

적응 상태 관측자를 이용한 SI 엔진 속도제어

김응석*, 이호섭**, 이형찬***, 양해원**

* 한라대학교 전기공학부, ** 한양대학교 전기공학과, ***대진대학교 전기공학과

Adaptive Observer Based Speed Control of SI Engines

Eung-Seok Kim*, Hyo-Seub Lee**, Hyung-Chan Rhee***, Hai-Won Yang**

* Halla Institute of Technology, ** Hanyang University, ***Daejin University

Abstract — In this paper, the adaptive nonlinear state observer is proposed to estimate the internal states and the nonlinearities of 4-cylinders 4-cycles spark ignition(SI) engines. The observed states and nonlinearities will be used to design the adaptive feedback linearization controller for reducing the fluctuation of idle speed. The simulation results are represented to show the validity of the proposed nonlinear observer-based adaptive controller.

1. 서 론

차량 엔진의 공회전속도를 정확한 기준속도로 유지되도록 하는 것은 탑승자의 승차감 향상뿐만 아니라 연비의 향상 및 배기가스의 저감 효과도 어느 정도 기대할 수 있다. 엔진 공회전속도 제어시의 주안점은 4기통 4행정 엔진의 구조적인 특성상 불가피하게 발생하는 정현파 형태의 Fluctuation을 가능한 한 줄이고자 노력함과 동시에 전기적/기계적 부하 변동 발생시 신속한 안정화에 있다고 할 수 있다. 엔진의 회전속도에 대한 동특성은 비선형이면서 state diffeomorphism 조건이 쉽게 만족되지 않으므로 궤환선형화 방식의 제어기 설계가 용이하지 않다. 또한 내부 파라미터의 시변성 또한 제어기 설계시 반드시 고려해야할 문제점이다. 기존에는 이를 해결하기 위하여 여러개로 구분한 동작점 근방에서 선형화된 모델을 이용하여 선형제어기를 설계하였고, 파라미터의 시변성은 Gain scheduling 방식으로 해결해 왔다. 그러나 이러한 방식은 각 동작점에 대한 적절한 제어기의 설계 및 적절한 제어기 이득의 설정을 위하여 많은 양의 시뮬테이터를 필요로 한다. 이는 곧바로 생산단가의 상승문제로 직결되며, 자동차의 운행 특성상 예상치 못한 문제 발생시 제어기의 적절한 대응을 기대하기란 불가능에 가깝다고 할 수 있다.

이에 대한 해결방안으로 본 논문에서는 우선, 궤환선형화가 쉽지않은 엔진 동특성 모델에 대한 제어기의 출력단(또는 모델의 입력단)에 사전필터(Pre-Filter)를 설계함으로써 궤환선형화 제어기의 설계가 가능함을 보인다. 그리고 파라미터 불확실성 및 시변성에 강인한 특성을 가진 파라미터 적응 궤환 선형화 제어기를 설계함으로써 전기점화 방식(Spark Ignition, 이하 SI) 엔진의 속도제어 문제를 해결하고자 한다. 설계한 제어기의 안정성 및 오차의 수렴성을 수학적으로 증명하고, 실용적인 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토하기로 한다. 본 논문의 구성은 2장에서 제어대상인 4기통 4행정 전기점화식 엔진에 대한 수학적 모델 및 비선형 상태공간 모델을 제시하고, 3장에서는 제시된 상태공간 모델에 대하여 적응 상태관측자의 설계문제를 다룬다. 4장에서는 관측된 상태들을 이용하여 궤환선형화 제어기를 설계함으로써 전체 시스템의 안정도가 보장되면서 속도오차 및 가속도 오차가 '0'으로 수렴함을 수학적으로 증명한다. 5장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제시된 관측자 및 제어기의 타당성을 보이고, 마지막으로 결론을 내리도록 한다.

