

# 영구자석 동기전동기를 위한 디지털 PI 전류제어기의 제어특성

김무현, 임정규, 정세교  
경상대학교 전기전자공학부

## Control characteristics of digital PI current controller for PM synchronous motor

M.H. Kim, J.G. Lim, S.K. Chung  
Gyeongsang National University

### ABSTRACT

The synchronous PI current controller has been widely used for the high performance PM synchronous drives and generally implemented using a digital signal processor. This paper describes the control characteristics of the digital PI current controller for PM synchronous drives. The stability of the current control system considering the sampling time is investigated and the effects of the mismatched decoupling terms in the discrete-time domain are also discussed. The simulation results are provided to verify the theoretic results.

### 1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 항공기 액츄에이터와 같이 높은 전력밀도와 제어성을 요구하는 응용분야에 많이 사용되고 있다. 항공기 액츄에이터의 우수한 제어성능을 확보하기 위해서는 전동기의 빠른 응답 특성이 요구되며, 이를 위해 우수한 동특성을 가진 전류제어기가 필요하다.<sup>[1][2]</sup>

근래에 와서 영구자석 동기전동기의 전류제어는 DSP를 이용한 디지털 제어 방법으로 수행되고 있으며, 다양한 제어 알고리즘이 연구되어 왔다. 그 중 동기 PI 전류제어기는 간단하고 안정적인 제어특성을 가지고 있어 가장 널리 사용되고 있다. 전류제어기의 설계를 위해서는 폐환 시스템의 안정도와 외란에 대한 제어특성에 대한 해석이 필요하며, 연속시간 영역에서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 디지털 제어에서는 샘플링, 시간지연 등이 제어기의 성능에 영향을 미치며, 현재까지 동기 PI 전류제어기의 디지털 제어특성에 대한 연구는 많이 제시되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 디지털 방식의 동기 PI 전류제어기의 제어특성 해석에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 영구자석 동기전동기의 동기 PI 전류제어 시스템의 이산시간 모델을 도출하였고, 이를 이용하여 디지털 제어기의 설계에 있어서 샘플링 시간과 안정도의 관계에 대하여 분석하였다. 그리고 동기 PI 제어기에서 역기전력 및 커플링 항이 완전히 제거되지 않았을 경우 이에 의한 이산시간 영역에서의 제어특성을 해석하였다. 이러한 제어특성은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

### 2. 영구자석 동기전동기 모델링

PMSM의 d-q 동기 좌표계에서 전류 및 토크 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{i}_{qs} = -\frac{R_s}{L_q}i_{qs} - \omega_r i_{ds} + \frac{1}{L_q}v_{qs} - \frac{1}{L_q}\lambda_m\omega_r \quad (1)$$

$$\dot{i}_{ds} = -\frac{R_s}{L_d}i_{ds} + \omega_r i_{qs} + \frac{1}{L_d}v_{ds} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right) [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}] \quad (3)$$

여기서,

- $v_{qs}, v_{ds}$  : 동기좌표계 dq축 고정자 전압,
- $i_{qs}, i_{ds}$  : 동기좌표계 dq축 고정자 전류,
- $\omega_r$  : 회전자의 전기적 각속도,
- $L_d, L_q$  : 고정자 인덕턴스,  $R_s$  : 고정자 저항,
- $\lambda_m$  : 쇠교 자속의 크기,  $P$  : 극수,
- $T_e$  : 전동기에 유기되는 토크

### 3. 영구자석 동기전동기 전류 제어기 설계

#### 3.1 디지털 전류 제어기 설계

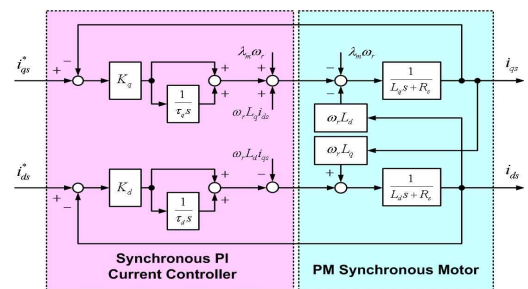


그림 1 동기 PI 제어기를 적용한 전류 제어 시스템 블록도

Fig. 1 Block diagram of Synchronous frame current regulator with PI controller

그림 1은 동기 PI 제어기를 적용한 PMSM 전류제어 시스템의 블록선도이다. 동기 좌표계에서 PMSM의 모델은 d-q축의 상호 커플링 항과 역기전력 성분을 포함하고 있으므로, 이를

