

부분적인 상태궤환과 공진비제어를 이용한 2관성계의 H_∞제어

°김진수*, 이훈구*, 신재화**
 용인송담대학 전기설비과*, 인천전문대학 전기과**

H_∞ control of 2-mass system using partial state feedback and resonance ratio control

°Jin-soo Kim*, Hoon-goo Lee**, Jae-hwa Shin**
 Dept. of Electrical Facilities*, Yong-in Songdam College*, Dept of Electric, Inchon City College**

Abstract - In the industrial motor drive system which is composed of a motor and load connected with a flexible shaft, a torsional vibration is often generated because of the elastic elements in torque transmission. To solve this problem, the two degrees of freedom H_∞ controller was designed. But it is difficult to realize that controller. In this paper, H_∞ control of 2-mass system using partial state feedback and resonance ratio control is proposed. Proposed controller has simple structure but satisfies the attenuation of disturbances and vibrations.

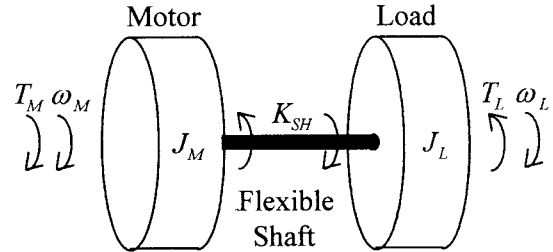


그림 1 2관성계 플랜트 모델

1. 서론

전동기 가변속 제어에 있어서 전동기와 부하가 강성이 작은 축으로 연결되는 경우 전동기의 관성과 부하의 관성에 의해 축에 비틀림 진동이 발생한다. 이와 같이 구성된 기계계를 2관성계라고 한다. 이러한 2관성계의 축비틀림 진동을 억제하기 위하여 관측기나 필터를 사용하여 상태변수를 추정하고 상태궤환하여 제어하는 방법, 공진비제어를 이용한 방법, H_∞제어에 의한 방법이 연구되어지고 있다[1~4].

이러한 연구 가운데 가중함수를 조절하여 외란·진동 억제 성능을 만족하게 하는 H_∞제어를 중심으로 한 건설 제어가 여러 분야에서 활발하다. 그러나 H_∞제어의 경우, 목표치추종성능이 과도응답으로 인해 나빠진다. 이러한 목표치추종성능을 개선하기 위해 기존의 2자유도 제어기를 갖는 형태가 있지만, 이와 같은 2자유도 제어기는 목표치응답특성이 양호하나 2자유도 제어기 설계의 어려움과 제어기 자체가 복잡해지고 실제로 구현시 많은 연산량이 요구되어지는 단점이 있다[4].

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 측정 가능한 상태변수만을 피드백하여 보상함으로써 목표치 추종성능을 개선하고 제어기 구조도 간단해질 수 있는 부분적인 상태궤환을 이용한 2관성계의 H_∞제어를 제안한다. 또한 이 제어법에 공진비제어를 부가하여 외란에 대하여도 개선된 2관성계의 새로운 H_∞제어법을 제안한다. 제안된 2관성계의 진동억제제어가 간단하면서도 좋은 성능을 가짐을 모의 실험을 통하여 확인한다.

2. 2관성계

강성이 작은 축에 의해 전동기와 부하가 연결된 2관성계는 그림 1과 같고 그 블록선도는 그림 2와 같이 구성된다. 2관성계의 상태방정식은 다음 식과 같다.

$$\dot{x} = A_p x + B_p T_M + B_d T_L, \quad y = C_p x \quad (1)$$

여기서

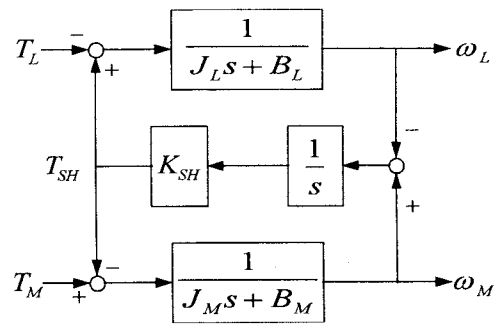


그림 2 2관성계 블록선도

$$x = \begin{pmatrix} \omega_M \\ T_{SH} \\ \omega_L \end{pmatrix}, \quad A_p = \begin{pmatrix} -\frac{B_M}{J_M} & -\frac{1}{J_M} & 0 \\ K_{SH} & 0 & -K_{SH} \\ 0 & \frac{1}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{pmatrix}$$

$$B_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_L} \end{pmatrix}, \quad C_p = (1 \ 0 \ 0)$$

