2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

2축 연속회전시스템의 고정도 위치동기제어

정석권 · 김영진
부경대학교 기계공학부 · 부경대학교 대학원 메카트로닉스

Precise Position Synchronous Control of Two Axes Rotating Systems

Seok-kwon Jeong and Young-jin Kim
Div. of Mechanical Eng. PKNU, Dep. of Mechatronics Eng. Graduate School

Abstract - This paper deals with a precise position synchronous control of two axes rotating systems by a cooperative control method. The system's dynamics including motor drives described by a motor circuit equation and Newton's kinetic formulation about rotating system. Current and speed controllers are designed very simply by conventional PID control law. Also, position synchronous controller designed to minimize position errors according to integration of speed errors between two motors. Then, the proposed control enables the distributed drives by a software control algorithm to behave in a way as if they are mechanically hard coupled in axes. Finally, the validity of the proposed system is confirmed through some simulations and experiments.

1. 서 론

최근 2축 연속 회전시스템의 정밀한 위치동기제어는 기어나 캠과 같은 하드 커플링에 의존하지 않고 제어로직에 의한 소프트웨어로 실현하는 연구가 다수 발표되고 있다. 그러나, 현재까지 제안된 대부분의 위치동기방식은 주로 Maste-Slave방식(M/S방식)으로 외란 인가시 어느 한 축의 속도를 회생함으로써 위치동기를 취하는 방식이다. 또한, 제어기 설계시 구동모터를 포함한 대상 플랜트를 근사적인 2차계로 단순 모델링하여 전류 마이너루프의 설계가 불가능하므로, 외란에 대한 빠른 보상특성을 기대하기 어렵고, 게인의 설정을 주로 시행착오적인 반복법에 의존하므로 설계과정이 번거롭다. 그리고, 제어기의 성능이 수치 시뮬레이션에 근거하여 고찰되고 있어 엄밀한 실험적 검증이 요구되는 실정이다.

본 논문에서는 이상의 문제점들을 해결하기 위하여, 인가되는 외란을 두 축이 적절히 분담하여 속도제어를 행하는 협조제어와 PID 제어칙에 근거한 위치동기 시스템 설계법을 제안한다. 우선, 제안된 방식은 구동계의 동특성을 구동모터의 회로방정식과 기계계의 운동방정식으로 표현함으로써 인가 외란에 대해서는 전류루프로 이를 신속히 보상할 수 있게 하였다. 다음으로, 각 제어기의 게인은 근사화된 전달함수를 통해 용이하게 구할 수 있게 함으로써 반복시행으로 인한 제어기 게인의 설계상의 번거로움을 피할 수 있도록 하였다. 특히, 제안방식은 위치동기에러 발생시, 이를 두 축이 적절히 분담하여 양 축의 속도를 동시에 가 · 감속 제어하는 협조제어를 행함으로써 특정 축만의 속도를 일방적으로 희생함이 없이 고정도의 위치동기가 가능하도록 하였다.

마지막으로, 수치 시뮬레이션으로 설계된 제어기의 성능을 검증하고, 마이크로프로세서와 선형 앰프, 그리고 DC모터로 구성된 2축 연속회전 위치동기 시스템을 구성하여 다양한 실험을 통해 제안방식의 타당성을 입증한다.

2. 제어계의 설계

2.1 위치동기 제어계의 구성

Fig. 1은 제안된 위치동기제어계의 개략도를 보인다. 제안된 시스템은 속도지령을 추종하기 위한 속도제어기, 외란의 영향을 신속히 보상하기 위한 전류제어기, 그리고 두 모터의 속도 차의 적분치인 위치동기 오차를 최소화하기 위한 위치동기제어기로 구성된다.

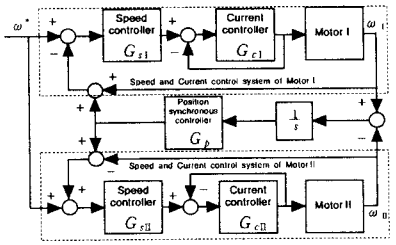


Fig. 1 Proposed position synchronous control system

2.1 모터 구동계의 모델링

구동계의 동특성은 다음과 같이 기술된다.

$$v_a(s) = (L_a s + R_a)\, i_a(s) + K_e \omega(s) \tag{1}$$

$$\tau(s) = K_t\, i_a(s) = (J_a s + b)\,\omega(s) \tag{2}$$

여기서, $v_a(t)$와 $i_a(t)$는 전기자의 전압과 전류, $\omega(t)$, $\tau(t)$는 기계각속도와 모터의 토크를 나타낸다. R_a, L_a, J_a, b는 각각 전기자의 저항, 인덕턴스, 관성, 마찰계수이며, K_e, K_t는 유기전압상수와 토크정수이다.