제거하기 위한 전항 보상을 추가하면 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs} = v_{qs}^* + L_d \omega_r i_{ds} + \lambda_m \omega_r \quad (4)$$

$$v_{ds} = v_{ds}^* - L_q \omega_r i_{qs} \quad (5)$$

여기서,  $v_{qs}^*$ 와  $v_{ds}^*$ 는 PI 전류제어기로 이산시간 영역에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs}^* = \frac{K_P}{2} \frac{(2 + T/\tau)z + (T/\tau - 2)}{(z-1)} (i_{qs}^* - i_{qs}) \quad (6)$$

$$v_{ds}^* = \frac{K_P}{2} \frac{(2 + T/\tau)z + (T/\tau - 2)}{(z-1)} (i_{ds}^* - i_{ds}) \quad (7)$$

여기서,

$T$  : 샘플링 시간,

$\tau$  : PI 제어기의 비례이득/적분이득 비,

$K_P$  : PI 제어기의 비례이득

그림 2는 식 (6)과 (7)에서 나타낸 이산시간 영역의 동기 PI 제어기를 적용한 PMSM 전류제어 시스템의 블록선도를 나타낸 그림이다.

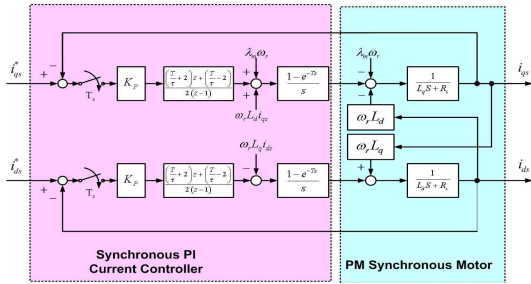


그림 2 디지털 동기 PI 제어기를 적용한 전류제어 시스템의 블록선도

Fig. 2 Block diagram of current control system using digital PI current controller

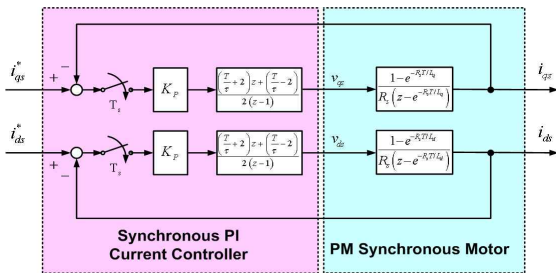


그림 3 간략화된 디지털 PI전류제어기의 블록도<sup>[3]</sup>

Fig. 3 Simplified Block diagram of digital PI current controller

### 3.2 외란이 없는 경우 디지털 전류 제어기 특성

그림 2에서 PMSM의 상호 간섭 항과 역기전력이 전항보상에 의해서 완전히 상쇄되었다고 가정하면, 전류제어 시스템은 그림 3과 같이 완전히 독립된 두 개의 제어시스템으로 나타낼 수 있다. 이 때 q축 전류제어 시스템의 개루프 및 폐루프 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{PI}(z) = Z \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{1}{Ls + R} \right] = \frac{1 - e^{-RT/L}}{R(z - e^{-RT/L})} \quad (8)$$

$$G_{CLA}(z) = \frac{i_{qs}}{i_{qs}^*} = \frac{G_C(z)G_{PI}(z)}{1 + G_C(z)G_{PI}(z)} = \beta \frac{z + b_0}{z^2 + a_1z + a_0} \quad (9)$$

여기서,

$$\beta = \frac{K_P}{2R} \left( 2 + \frac{T}{\tau} \right) (1 - e^{-RT/L}), \quad b_0 = \frac{T - 2\tau}{T + 2\tau}$$

$$a_1 = \frac{K_P}{2R} \left( 2 + \frac{T}{\tau} \right) (1 - e^{-RT/L}) - (1 + e^{-RT/L})$$

$$a_0 = \frac{K_P}{2R} \left( \frac{T}{\tau} - 2 \right) (1 - e^{-RT/L}) + e^{-RT/L}$$

d축에 대해서도 동일한 형태의 전달함수를 구할 수 있으며, 본문에서는 이를 생략하였다.