2. 엔진모델

4기통 4행정 가솔린 엔진의 공회전 속도제어 모델은 Vachtsevanos[1] 등이 제안한 것으로서 다음식으로 주어진다.

$$\dot{P} = k_p (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}), \quad k_p = 42.40 \tag{1}$$

$$\dot{m}_{ai} = (1 + 0.907\alpha + 0.0998\alpha^2)g(P) \tag{2}$$

$$g(P) = \begin{cases} 1, & \text{if } P < 50.6625 \\ 0.0197(101.325P - P^2)^{1/2}, & \text{if } P \geq 50.6625 \end{cases} \tag{3}$$

$$\dot{m}_{ao} = -0.0005968N - 0.1336P + 0.0005341NP + 0.00001757NP^2 \tag{4}$$

$$m_{ao} = \dot{m}_{ao}(t - \tau)/(120N), \quad \tau = 45/N \tag{5}$$

$$\dot{N} = k_N(T_i - T_L), \quad k_N = 54.26 \tag{6}$$

$$T_i = -39.22 + 325024m_{ao} - 0.0112\delta^2 + 0.635\delta + (0.0216 + 0.000675\delta)N(2\pi/60) - 0.000102N^2(2\pi/60)^2 \tag{7}$$

$$T_L = (N/263.17)^2 + T_d \tag{8}$$

윗 식에서, α 는 스로틀 개도, δ 는 점화진각으로서 각각 흡기다기관내 압력 P 와 엔진 속도 N 에 대해 비선형적으로 작용하고 있으며, 직접적인 궤환선형화 제어기의 설계또한 용이하지 않다. 이러한 어려움을 쉽게하기 위하여 다음과 같이 필터링된 제어입력을 도입하기로 한다.

$$\dot{\alpha} = -a_p \alpha + b_p u_p \tag{9}$$

$$\dot{\delta} = -a_N \delta + b_N u_N \tag{10}$$

여기서 a_p, b_p 와 a_N, b_N 은 각각 양의 상수로 설계 파라미터이며, u_p, u_N 은 각각 스로틀 개도와 점화진각을 제어하기 위한 제어입력이다. 윗 식 (1)~(5) 및 (9)는 스로틀개도 α 를 입력으로 하고 흡기다기관 내 압력 P 를 출력으로 하는 입출력 모델이다. 이를 상태공간 모델로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [N \ P \ NP \ NP^2] \begin{bmatrix} \theta_{P11} \\ \theta_{P12} \\ \theta_{P13} \\ \theta_{P14} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [g(P) \ g(P)\alpha \ g(P)\alpha^2] \begin{bmatrix} \theta_{P21} \\ \theta_{P22} \\ \theta_{P23} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} 0 \\ b_p \end{bmatrix} u_p$$

이를 정리하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_P &= A_P X_P + b_1 Y_P^T \theta_{P1} + b_1 Y_P^T \theta_{P2} - b_1 \alpha + B_p u_P \tag{12} \\ y_P &= C_P^T X_P \end{aligned}$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_p \end{bmatrix}, \quad B_P = \begin{bmatrix} 0 \\ b_p \end{bmatrix}, \quad C_P^T = [1 \ 0], \quad b_1^T = [1 \ 0],$$