전류제어기를 통해 전류제어를 행하는 경우, 전류지령치에서 속도까지의 블록도는 식(1)과 (2)를 통해 Fig. 2와 같이 나타내어진다.

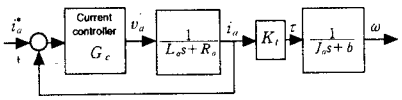


Fig. 2 Current control system

2.1 전류제어계의 설계

전류제어기 G_c의 출력인 전압지령은 전류제어기에 PI 제어칙을 적용하면 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$v_a^* = G_c(i_a^* - i_a) = K_{cp}\left(1 + \frac{1}{T_{ci} s}\right)(i_a^* - i_a) \tag{3}$$

여기서, K_{cp}와 T_{ci}는 전류제어기의 비례게인과 적분시간을, 위첨자 "*"는 지령치를 각각 나타낸다. 여기서, 적분시간 T_{ci}를 전기계의 시정수인 L_a/R_a로 설정하면, 개루프 전달함수는 $1/Ks$ ($K = L_a/K_{cp}$), 폐루프 전달함수는 $1/(Ks+1)$로 간단화 된다. 여기서, K_{cp}의 설정은 디지털제어계에서의 설계를 고려하여 PWM(Pulse

Width Modulation)초퍼의 스위칭주파수 f_c와의 관계에 의해 대략 $\omega_c \leq 2\pi f_c/3$로 제한된다.

$$K_{cp} \leq \omega_c L_a \tag{4}$$

2.1 속도제어계의 설계

Fig. 3은 속도제어계의 블록도를 보인다.

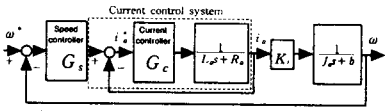


Fig. 3 Speed control system

또한, PI제어칙에 의한 속도제어기의 전달함수는

$$G_s(s) = K_{sp}(1 + \frac{1}{T_{si}s}) = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \tag{5}$$

로 되며, 여기서, K_{sp}와 K_{si}는 속도제어기의 비례게인 및 적분게인, $K_{si} = K_{sp}/T_{si}$이다. 블록도에서 속도지령에서 속도출력까지의 개루프 전달함수는 식(6)과 같이 유도된다.

$$G_s^o(s) = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{1}{L_a/K_p s + 1} \cdot \frac{K_t}{J_a s + b} \tag{6}$$

Fig. 4에 $G_s^o(s)$에 포함된 3개의 전달함수의 주파수 특성이 점선으로, 그리고, 이들의 곱인 $G_s^o(s)$의 주파수 특성이 세 곡선의 합으로써 실선으로 각각 표시되어 있다. 그리고 기계계의 b는 서보시스템의 경우 그 값이 작으므로 0으로 간주하였다.

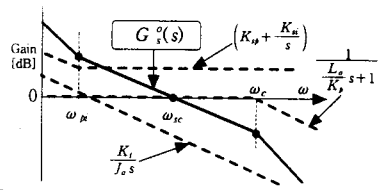


Fig. 4 Open loop frequency characteristic of PI speed control system

여기서, 속도제어계의 교차각주파수 ω_{sc}가 전류제어계의 교차각주파수 ω_c의 $1/m_1$배 이하로 되면, 전류제어계는 ω_{sc}의 부근에서 $G_c^c(s) \fallingdotseq 1$로 근사화 된다. 그리고, 속도제어계의 절점각주파수 ω_{pi}는 $\omega_{pi} = K_{si}/K_{sp}$ 이고, 이 ω_{pi}가 ω_{sc}의 $1/m_2$배 이하로 되면 속도제어기 또한 ω_{sc}의 부근에서 $G_s(s) \fallingdotseq K_{sp}$와 같이 근사화 된다. 이상의 가정들이 근사적으로 성립되는 영역에서는 PI 속도제어계의 개루프 전달함수는 각주파수 ω가 교차각주파수 ω_{sc}의 부근에서 다음의 식 (7)로 근사화 된다.