- 단, J_M, J_L : 전동기, 부하관성모멘트
- B_M, B_L : 전동기, 부하감쇠계수
- K_{SH} : 저탄성축비틀림정수
- ω_M, ω_L : 전동기, 부하각속도
- T_M, T_{SH}, T_L : 전동기토크, 축비틀림토크, 부하외란토크

제어대상인 2관성계의 제어량은 부하속도 ω_L 이지만 일반적으로 계측 불가능하므로, 계측 가능한 전동기속도 ω_M 을 제어한다.

3. 2관성계에 대한 H_∞제어기 설계

3.1 H_∞제어이론의 2관성계에의 적용

2관성계에 대하여 H_∞제어이론을 적용하기 위하여 그림 3과 같이 일반화플랜트를 설정한다. 그림 3에 있어서

$$C_z = \begin{pmatrix} C_p \\ C_p - C_l \\ C_l \end{pmatrix}, z_1 = \begin{pmatrix} z_{11} \\ z_{12} \\ z_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_M \\ \omega_M - \omega_L \\ \omega_L \end{pmatrix}$$

(2)

단, $C_p = (1 \ 0 \ 0)$, $C_l = (0 \ 0 \ 1)$

이고, T_L 은 부하외란토크, n 은 속도지령치, 와 W_d W_n 은 이를 위한 가중함수이다.

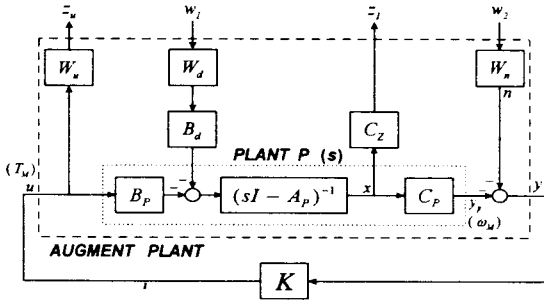


그림 3 H_∞제어 일반화플랜트

3.2 가중함수의 설정

그림 3의 H_∞제어 일반화플랜트에서 가중함수 W_d 는 부하 외란토크 T_L 로부터 전동기속도, 부하속도 및 그것들의 차속도까지의 페루프 전달함수의 게인특성을 지정하는 가중함수이다. 이 페루프 전달함수를 비틀림 진동이 없는 1관성계의 게인특성 형태로 주파수 정형할 수 있다면 축비틀림진동은 억제 가능하다. 따라서 가중함수 $|W_d|^{-1}$ 가 1관성계의 게인특성 형태로 되도록 가중함수 W_d 를 다음 식으로 설정한다.

$$W_d = \gamma_d \frac{(s + \omega_d)^2}{(s + 10^{-4})(s + 10^5)} \quad (3)$$

위 식에서 주어진 가중함수의 게인특성 $|W_d|^{-1}$ 는 그림 4와 같다.

가중함수 W_n 은 고주파대역에 있는 관측노이즈와 모델화 오차에 대한 영향을 제거하기 위해, W_n 은 고역특성을 가지도록 한다. W_n 은 일반적으로 혼합감도문제의 상보감도함수에 대한 가중함수에 해당하고 이것에 따라 식을 설정하면 다음 식과 같다.

$$W_n = \gamma_n \frac{(s + 100)}{(s + 10^5)} \quad (4)$$

위 식에서 주어진 가중함수의 게인특성 $|W_n|^{-1}$ 은 그림 4와 같이 저역필터 형태가 된다.

식 (3)과 식 (4)의 변수 γ_d , ω_d , γ_n 을 적절히 설정하고 Matlab을 사용하여 H_∞ 제어기 $K(s)$ 를 구할 수 있다. $\gamma_d=50$, $\omega_d=15$, $\gamma_n = 20$ 인 경우의 제어기 $K(s)$ 를 구하였다.

