

Multi-PI 제어를 이용한 SynRM의 최대토크 제어

정병진*, 고재섭**, 최정식**, 정철호**, 김도연**, 박기태**, 정동화**
 순천대학교 정보통신공학부*, 순천대학교 정보통신공학부**

Maximum Torque Control of SynRM Using Multi-PI Controller

Byung-Jin Jung*, Jae-Sub Ko**, Jung-Sik Choi**, Chul-Ho Jung**, Do-Yeon Kim**, Ki-Tae Park**, Dong-Hwa Chung**
 Suncheon University*, Suncheon University**

Abstract - The paper is proposed maximum torque control of SynRM drive using Multi-PI controller. The control method is applicable over the entire speed range and considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current i_{ds} for maximum torque operation is derived. The proposed control algorithm is applied to SynRM drive system controlled Multi-PI controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of the Multi-PI controller.

1. 서 론

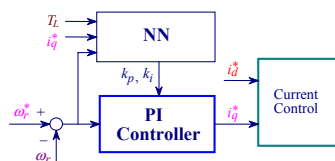
최근 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)은 많은 연구자들의 노력에 의해 관심을 증폭시키고 있고 교류전동기를 대체하여 적용이 가능한 장점이 인식되었다. SynRM은 회전자 설계를 개선하여 유도전동기보다 역률과 효율면에서 우수하며[1] 벡터제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기 보다 양호하다는 것이 입증되었다.[2] 벡터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[3] 전동기에 의해 발생한 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[4] 따라서 전압과 전류 제한을 고려하여 전속도 영역에서 MTPA(Maximum Torque per Ampere)가 가능한 제어기법을 사용할 필요가 있다. 또한 PI 제어기는 다양한 최신 제어 알고리즘과 기법을 개발하는데 기초가 된다. PI 제어기의 고정된 이득은 어떤 동작조건에 환경에서는 양호하게 수행된다. 그러나 이 제어기는 일반적으로 비선형과 불확실한 모델에 의해 복잡하고 시변이며 비선형일 경우에는 문제점이 나타난다.[5] 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다.

본 논문에서는 고성능 및 강인성 제어를 하기 위하여 Multi-PI 제어기를 설계한다. 이 제어기를 이용하여 제한 전압과 전류에서 전 고속영역에 최대토크 동작이 가능한 SynRM 드라이브를 위한 최대토크 제어를 제시한다.

2. Multi-PI 제어기 설계

그림 1은 신경회로망에 의한 PI 제어기의 블록도를 나타낸다. 그림 1에서 NN(Neural Network)은 신경회로망의 파라미터 동조기이며 k_p 와 k_i 는 PI의 이득이다. 각 학습 패턴은 $e\omega_r = (\omega_r^* - \omega_r)$, i_q^* , T_L , k_p 및 k_i 의 5개 파라미터가 포함되도록 설계한다. 제시한 시스템에서는 입력은 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 이며 출력은 k_p 와 k_i 이다. 성능지수 F 는 다음 식과 같이 정의한다.

$$F = F(\text{overshoot}, \text{rise_time}, \text{steady_state_error}) \\ = k_1 \cdot \text{overshoot} + k_2 \cdot \text{rise_time} + k_3 \cdot \text{steady_state_error} \quad (1)$$



〈그림 1〉 신경회로망에 의한 PI 제어기

각 입력벡터 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 에 대하여 최적인 k_p 및 k_i 를 구하는 효율적인 방법을 제시한다. k_p 및 k_i 를 결정하는 과정은 다음과 같다.

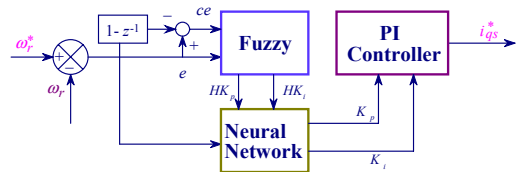
단계 1) $k_p (k_{pmin} < k_p < k_{pmax})$ 및 $k_i (k_{imin} < k_i < k_{imax})$ 를 각각 7개의 구간으로 나눈다.