$$X_P = [P \ \alpha]^T \text{로서 상태벡터, } Y_P^T = [N \ P \ NP \ NP^2] \text{과}$$

$$Y_P^T = [g(P) \ g(P)\alpha \ g(P)\alpha^2]^T \text{는 측정치 벡터(measurement)}$$

vector)이다. $\theta_{P1}^T, \theta_{P2}^T$ 는 모델 내부 파라미터 벡터들로서 $\theta_{P1}^T = [\theta_{P11} \ \theta_{P12} \ \theta_{P13} \ \theta_{P14}]$ 와 $\theta_{P2}^T = [\theta_{P21} \ \theta_{P22} \ \theta_{P23}]$ 이다. 파라미터 벡터 각각의 요소들은 $\theta_{P11} = 0.0005968 k_P$, $\theta_{P12} = 0.1336 k_P$, $\theta_{P13} = 0.0005341 k_P$, $\theta_{P14} = 0.00001757 k_P$ 및 $\theta_{P21} = k_P$, $\theta_{P22} = 0.907 k_P$, $\theta_{P23} = 0.0998 k_P$ 이다. 이와 같은 방식으로 식(6)~(8)의 점화진각 δ 를 입력으로 하고 엔진속도 N 을 출력으로 하는 입력력 모델을 상태공간 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{M} \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta \ \delta^2 \ \delta N \ N \ N^2] \begin{bmatrix} \theta_{M1} \\ \theta_{M2} \\ \theta_{M3} \\ \theta_{M4} \\ \theta_{M5} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [1 \ m_{\infty} \ T_d] \begin{bmatrix} \theta_{N21} \\ \theta_{N22} \\ \theta_{N23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_N \end{bmatrix} u_N$$

이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_N &= A_N X_N + b_1 Y_M^T \partial_M + b_1 Y_{N2}^T \partial_{N2} + B_N u_N \\ y_N &= C_N^T X_N \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $A_N = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_N \end{bmatrix}$, $B_N = \begin{bmatrix} 0 \\ b_N \end{bmatrix}$, $C_N^T = [1 \ 0]$, $b_1^T = [1 \ 0]$ 이고, $X_N = [N \ \delta]$ 로서 상태벡터, $Y_M^T = [\delta \ \delta^2 \ \delta N \ N \ N^2]$ 와 $Y_{N2}^T = [1 \ m_{\infty} \ T_d]$ 는 측정치 벡터이다. 모델 내부 파라미터 벡터들 $\theta_{M1}^T, \theta_{N2}^T$ 는 각각 $\theta_{M1}^T = [\theta_{M1} \ \theta_{M2} \ \theta_{M3} \ \theta_{M4} \ \theta_{M5}]$ 와 $\theta_{N2}^T = [\theta_{N21} \ \theta_{N22} \ \theta_{N23}]$ 이며, 파라미터 벡터 각각의 요소들은 $\theta_{M1} = 0.635 k_N - 1$, $\theta_{M2} = -0.0112 k_N$, $\theta_{M3} = 0.000675(2\pi/60) k_N$, $\theta_{M4} = 0.0216(2\pi/60) k_N$, $\theta_{M5} = -(0.000102(2\pi/60)^2 + (1/263.17)) k_N$ 이고 $\theta_{N21} = -39.22 k_N$, $\theta_{N22} = 325024 k_N$, $\theta_{N23} = -k_N$ 이다.

3. 적용 상태관측자 설계

식(14)로 주어진 엔진속도에 대한 상태공간 모델에 대해서 적용 상태 관측기를 다음과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_N &= A_N \hat{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M + b_1 Y_{N2}^T \partial_{N2} \\ &\quad + B_N u_N + L_{OV} [y_N - C_N^T \hat{X}_N] \\ \hat{y}_N &= C_N^T \hat{X}_N \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 ($\hat{\cdot}$)는 상용하는 상태 및 파라미터에 대한 추정치이며, $L_{OV} = [l_{OM} \ l_{ON}]$ 는 양의 상수를 요소로 갖는 관측자 이득 벡터이다. 상태관측 오차를 $\tilde{X}_N = \hat{X}_N - X_N$ 로 정의하면, 상태관측 오차방정식이 아래와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_N &= A_N \tilde{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M - b_1 Y_M^T \partial_M \\ &\quad + b_1 Y_{N2}^T \partial_{N2} + b_1 Y_{N2}^T \partial_{N2} - L_{OV} C_N^T \tilde{X}_N \\ &= A_{OV} \tilde{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M + b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $A_{OV} = A_N - L_{OV} C_N^T$ 이고, $\partial_M = \theta_M - \hat{\theta}_M$ 로 파라미터 적용 오차이다. 뒷 식에 $b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}]$ 를 더하고 정리하면 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_N &= A_{OV} \tilde{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M \\ &\quad + b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] + b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] \\ &= A_{OV} \tilde{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M + b_1 Y_{N2}^T \partial_{N2} + b_1 \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $\hat{Y}_{N2}^T = Y_{N2}^T - \hat{Y}_{N2}^T$ 이고 $\partial_{N2} = \theta_{N2} - \hat{\theta}_{N2}$ 로서 파라미터 적용오차이다. 상기의 상태오차방정식에 대해서 다음의 정리가 성립함으로 보임으로써 본 논문에서 설계한