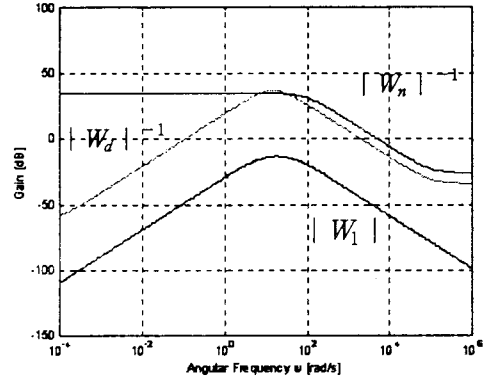


그림 4 가중함수의 보드선도

4. 부분적인 상태궤환과 공진비제어를 이용한 H_∞제어

4.1 부분적인 상태궤환을 이용한 H_∞제어

기존의 2자유도 H_∞제어기[4]는 목표치응답특성이 양호하나 2자유도 제어기 설계의 어려움과 제어기자체가 복잡해지는 단점이 있어 실제로 구현시 많은 연산량이 요구되어진다.

이러한 단점을 해결하기 위하여, Minor 루프가 목표치응답시 Damping을 증가시켜 오버슈트를 없애고 목표치응답을 개선할 수 있다는 점에 착안하여, 측정할 수 있는 상태변수를 피드백하여 Minor 루프를 형성함으로써 그림 5와 같은 목표치응답특성을 개선할 수 있는 제어기를 제안한다.

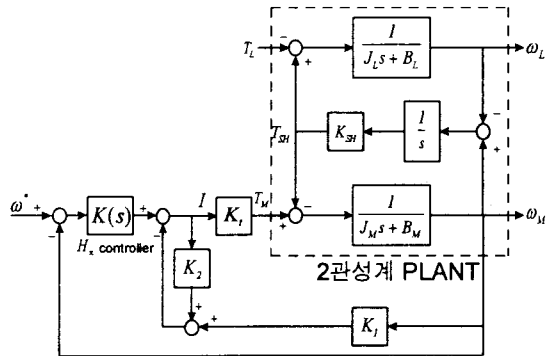


그림 5 부분적인 상태궤환을 이용한 H_∞제어기

그림 5는 기존의 H_∞제어기에 측정 가능한 상태변수인 전동기속도 ω_M 과 토크분 전류 I 를 피드백하여 minor 루프를 구성한 형태이다. K_1 , K_2 는 피드백 제어기로, H_∞제어기 $K(s)$ 는 피드포워드 제어기로 구성된 2자유도 제어기의 형태로 볼 수 있다. K_1 , K_2 는 상수 게인이므로 기존의 2자유도 H_∞제어기[4]보다 간단하고 연산량을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다.

4.2 피드백 게인 K_1 , K_2 설정

게인 K_1 , K_2 의 설정을 위하여 그림 5의 파라메타를 각각 $J_M=0.008$, $J_L=0.08$, $K_{SM}=78.16$ 으로 하고, 토크분 전류에 대한 토크상수를 $K_t=2.2365$, H_∞제어기를 $K(s)$ 로 하면, 속도지령치 ω^* 에서 부하속도 ω_L 까지의 전달함수의 특성방정식은 다음과 같은 형태이다.

$$F(s) = a_9 s^9 + a_8 s^8 + a_7 s^7 + a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0 \quad (5)$$

특성방정식인 식 (5)에서 제어대상 플랜트를 불안정하게 하는 양의 실수부분을 갖는 해가 없기 위한 조건은 모든 계수 (a_9, \dots, a_0)의 부호가 같아야 한다. 이 조건을 이용하여 피드백 게인 K_1, K_2 의 영역을 구한다. 이 영역 내에서 시뮬레이션을 통해 구한 최적의 게인은 $K_1=0.6, K_2=0.5$ 이다.