단계 2) 각 k_p 의 결정을 위하여 다음 단계가 필요하다.

- $F(t+1) < F(t)$ 의 조건 동안 한 구간에서 k_i 를 점차적으로 증가시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 검출되면 $F(t+1) > F(t)$ 의 조건까지 1/2 구간까지 점차적으로 k_i 를 점차적으로 감소시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 다시 검출될 때까지 1/4 구간까지 k_i 를 증가시킨다.
- 선정된 k_i 에 대한 k_{iopt} 는 $k_{iopt} = (k_i(t) + k_i(t+1))/2$ 이다. 선정된 k_p 와 k_{iopt} 에 대한 F_{opt} 는 $F_{opt} = (F(t+1) + F(t))/2$ 이다.

단계 3) 단계 2)에서 구한 모든 k_p 및 k_i 중에서 최소 F_{opt} 을 가지는 최적치를 찾는다.

그림 2는 Fuzzy 제어와 신경회로망을 혼합한 FNN-PI 제어기의 전체 구성도를 나타낸다. Fuzzy 제어를 통해 동조된 PI 이득을 신경회로망의 입력으로 사용되며 신경회로망은 학습을 통해 최적의 PI 이득값을 출력한다.



〈그림 2〉 FNN-PI 제어기의 전체 구성도

3. 최대토크 제어

전압과 전류의 제한조건을 동시에 만족하고 전동기 최대토크를 발생시키는 최적의 기준전류를 구한다. 전압과 전류 제한조건을 동시에 만족시키기 위한 기준 전류벡터는 그림 3의 운전 속도에서 타원과 원의 공통영역에 존재해야 한다. 이 영역에 존재하는 i_d^* 와 i_q^* 의 조합은 수없이 많이 존재한다. 이들의 조합 중에서 출력 토크를 최대로 하는 조합을 구하기 위한 함수 F 로 정의한다.

$$F = \frac{T_e}{k_t} = i_d \cdot i_q \quad (2)$$

발생토크는 전류의 성분 i_{dm} 와 i_{qm} 에 비례한다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_{dm} i_{qm} \quad (3)$$

함수 F 를 i_{dm} 항으로 표현하기 위해 식(12)을 변형하면 다음과 같다.

$$i_{qm} = \frac{3P}{2} \frac{T_e}{(L_d - L_q) i_{dm}} = \frac{K}{i_{dm}} \quad (4)$$

식(13)를 식(11)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$F = \frac{\omega_r L_d}{R_c} i_{dm}^2 - \frac{\omega_r L_q K^2}{R_c} i_{dm}^{-2} + K \left(1 - \frac{\omega_r^2 L_q L_d}{R_c^2}\right) \\ = A i_{dm}^2 + B i_{dm}^{-2} + C \quad (5)$$

여기서 계수는 다음과 같이 표현된다.

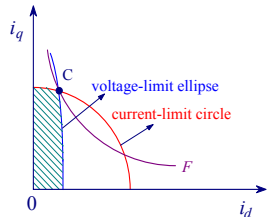
$$A = \frac{\omega_r L_d}{R_c}, B = -\frac{\omega_r L_q K^2}{R_c}, C = K \left(1 - \frac{\omega_r^2 L_q L_d}{R_c^2}\right)$$