적용 상태관측기의 타당성을 입증하기로 한다.

정리 1: 식(17)에 대해

- 1) $b_1^T P_N = C_N^T$ 을 만족하는 $P_N = P_N^T > 0$ 가 존재한다.
- 2) $\|Y_{N2}\| \leq \gamma_1$ 을 만족하는 상수 $\gamma_1 > 0$ 이 존재한다.
- 3) $\|\theta_M\| \leq \gamma_2, \|\theta_{N2}\| \leq \gamma_3$ 을 만족하는 $\gamma_2, \gamma_3 > 0$ 가 존재한다.
- 4) $A_{OV}^T P_N + P_N A_{OV} = -Q_N$ 와 $2\gamma_1 \gamma_3 \|C_N\| < \lambda_{\min}(Q_N)$ 의 부등 관계를 만족하는 $Q_N = Q_N^T > 0$ 가 존재한다.
- 5) 위의 조건들에 따라 다음의 적용상태 관측자는

$$\dot{\hat{X}}_N = A_N \hat{X}_N + b_1 Y_M^T \partial_M + b_1 \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2} + B_N u_N + L_{OV} [y_N - C_N^T \hat{X}_N] \quad (18)$$

$$\partial_M = -\Gamma_M Y_M [y_N - C_N^T \hat{X}_N], \Gamma_M = \Gamma_M^T > 0 \quad (19)$$

$$\partial_{N2} = -\Gamma_{N2} \hat{Y}_{N2} [y_N - C_N^T \hat{X}_N], \Gamma_{N2} = \Gamma_{N2}^T > 0 \quad (20)$$
 모든 $t \geq 0$ 에 대해 $\hat{X}_N, \dot{\hat{X}}_N \rightarrow 0$ 및 $b_1 [Y_M^T \partial_M - \hat{Y}_M^T \partial_M] + b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] + b_1 [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] \rightarrow 0$ 이 성립한다.

이제까지 비선형 엔진 모델에 대한 적용 상태관측자를 설계하고 이에 대한 타당성을 수학적으로 증명하였다. 다음절에서는 이 절에서 제안한 상태관측자를 이용하여 개환 선형화제어기를 설계하기로 한다.

4. 엔진 속도제어기 설계

입력 필터시스템 식(10)의 설계시 $a_N = b_N \gg 1$ 이 되도록 정해줄 경우 특이성동이론에 근거하여 SI 엔진의 공회전 속도 운전영역에서 $\delta = u_N$ 으로 간주할 수 있다[10]. 따라서 식(14)의 엔진속도제어 모델은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_M &= Y_M^T \partial_M + Y_{N2}^T \partial_{N2} + u_N \\ y_N &= X_M \end{aligned} \quad (21)$$

위의 제어모델에 대하여 제어입력 u_N 을 다음과 같이 설계하고자 한다.

$$u_N = \nu - Y_M^T \partial_M - Y_{N2}^T \partial_{N2} \quad (22)$$

여기서 ν 는 선형 제어입력으로서 다음과 같다.