4.3 공진비제어 적용

2관성계에 공진비제어라는 개념을 도입한다. 공진비제어를 갖는 2관성계의 블록선도는 그림 6과 같다. 공진비제어는 축비틀림토크 T_{SH} 를 게인 K_R 에 비례시켜 피드백 시킴으로써 전동기의 관성을 가상적으로 변동시키는 제어방법이다. 축비틀림토크가 외란을 포함하기 때문에 제어대상에 의하여 축비틀림을 억제하는 작용을 할 수 있다.

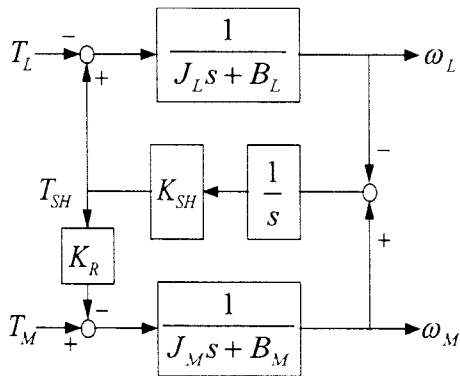


그림 6 공진비제어를 갖는 2관성계의 블록선도

5. 모의 실험

본 논문에서는 부분적인 상태제환과 공진비 제어를 이용한 2관성계의 H_∞ 제어를 제안하였고 기존의 H_∞ 제어와 비교하여 모의실험하였다. 실험시 관성비가 클수록 그 효과가 확실히 나타나므로 모의실험에서는 관성비를 0.008 : 0.08로 하였다. 축비틀림상수는 $K_{SH} = 78.16$ [Nm/rad]으로 하였다. 모의실험은 속도제어 모의실험과 부하인가 모의실험으로 나누어서 실시하였다.

5.1 속도제어 모의실험

속도제어 모의실험으로는 전동기를 무부하의 정지상태에서 600[rpm]의 속도지령을 스텝 인가한다.

그림 7은 기존의 H_∞ 제어에 대한 모의실험결과이다. 속도지령 증가시에 토오크분 전류는 -15 [A], -15 [A]로 제한되고 있으며 H_∞ 제어의 특성상 속도지령에의 도달 후에 50% 이상의 오버슈트가 발생되고 있다. 오버슈트에 따라 토오크분 전류가 -15 [A]까지 도달되고 있는데 이 경우 축비틀림 토크도 운동방향과 반대방향으로 걸리므로 비틀림축에 무리를 줄 수 있다.

그림 8은 부분적인 상태제환을 이용한 H_∞ 제어의 모의 실험결과이다. 속도지령에 도달하기까지의 응답시간은 0.4초로 기존의 제어기보다 우수함을 알 수 있다. 이는 측정 가능한 변수인 전동기의 속도와 토오크분 전류를 보상하여 줌으로써 2자유도제어가 가능하게 되었고 이에 따라 오버슈트 없이 제어한 결과이다. 토오크분 전류도 -3 [A] 정도에서 억제되어 비틀림축에 인가되는 축비틀림 토크를 줄일 수 있게 되었다.

부분적인 상태제환과 공진비 제어를 이용한 H_∞ 제어의 결과는 공진비제어를 외란인가 후에 적용하므로 그림 8과 같다.

모의실험결과와 같이 제안하는 부분적인 상태제환과 공진비 제어를 이용한 H_∞ 제어는 기존의 H_∞ 제어보다 응답시간이 빠르며 오버슈트도 발생되지 않아 비틀림축에 무리를 주지 않음을 알 수 있다.

5.2 부하인가 모의실험

부하인가 모의실험에서는 600[rpm]의 무부하 일정속도 하에서 순간적으로 100%에 해당하는 12.1 [Nm]의 외란을 2관성계에 인가한다.

그림 9는 기존의 H_∞ 제어에 대한 모의실험결과이다. 외란이 인가된 경우 전동기속도는 약 566[rpm]까지 떨어져 5.7% 하강하며 1.0초 후에 회복된다. 부하속도는 약 554[rpm]까지 떨어져 7.7% 하강하며 1.0초 후에 회복된다. 토오크분 전류는 8.9[A]가 걸린 후 감소하여 5.4[A]에서 안정된다.