$$G_s^o(s) \fallingdotseq K_{sp} \cdot \frac{K_t}{J_a s} \tag{7}$$

여기서, $|G_s^o(j\omega_{sc})|=1$이 되도록 하는 비례게인 K_{sp}와 $\omega_{pi} = K_{si}/K_{sp}$, $\omega_{pi} = \omega_c/(m_1 m_2)$의 관계를 이용한 적분게인 K_{si}는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$K_{sp} = J_a \cdot \frac{\omega_{sc}}{K_t}, \quad K_{si} = \frac{\omega_c}{m_1 m_2} K_{sp} \tag{8}$$

2.5 위치동기제어계의 설계

전류제어기와 속도제어기만으로는 각 모터의 실제적인 동특성의 차 및 외란의 영향 등으로 인해 발생하는 위치동기오차를 제거하는 것은 용이하지 않으므로 위치동기제어기를 설계한다.

Fig. 1에서 위치동기제어기를 단위피드백으로 구성하고, 한 축에만 스텝성 토크외란 $d(s)\,(=D/s)$가 인가되는 것으로 가정하여 위치동기오차를 유도하면 다음과 같다.

$$e_p(s) = \frac{(a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s)\, d(s)}{s^7 + b_6 s^6 + b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \tag{9}$$

이 식에 최종치정리를 적용하면, 정상상태에서의 위치동기오차는 다음 식으로 된다.

$$e_p = \lim_{s \to 0} s\, e_p(s)\, \frac{D}{s} = 0 \tag{10}$$

이 식에서 보듯이 정상편차는 존재하지 않으므로 속응성만을 고려한다면, 위치동기제어기는 전체 계의 차수 저감화 차원에서 단순 P(Proportional)제어기만으로도 설계할 수 있음을 알 수 있다. P제어기만의 게인은 설계사양으로 주어지는 최대 위치동기오차를 고려한 시뮬레이션으로 용이하게 구할 수 있다.

3. 수치 시뮬레이션 및 실험

수치 시뮬레이션은 MATLAB상에서 수행하였으며 제어계의 블록도는 제 2장의 Fig. 1과 같다. 시뮬레이션 및 실기실험에서 사용한 DC모터의 파라미터는 Table 1, 설계된 제어기의 파라미터는 Table 2와 같다.

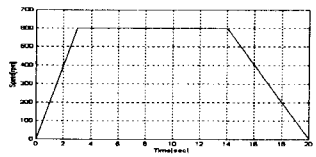
Table 1 Values of motor parameter

P_R	300[W]	K_E	0.2333[V/rpm]
T_R	0.95452[N · m]	K_T	0.22246[N · m/A]
N_R	3000[rpm]	J_M	2.45×10^{-4}[N · m · sec^2]
E_R	75[V]	R_a	1.02[Ω]
I_R	4.8[A]	L_a	1.07×10^{-3}[H]

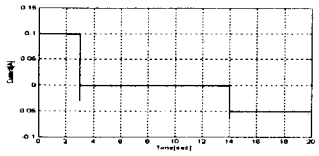
Table 2 Values of controller parameter

current controller	K_{cp}	21.4
	K_{ci}	20400
speed controller	K_{sp}	4.4053
	K_{si}	3524.2291
position synchronous controller	K_{pp}	400

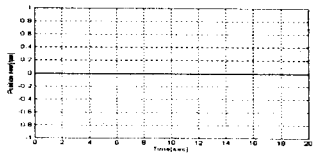
Fig. 5와 Fig. 6은 수치 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. Fig. 5는 속도지령을 램프상으로 인가한 경우를, Fig. 6은 램프상의 기동 · 정지 지령을 포함하여 운전중 가변속 지령을 인가한 경우의 응답을 나타낸다.



(a) speed response

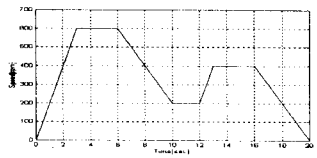


(b) current response

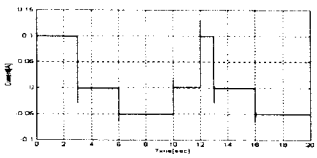


(c) position synchronous error

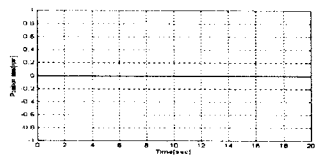
Fig. 5 Simulation results according to ramp speed references



(a) speed response



(b) current response



(c) position synchronous error

Fig. 6 Simulation results according to variable speed references

Fig. 7은 협조제어방식의 유효성을 보이기 위해 정격토크의 50%에 해당하는 스텝성 토크외란을 인가하였을 때 협조제어방식과 M/S방식을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 여기서 M/S방식은 위치동기제어기의 출력을 특정 한 축의 모터 즉, Slave로 지정된 모터에만 인가되도록 구성하였다. 두 방식에 있어서, 각 제어기는 동일한 파라미터를 사용하였다.