$$\nu = X_{NR} - a_2(X_M - X_{NR}) - a_1 \int (X_M - X_{NR}) \quad (23)$$

여기서 X_{NR} 은 기준속도 설정치로서 두번 미분가능하다. 식(22)에 $Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}$ 를 더한뒤 식(23)과 같이 식(21)에 대입하면 아래의 페루프 시스템 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_M &= \nu + [Y_M^T \partial_M - \hat{Y}_M^T \partial_M] \\ &\quad + [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] + [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] \end{aligned} \quad (24)$$

정리 1로부터 $[Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] + [Y_{N2}^T \partial_{N2} - \hat{Y}_{N2}^T \partial_{N2}] + [Y_M^T \partial_M - \hat{Y}_M^T \partial_M] \rightarrow 0$ 이므로 식(24)의 페루프시스템 방정식은 식(23)을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{X}_M = \dot{X}_{NR} - a_2(X_M - X_{NR}) - a_1 \int (X_M - X_{NR}) \quad (25)$$

속도오차를 $X_{E1} = X_M - X_{NR}$ 로 정의하고 뒷식을 시간에 관해 한번 미분해서 정리하면

$$\dot{X}_{E1} + a_2 X_{E1} + a_1 X_{E1} = 0 \quad (26)$$

이 성립한다. 따라서 $X_{E1} \rightarrow 0$ 및 $\dot{X}_{E1} \rightarrow 0$ 이 만족됨을 알 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시한 적응 비선형 상태관측자를 이용한 궤환선형화 방식의 공회전 속도제어알고리즘의 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하기로 한다. 기준속도는 750 [rev/min] 로 하였으며, ISC valve(또는 by-pass air valve)의 PWM control duty cycle을 0[%]에서 100[%]로 보았을 때 스로틀개도 α 는 0[deg]에서 90[deg]로 선형조합이 가능한 것으로 간주하였다. 기준속도 750[rev/min]에 대한 초기 스로틀개도는 ISC valve control duty cycle로 환산할 경우 50[%]으로 하였으며, 초기 점화진각 δ 는 BTDC 15[deg]로 하였다.

그림 1은 기준속도로서 12.5 [rps] - 750[rpm]이며, 그림 2와 3은 각각 엔진 회전속도 및 추정치이다. 그림 4와 5는 각각 시스템 비선형성 및 그 추정치이다. 그림에서 알 수 있듯이 비선형성에 대한 추정치가 실제와 같아질 때 회전속도 추정치도 실제와 같아지게 됨을 볼 수 있다.

결 론

본 논문에서는 우선, 궤환선형화가 쉽지않은 엔진 동특성 모델에 대한 제어기의 출력단(또는 모델의 입력단)에 사전필터(Pre-Filter)를 설계함으로써 궤환선형화 제어기의 설계가 가능토록 했다. 적응 상태관측자를 제한함으로써 속도제어 모델의 비선형성 및 파라미터 불확실성을 추정할 수 있음을 보였다. 그리고 이에 근거한 적응 궤환 선형화 제어기를 설계함으로써 전기점화 방식 엔진의 속도제어 문제를 해결하였다. 설계한 제어기의 안정성 및 오차의 수렴성을 수학적으로 증명하고, 실용적인 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토하였다. 향후 실제 엔진에 대하여 적용함으로써 실용적인 가능성의 확인이 필요할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