그림 10은 부분적인 상태제환을 이용한 H_∞ 제어의 모의실험결과이다. 외란 후 전동기속도는 약 570[rpm]까지 떨어져 5.0% 하강하며 1.8초 후에 회복되며, 부하속도는 약 562[rpm]까지 떨어져 6.3% 하강한다. 이 결과로 기존의 H_∞ 제어보다 전동기의 속도는 0.7%, 부하속도는 1.4%의 외란억압효과가 더 있음을 알 수 있다. 이것은 부분적인 상태제환을 추가함으로써 2자유도 형태가 되어 외란억제 효과가 있다. 토오크분 전류도 최대값이 7.5[A]로 감소되어 축에 무리를 작게 준다.

그림 11은 부분적인 상태제환과 공진비 제어를 이용한 H_∞ 제어의 모의실험결과이다. 외란 후 전동기속도는 약 574[rpm]까지 떨어져 4.3% 하강하며 1.8초 후에 회복되며, 부하속도는 약 567[rpm]까지 떨어져 5.5% 하강한다. 공진비제어를 추가함으로써 외란이 더 억제됨을 알 수 있다.

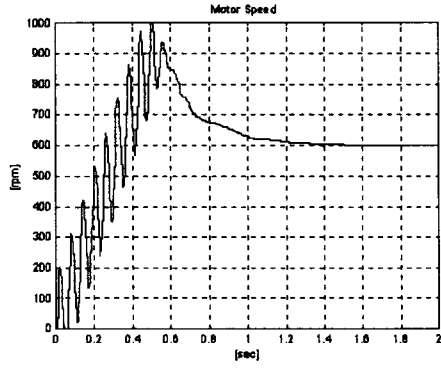
모의실험결과와 같이 제안하는 제어법은 기존의 H_∞ 제어보다 전동기의 속도는 1.4%, 부하속도는 2.2%의 부하 외란억제효과가 있고 축에의 비틀림을 감소시킨다.

6. 결론

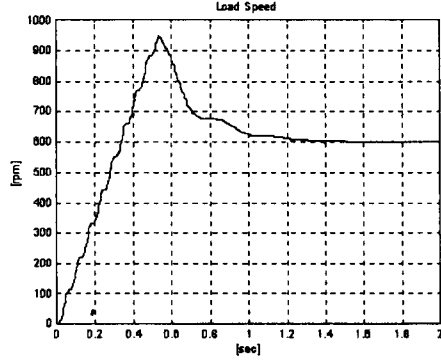
본 논문에서는 2관성계 시스템에서 목표치추종특성과 외란억압특성을 동시에 만족하는 새로운 제어법을 제안하였다. 기존의 H_∞ 제어는 외란에는 강인하지만 목표치응답특성시 오버슈트가 발생되어 비틀림축에 무리한 토오크를 가하게 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 측정 가능한 상태량인 전동기속도와 토오크분 전류를 피드백하여 보상함으로써 목표치추종성능을 개선하고 제어기의 구조도 간단해질 수 있는 부분적인 상태제환을 이용한 2관성계의 H_∞ 제어를 제안하였다. 또한 이 제어법에 공진비제어를 부가하여 외란에 대하여도 개선된 새로운 제어법을 제안하였다. 제안된 제어법이 간단하면서도 좋은 성능을 가짐을 모의실험을 통하여 확인하였다.

[참고 문헌]

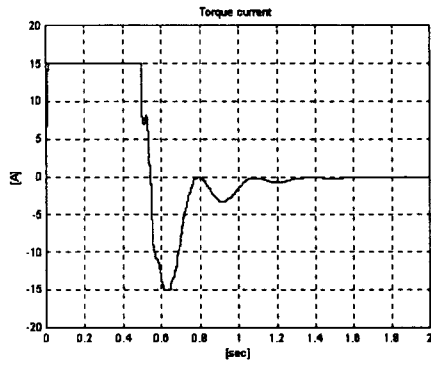
- [1] 杉林 道彦 外 2人, "2慣性共振系の状態フィードバックによる振動抑制制御とパラメータ変動を考慮した制御特性", 日本電気学会 産業應用部門全國大會, pp. 843~848, 1993
- [2] Jin-soo Kim, et. al, "The Vibration Suppression Control of the Two-Mass Resonant system using the H_∞ Filter", IEEE IECON, Vol. 3, pp. 1464~1470, 1998
- [3] 大内茂人 外 2人, " H_∞ 制御理論に基づく電動機の制振制御", 日本電気学会論文誌, Vol.113-D, No. 3, pp. 325~332, 1993
- [4] 森本茂雄 外 1人, " H_∞ 制御理論を用いた共振機械系の2自由度速度制御", 日本電気学会論文誌, Vol.116-D, No. 1, pp. 65~70, 1996