이러한 시스템의 특성을 해석하기 위하여 MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 PMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 PMSM의 파라미터

Table 1 parameters of PMSM

항목	수치
정격 출력	1.1 [kW]
최고 회전속도	7500[RPM]
선간 저항( $R_s$ )	2.7 [ $\Omega$ ]
선간 인덕턴스( $L_s$ )	14.4 [mH]
토크 상수 ( $K_t$ )	0.37 [Nm/A]
역기전력 상수( $k_e$ )	22.5[V RMS/kRPM]

그림 4와 5는 디지털 전류제어 시스템에서 샘플링 시간과 시스템의 대역폭의 관계를 나타낸 보드선도이다. 각각 연속시간 PI 제어기에서의 응답특성과 이산시간 PI 제어기에서의 응답특성을 나타내고 있다.

그림 4은 식 (9)에 오버슈트를 10%와 정착시간이 10[ms]으로 설정한 폐루프 전달함수에 샘플링 시간(T)은 0.05[ms], 0.1[ms], 0.2[ms]을 적용한 보드선도이다. 각 샘플링 시간의 위상 여유는 60°, 59°, 58°이며 이득 여유는 36.3dB, 30.2dB, 24.2dB이다. 샘플링 시간이 길어짐에 따라 위상 여유와 이득여유가 줄어들음을 알 수 있다. 그리고 그림5는 식 (9)에 오버슈트를 10%와 대역폭 정착시간이 5[ms]으로 설정한 폐루프 전달함수에 샘플링 시간(T)은 0.05[ms], 0.1[ms], 0.2[ms]을 적용한 보드선도이다. 각 대역폭의 위상 여유는 61°, 59°, 55°이며 이득 여유는 39.5dB, 30dB, 23dB이다. 이 경우에도 샘플링 시간이 커짐에 따라 위상 및 이득이 줄어든다. 또한 시스템의 대역폭이 커짐에 따라 샘플링 시간의 영향을 더 커짐을 알 수 있다.

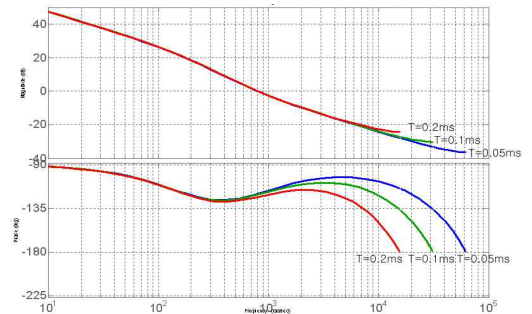


그림 4 디지털 전류제어기의 루프 이득 ( $T_s = 10[ms]$ )

Fig. 4 Loop gain of digital current controller

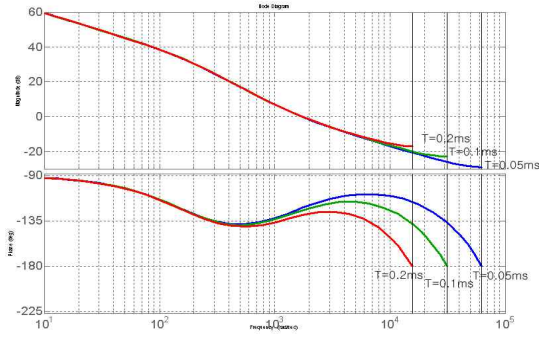


그림 5 디지털 전류제어기의 루프 이득  
( $T_s = 5[mS]$ )

Fig. 5 Loop gain of digital current controller

### 3.2 외란을 포함한 디지털 전류 제어기 설계

앞 절에서 PMSM의 상호 간섭항과 역기전력은 동기 PI 제어기에서 전향보상에 의해 완전히 제거된다고 가정하였다. 그러나 실제 적용에서는 파라미터의 불확실성에 의해 이 항들이 완전히 제거되기는 어렵다. 따라서 제거되지 않은 나머지 항들이 외란으로 작용하며 제어기의 동특성에 영향을 미치므로, 이 산시간 영역에서 그 영향을 분석하였다.