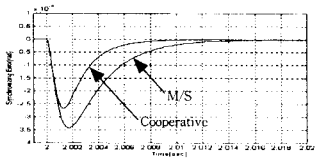


Fig. 7 Synchronous error according to cooperative control and M/S control

Fig. 8과 Fig. 9는 실기실험결과로서 기동부터 정지까지의 속도지령에 대한 전류응답 및 위치동기오차를 보인다. 시뮬레이션과의 상호 비교를 위해, Fig. 5 및 Fig. 6의 속도지령과 동일한 지령을 인가하였다. 이 실험결과는 기동에서 정지시까지 뿐만 아니라 운전 중 가변속시에도 두 축 모터가 속도를 적절히 가·감속하여 위치동기오차를 최소화하고 있음을 보여주고 있다. 실시스템에서 위치동기제어계는 사용 엔코더의 속도분해능에 제약을 받게 되어 엔코더의 검출오차에 상당하는 $\pm 2\pi/pT \fallingdotseq 6.28\times10^{-1}$[%]의 값에 의해 속도오차가 발생하며, 이 속도오차에 의해 $2\pi/p \fallingdotseq 6.28\times10^{-3}$[rad]의 위치동기오차가 생긴다. 또한, 두 축 엔코더가 동시에 상호 역방향의 검출오차를 갖는 경우 약 1.26×10^{-2}[rad]의 최대 위치동기오차가 발생한다. 여기서 p는 엔코더의 1회전당 펄스수, T는 속도제어기의 샘플링시간이다.

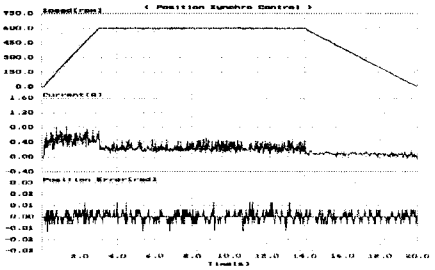


Fig. 8 Experimental results according to ramp speed references

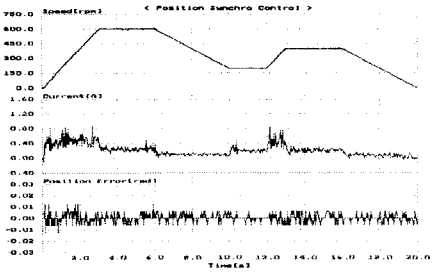


Fig. 9 Experimental results according to variable speed references

4. 결 론

본 논문에서는 PID제어칙과 협조제어방식에 근거한 2축 연속 회전 시스템의 고정도 위치동기제어 방안이 제안되었다. 수치 시뮬레이션 및 실기실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 외란인가시 두 축 모두의 속도를 제어하는 협조제어방식을 취함으로써 기동과 정지를 포함한 다양한 가변속 지령하에서도 정밀한 속도지령 추종과 동시에 고정도의 위치동기를 실현할 수 있었다.

(2) 위치동기제어계의 각 제어기를 범용의 PID제어칙에 근거하여 간단히 설계하면서도 최대 위치동기오차를 속도센서의 분해능의 제약에 기인한 약 1.26×10^{-2}[rad]이내로 제어할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] 변정환, 여동준, "외란 관측기를 이용한 2축 구동시스템의 동기제어", 대한기계학회논문집 A권, Vol. 25, No. 2, pp. 242~249, 2001

[2] 변정환, 여동준, "H_∞ 제어기법을 이용한 2축 구동 시스템의 위치동기제어", 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 2, 2001

[3] 변정환, 정석권, 양주호, "다축 구동 시스템의 정밀위치동기 제어(Ⅰ)", 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 7, pp. 115~121, 1996

[4] 양주호, 변정환, 김영복, 정석권, "다축 구동 시스템의 정밀 위치동기 제어(Ⅱ)-가변구조 및 H_∞ 제어법에 의한 설계", 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 98~106, 1997

[5] 최봉석, 변정환, 정석권, "협조제어에 의한 2축 시스템의 고정도 위치동기제어", 한국동력기계공학회 '99춘계학술대회논문집, pp. 339~346, 1999

[6] 杉本, 小山, 玉井, "ACサーボシステムの理論と設計の実際", pp. 80~157, 1994