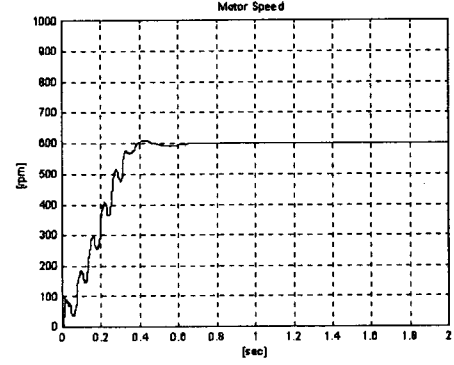
(a) 전동기속도(100 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



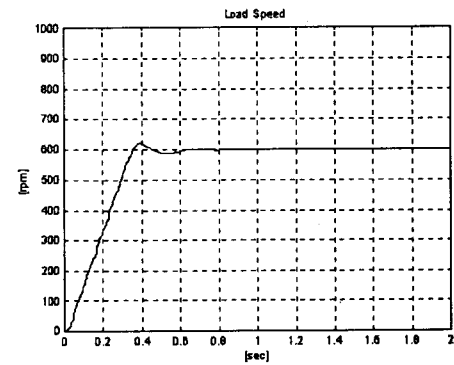
(b) 부하속도(100 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



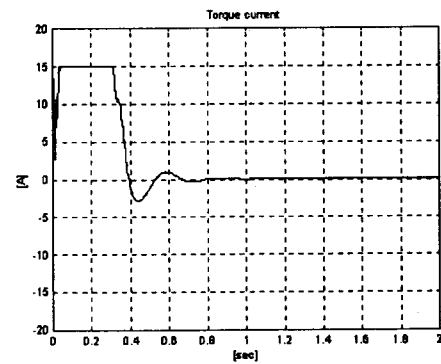
(c) 토크분 전류(5 [A]/div, 0.2 [sec]/div)
그림 7 기존의 H ∞ 제어



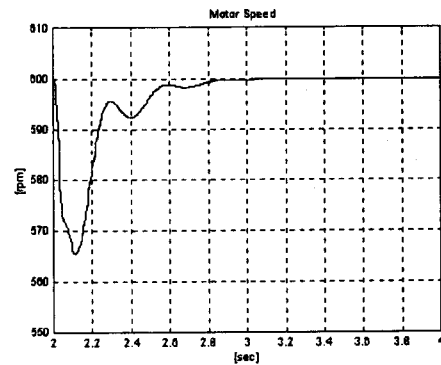
(a) 전동기속도(100 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



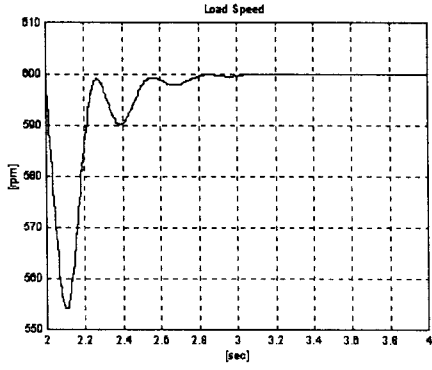
(b) 부하속도(100 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



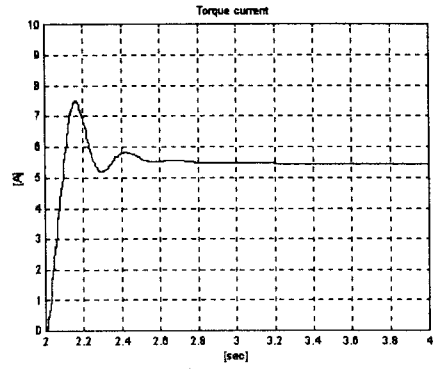
(c) 토크분 전류(5 [A]/div, 0.2 [sec]/div)
그림 8 부분적인 상태게환을 이용한 H ∞ 제어