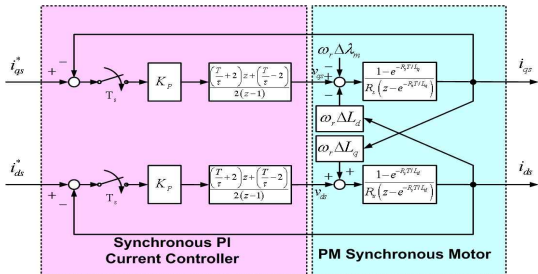


그림 6 외란을 포함한 디지털 PI 전류제어기의 블록도

Fig. 6 Block diagram of digital PI controller with disturbance

그림 6은 외란을 고려한 디지털 PI 전류제어기의 블록전도이며, z 영역에서 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$C_q(z) = R_q(z)G_{CLq}(z) - (\omega_r \Delta L_d i_{ds} + \omega_r \Delta \lambda_m) G_{Tdq}(z) \quad (12)$$

$$C_d(z) = R_d(z)G_{CLd}(z) + \omega_r \Delta L_q i_{qs} G_{Tdd}(z) \quad (13)$$

여기서,

$R_q(z), R_d(z)$  : dq축의 입력지령값,

$C_q(z), C_d(z)$  : dq축의 출력값

위 식 (12)와 식 (13)에 입력 지령값을 0으로 두었을 때 외란의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{Tdq}(z) = \frac{-G_{Rq}(z)}{1 + G_C(z)G_{Rq}(z)} \quad (14)$$

$$G_{Tdd}(z) = \frac{-G_{Pd}(z)}{1 + G_C(z)G_{Pd}(z)} \quad (15)$$

그림 7, 8은 외란에 대한 출력 전류의 민감도(sensitivity)를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에는 표 1의 파라미터를 사용하였고 샘플링 시간은 0.1[ms]로 하였으며 PI제어기의 설정은 그림 3에서 사용한 오버슈트를 10%와 정착시간이 10[ms]인 제어기

를 사용하였다. 시뮬레이션 결과 동일한 제어기 이득에서 샘플링 시간이 커짐에 따라 저주파 외란에 대한 민감도가 커짐을 알 수 있다.

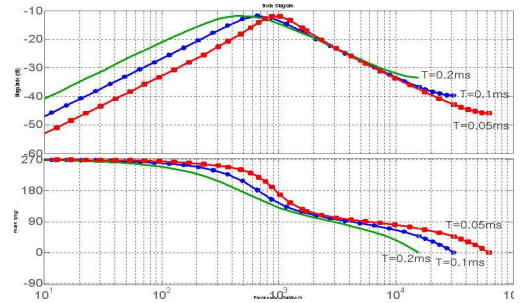


그림 7 q축 전류제어기의 외란에 대한 민감도

Fig. 7 Disturbance sensitivity for q-axis current controller

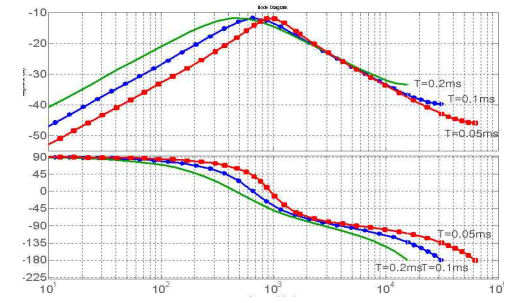


그림 8 d축 전류제어기의 외란에 대한 민감도

Fig. 8 Disturbance sensitivity for d-axis current controller

## 4. 결론

본 논문에서는 디지털 방식의 동기 PI 전류제어기의 제어 특성 해석에 대한 연구를 수행하였다. PMSM에 대한 동기 PI 전류제어 시스템의 이산시간 모델로부터 샘플링 시간과 안정도의 관계에 대하여 분석하였고, 동기 PI 제어기에서 역기전력 및 커플링 항이 완전히 제거되지 않았을 경우 이에 의한 이산시간 영역에서의 민감도 특성을 해석하였다. 이러한 제어특성은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 추후 실험을 통한 검증이 필요하리라 생각된다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.(NIPA-2009(c1090-0904-0001))

## 참고 문헌

- [1] M. E. Elbuluk, M. D. Kankam, "Motor Drive Technologies for The Power-By-Wire (PBW) Program: Options, Trends and Tradeoffs", IEEE AES systems Magazine, 1995.
- [2] S. E. Lyshevski, V. A. Skormin, R. D. Colgren, "High-Torque Density Integrated Electro-Mechanical Flight Actuators", IEEE AES, 2002.
- [3] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인 코리아, 2002
- [4] B. C. Kuo, "Digital Control Systems", Saunders College Publishing, 1995.