  $V_{lim}$ ,  $I_{lim}$ 를 모터의 정격 전압, 전류로 했다. 그림 8-11에서 알 수 있듯이 무부하에서 속도 지령이 1800[rpm]에서 2600[rpm]으로 주어졌을때, 약계자제어를 하지 않은 경우 모터의 실제 속도는 2250[rpm]이상 올라가지 못했다. 약계자제어시 두 경우 다 속도지령에 응답했지만 저항을 고려한 경우가 응답이 더 빨랐다. 그림 12는 정격 이상의 속도 2600[rpm]에서 q축 전류 지령에 대한 응답을 나타내고 있다. 역시 이 경우에도 저항을 고려한 경우가 전류 지령을 더 잘 따르고 있다.



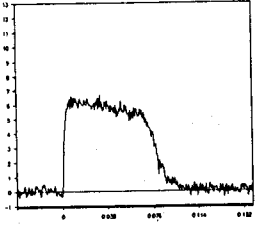
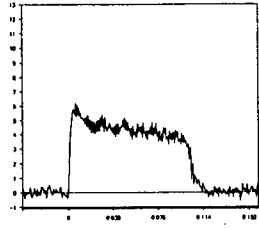
38[ms]/x, 10[rad/sec]/y

그림 8. 속도 지령

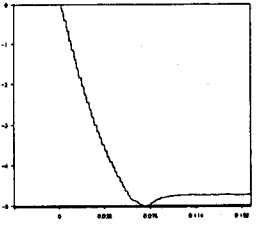
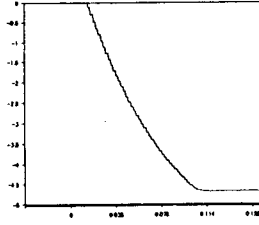


38[ms]/x, 10[rad/sec]/y

(a) 속도



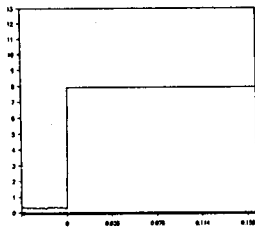
(c) q축 전류 38[ms]/x, 1[A]/y



(d) d축 전류 지령 38[ms]/x, 0.5[A]/y

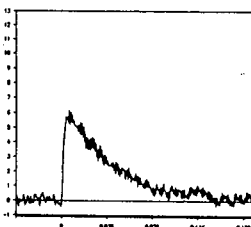
그림 10. 약계자제어(저항 비교러)

그림 11. 약계자제어(저항 고려)



• 38[ms]/x, 1[A]/y

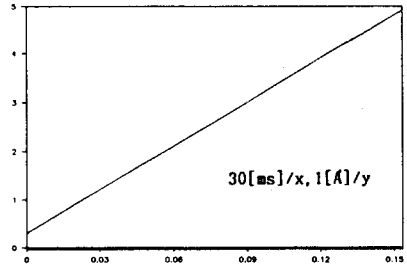
(b) q축 전류 지령



38[ms]/x, 1[A]/y

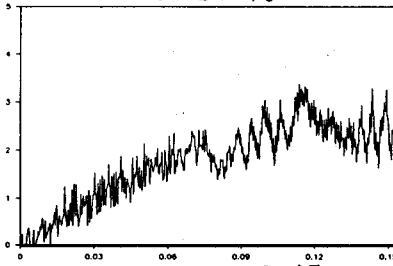
(c) q축 전류

그림 9. 약계자제어를 하지 않은 경우.

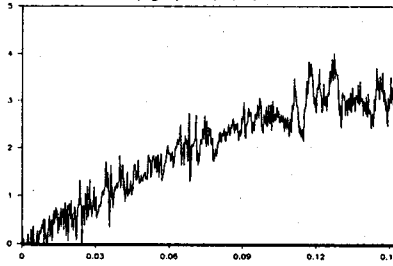


30[ms]/x, 1[A]/y

(a) q축 전류 지령



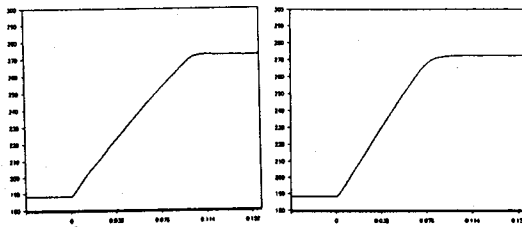
(b) 저항비고려시 q축 전류



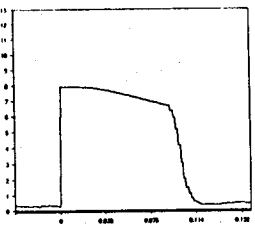
(c)

(c) 저항고려시 q축 전류

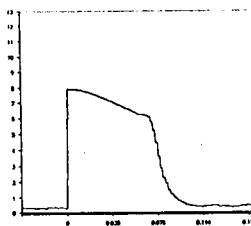
그림 12. 약계자제어시 전류 응답



(a) 속도 38[ms]/x, 10[rad/sec]/y



(b) q축 전류 지령 38[ms]/x, 1[A]/y



## X. 결론

위와 같은 결과로 우리는 surface type PMSM에서 약계자제의 필요성을 확인할 수 있고, 약계자제에서 저항을 고려함으로써 전류제어기의 포화를 더 잘 막아 시스템의 응답성이 개선됨을 알 수 있다. 따라서, 정확한 응답이 요구되는 시스템에서 운전 가능 영역을 확장시키려면 전기자 저항을 고려한 정확한 모델로 전류를 약계자제어를 하는 것이 필요하다.

## VI. 참고 문헌

- [1] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasa and K. Taniguchi, "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Optimum Flux-Weakening", IEEE/IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp51-56, 1989
- [2] S. Ogasawara, M. Nishimura, H. Akagi, A. Nabae and Y. Nakanishi, "A high performance AC servo system with permanent magnet synchronous motor", IECON
- [3] T. M. Jahns, G. B. Kliman and T. W. Neumann, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-22, NO. 4, Jul./Aug., pp738-747, 1986
- [4] Y. Takeda and T. Hirasa, "Current Phase Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Saliency", PESC Conf. Rec., pp409-414, 1988
- [5] T. M. Jahns, "Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. IND. Appl., vol. IA-23, July/Aug., pp681-689, 1987
- [6] 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