- [1] G. Vachtsevanos, "Idle Speed Control of an Automotive Engine Using a Systematic Fuzzy Logic Methodology," IFAC Triennial World Congress, Sydney, Australia, 1993, pp.29-34.
- [2] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Truncated Backpropagation Through Time and Kalman Filter Training for Neurocontrol," IEEE World Congress on Computational Intelligence, Orlando, Florida, USA, June 27-29, 1994, pp.2488-2493.
- [3] T. Vesterholm and E. Hendricks, "Advanced Nonlinear Engine Speed Control Systems," Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, Maryland, USA, 1994, pp.1579-1580.
- [4] A. S. Martinez and M. Jamshidi, "Design of Fuzzy Logic Based Engine Idle-Speed Controllers," Proceedings of the 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Detroit, Michigan, USA, 1993, pp.1544-1547.
- [5] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Automotive Engine Idle Speed Control with Recurrent Neural Networks," Proceedings of the 1993 American Control Conference, San Francisco, California, USA, June 2-4, 1993, pp.311-316.
- [6] D. Shim, J. Park, P.P. Khargonekar, and W.B. Ribbens, "Reducing Automotive Engine Speed Fluctuation at Idle," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol.4, No.4, pp. 404-410, July, 1996.
- [7] E.A. Misawa and J.K.Hedrick, "Nonlinear Observers-A State-of-the-Art Survey," Trans. of the ASME, Vol.111, pp.344-352, Sept. 1989.
- [8] R.A. Zitar and M.H. Hassoun, "Neurocontroller Trained with Rules Extracted by a Genetic Assisted Reinforcement Learning System," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol.6, No.4, pp.859-879, July 1995.
- [9] P.V. Kokotovic, et al., *Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*, Academic Press, 1986.

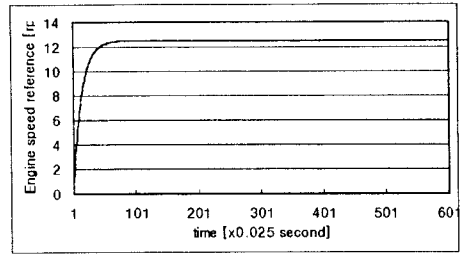


Fig. 1. The reference speed.
그림 1. 기준속도.

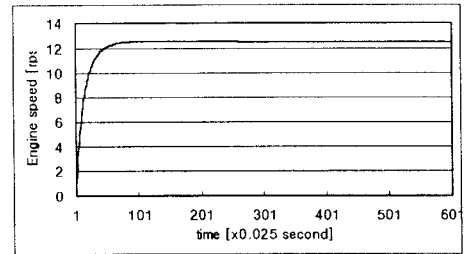


Fig. 2. Engine revolution speed.
그림 2. 엔진 회전속도.

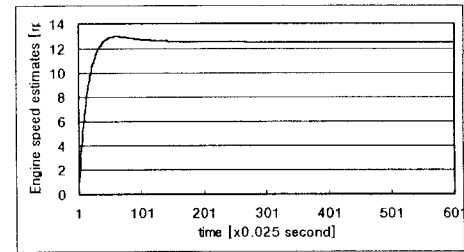


Fig. 3. Engine speed estimates.
그림 3. 엔진 회전속도 추정치.

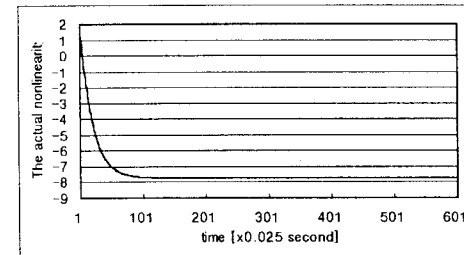


Fig. 4. The system nonlinearity $Y_M^T \theta_M + Y_{N2}^T \theta_{N2}$.
그림 4. 시스템 비선형성 $Y_M^T \theta_M + Y_{N2}^T \theta_{N2}$.

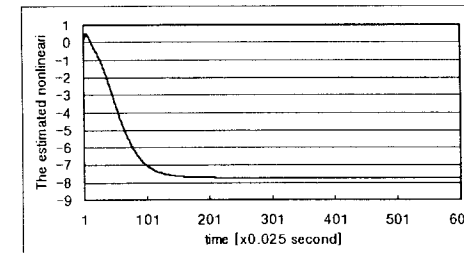


Fig. 5. The system nonlinearity estimates.
그림 5. 시스템 비선형성 추정치 $\hat{Y}_M^T \hat{\theta}_M + \hat{Y}_{N2}^T \hat{\theta}_{N2}$.