이 함수를 최대로 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생시키는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉, $dF/di_{dm} = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

$$\frac{dF}{di_{dm}} = \{2A i_{dm} - 2B i_{dm}^3\} = 2A i_{dm}^3 - B/A$$

$$= 2A i_{dm}^3 \{i_{dm} + (B/A)^{1/4}\} \{i_{dm} - (B/A)^{1/4}\} = 0 \quad (6)$$

$$i_{dm} = (B/A)^{1/4} \quad (7)$$



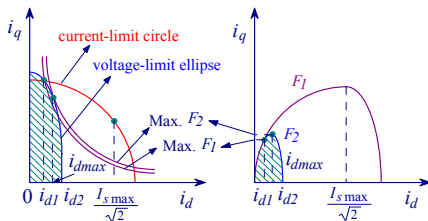
〈그림 3〉 제시된 방법에서 기준전류

최대 토크를 위한 최적의 i_q 와 i_d 의 조합을 구할 경우 영향을 주는 제한조건에 따라 약계자 영역은 두 구간으로 나누어진다.

3.1 최적의 기준전류

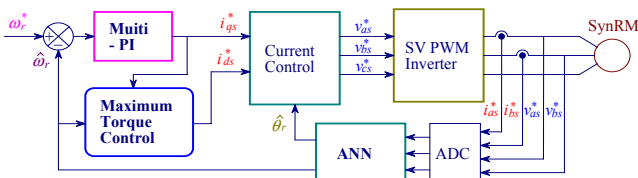
전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 4의 빛금친 부분으로 나타낼 수 있다. 식(2)의 함수를 최대화 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉,

$dF/di_{dm} = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.



〈그림 4〉 최적 기준전류

그림 5은 SynRM의 최대토크 제어의 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도와 위치를 추정하고 최대토크 제어에 의해 각 운전영역에서 최대토크가 되는 i_d 를 구하여 운전한다.