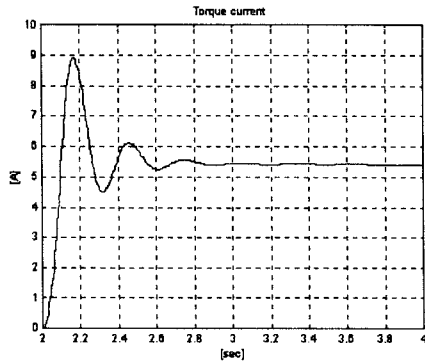
(a) 전동기속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



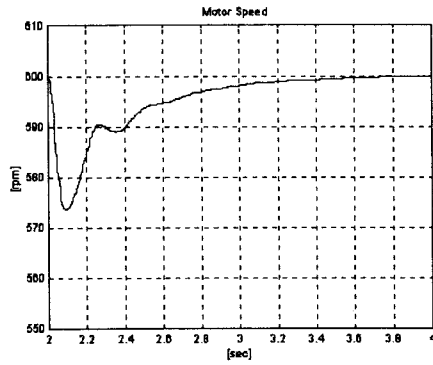
(b) 부하속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



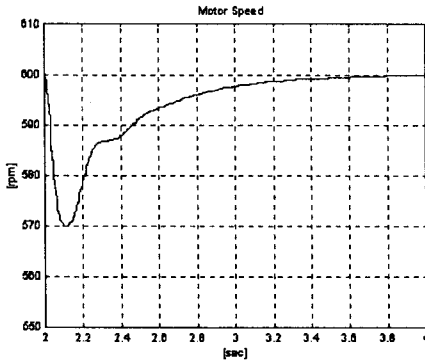
(c) 토오크분 전류(1 [A]/div, 0.2 [sec]/div)
그림 10 부분적인 상태제환을 이용한 H_∞제어



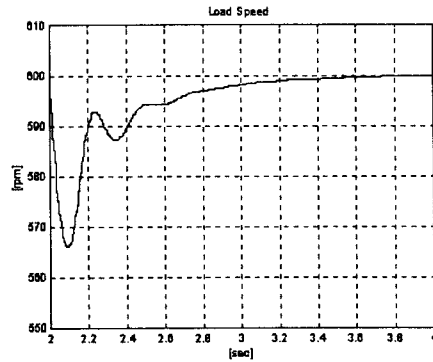
(c) 토오크분 전류(1 [A]/div, 0.2 [sec]/div)
그림 9 기존의 H_∞제어



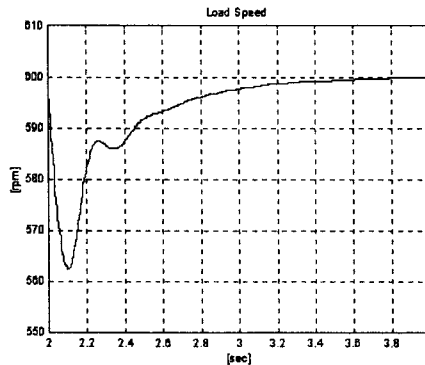
(a) 전동기속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



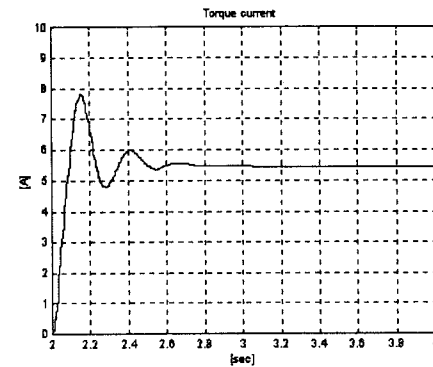
(a) 전동기속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



(b) 부하속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



(b) 부하속도(10 [rpm]/div, 0.2 [sec]/div)



(c) 토오크분 전류(1 [A]/div, 0.2 [sec]/div)
그림 11 부분적인 상태제환과 공진비제어를 이용한 H_∞제어