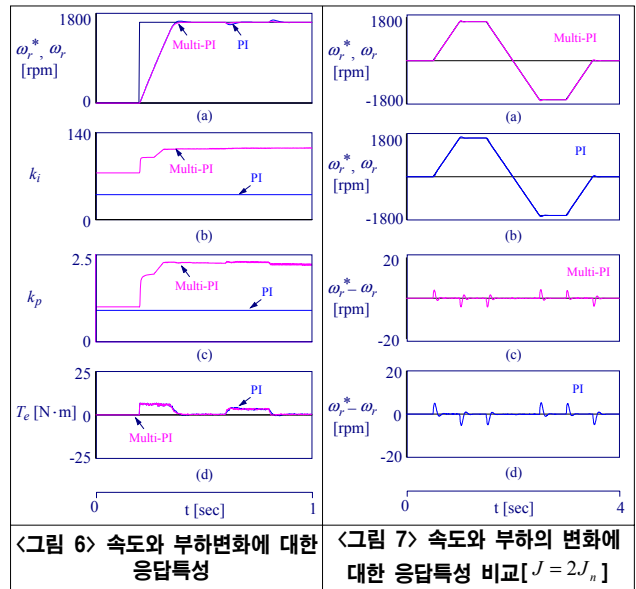


〈그림 5〉 SynRM의 최대토크 제어 시스템

4. 시스템의 성능결과

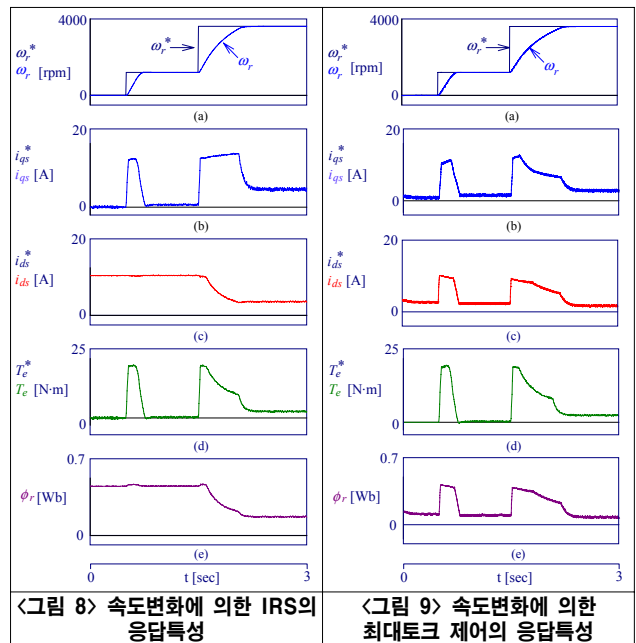
그림 6은 0.2[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전시키고 0.6~0.8[sec]에서 부하토크를 3[N·m]으로 인가했을 경우에 나타나는 응답특성이다. (a)는 지령속도와 실제속도이며, (b)와 (c)는 본 논문에서 제시한 Multi-PI 제어기에서 구한 이득 k_p, k_i 를 나타내고 그림 (d)는 발생토크를 나타낸다. Multi-PI 제어기가 PI 제어기보다 오버슈트가 작고 상승시간도 빠르며 빠르게 안정화되고 정상상태에 빠르게 추종한다. 그림 7는 관성을 2배로 증가시키고 4상한 운전을 하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. (a)는 Multi-PI 제어기, (b)는 PI 제어기의 지령속도와 실제속도를 나타내며, (c)와 (d)는 Multi-PI 제어기와 PI 제어기의 속도 오차를 나타낸다. (c)와 (d)에서 나타난 것과 같이 Multi-PI 제어기가 PI 제어기보다 속도오차가 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 팬 부하를 인가시켰을 때 지령속도를 0.5[sec] 후에 1200[rpm], 1.5[sec]후에 3600[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 IRS(Inverse Rotor Speed)의 응답특성을 나타낸다. 그림8(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 (b)는 지령 q 축 전류와 실제 q 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 지령 d 축 전류와 실제 d 축 전류를 나타낸다. 약계자 영역에서 자속분 전류인 d 축 전류는 감소되고 일정전력을 발생시키기 위하여 q 축 전류는 증가되고 있다. 그림 (d)는 발생토크를 나타내고 그림 (e)는 자속을 나타낸다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 속도, 토크 및 자속의 응답특성은 IRS와 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 그림 9(c)와 그림 (d)의 $d-q$ 축 전류는 전류 제한 범위에서 최대토크 제어의 위상각을 만족하는 전류가 발생되므로 q 축 전류와 d 축 전류가 감소되고 있다. 이는 최대토크 제어에서 전류의 감소에 따라 토크가 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 따라서 속도 변화에서도 최대토크 제어가 양호하게 수행됨을 알 수 있다.



〈그림 6〉 속도와 부하변화에 대한 응답특성

〈그림 7〉 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [$J = 2J_n$]



〈그림 8〉 속도변화에 의한 IRS의 응답특성

〈그림 9〉 속도변화에 의한 최대토크 제어의 응답특성

3. 결 론

본 논문에서는 SynRM 드라이브의 최대토크 제어를 위하여 FNN과 신경회로망을 이용한 Multi-PI 제어기를 제시하였다. 파라미터 변동에서 Multi-PI 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 오버슈트, 상승시간 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 또한 속도의 증가에 대한 토크와 출력은 같지만 전류 전류의 감소로 단위 전류당 토크가 매우 증가되고 있어 최대토크제어가 실현됨을 알 수 있으므로 본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Trans. Energy conversion, vol. 9, no. 2, pp. 369-365, 1994.
- [2] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electron Specialists Conf., pp. 425-431, 1993.
- [3] T. Senjyu, T. Shingaki and K. Uezato, "A high efficiency control strategy for synchronous reluctance motor considering stator iron loss with EKF," in Proc. ICEE 2000, Kitakyushu, Japan, pp. 179-182, 2000.
- [4] M. Ali Unar, D. J. Murray-Smith and S. F. Ali Shah, "Design and tuning of fixed structure PID controller - A survey," Technical Report CSC-96016, Faculty of Engineering, Glasgow University, Scotland, 1996.
- [5] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIEE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.