

SIL 기반 근접장 기록 시스템의 간극 제어를 위한 최적화된 PID 제어 알고리즘 성능평가

Air-Gap Control Using Optimal PID Controller for SIL-Based Near-Field Recording System

신원호*, 김중곤**, 박노철[†], 양현석*, 박영필*, 박경수**

Won-Ho Shin, Jung-Gon Kim, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang,
Young-Pil Park and Kyoung-Su Park

(2009년 3월 3일 접수; 2009년 3월 19일 심사완료; 2009년 3월 19일 게재확정)

Abstract

In SIL-based NFR servo systems, the residual error and the overshoot that are occurred in the process of the mode-switching servo which consists of approach, gap-control modes, and safety mode are reduced by using PID controller. However, the design method of conventional PID controller is not sufficient for the stable air gap control system. Therefore, the optimal PID controller using LQR manner is more useful to find the designed parameters of PID controller. In this paper, we show that the performance of the optimal PID controller is better than that of the lead-lag controller.

Key Words : lead-lag controller, near-field recording, optimal PID controller, solid immersion lens

1. 서론

IT 산업이 급속하게 발전함에 따라 정보의 대량화로 인하여 처리 및 저장해야 할 정보 또한 많아지고 있다. [1] 이에 따라 고용량 광 정보 저장 장치의 필요성이 증가하고 있으며, holographic digital data storage (HDD), super resolution near field structure (Super-RENS), solid immersion lens (SIL) based NFR system 과 같은 많은 연구가 진행되고 있다. [2][3][4] 이러한 연구 중에서 SIL 기반 근접장 기록 (near field recording: NFR) 기술이 고용량 데이터 기록을 위한 차세대 광 저장 장치로서 가장 강력한 후보로서 고려되고 있다. 하지만 안정된 NFR 시스템을 실현하기 위해서는 기술적으로 해결해야

할 과제들이 있다.

NFR 시스템에서는 시스템의 특성상 기록 및 재생을 위해 디스크와 대상 플렌트 사이의 간극을 50 nm 이하로 유지해야만 한다. 간극이 기존 광 정보 저장 장치에서의 대상 플렌트보다 동작 가능 거리가 훨씬 작기 때문에 충돌로 인한 디스크 정보의 훼손 및 SIL 의 손상 등의 문제로 인하여 시스템의 안정성을 저해하는 요소가 될 수 있다. 충돌의 원인으로는 SIL 기반 근접장 시스템의 특성상 개루프 제어와 폐루프 제어로 전환되는 제어 방식을 사용하는데 전환 시 발생하는 오버슈트가 있고, 또한 디스크 회전 시 축방향 외란 및 디스크 표면의 스크래치 등이 있다. [5]

본 논문에서는 앞서 언급한 접촉 원인이 발생하는 경우에도 NFR 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 PID 제어를 사용하였다. PID 제어기는 제어기가 가지고 있는 파라미터를 이용하여 과도 응답과 정상상태 응답 모두를 제어하며, 많은 기계 시스템에 보다 효과적이고 확실한 해결책을 제공한

[†] 연세대학교 정보저장기기 연구센터

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2133-4677

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 정보저장기기 연구센터

다. [6] PID 제어기에서 I-제어기 파라미터를 조절하여 간극 제어 모드에서의 잔류 오차를 줄일 수 있으며, P-제어기의 파라미터를 조절하여 개루프에서 페루프로 전환 될 때 발생하는 오버슈트를 줄일 수 있다. 오버슈트를 줄임으로써 플랜트가 초기 위치에서 목표 간극까지 접근하는 어프로치 모드의 속도를 증가 시켜 간극제어 모드 도달 시간을 줄일 수 있다.

PID 제어기는 제어 분야에서 사용되는 흔히 사용되는 제어기이지만 제어기의 파라미터를 실험적으로 찾아야 함으로 시간적인 소모가 필요하다는 단점을 가지고 있다. [7][8] 따라서 PID 튜닝 알고리즘인 Linear-Quadratic Regulator (LQR) 방식을 NFR 시스템에 사용하여 최적화된 제어기의 파라미터를 이전 방식에 비해 유용하게 찾을 수 있도록 하였다. [9] LQR 방식을 사용하여 얻은 제어 파라미터를 이용하여 PID 제어기를 사용하여 NFR 시스템의 안정성 저하를 야기시킬 수 있는 오버슈트와 잔류오차를 감소시켰으며, 이를 통해 제안한 LQR 방식을 사용한 최적화된 PID 제어기가 lead-lag 제어기에 비해 NFR 서보 시스템의 안정성을 효과적으로 확보할 수 있음을 확인하였다.

2. NFR 광학 시스템 설계

그림 1 에서 파장을 405 nm 를 사용한 NFR 광학 시스템의 실험 장치를 보여 준다. SIL 광학계의 NA(개구수)는 1.84 이며, laser diode 에서 나온 빔은 BS, PBS, QWP 등으로 구성되어 있는 광학 시스템을 통해 SIL 의 바닥면에 입사한다. 빔이 SIL 을 통과하고 디스크에 반사된 빔의 광량을 Photo diode 에서 센싱하여 간극을 측정한다.

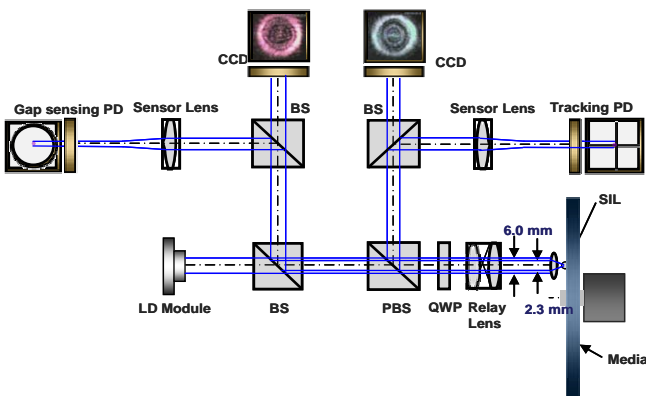


Fig.1. Overview of the experimental setup for NFR optical system

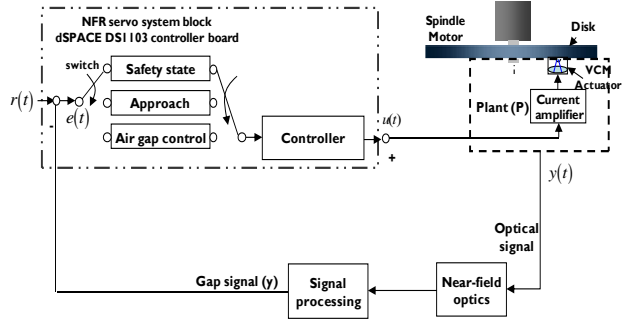


Fig.2. NFR servo system

3. NFR 서보 시스템 설계

NFR 서보 시스템은 그림 2 과 같이 구성하였다. 플랜트는 3 단계를 거쳐 초기 위치에서 목표 간극까지 접근한다. 우선 개루프 제어 모드로 시작하여 미리 정의한 근접장 영역까지 접근시키며, 이 과정을 어프로치 모드라고 정의한다. 그 다음으로 어프로치 모드에서 간극을 일정하게 제어하는 간극 제어 모드로 전환된다. 간극을 일정하게 제어할 때 외부 충격에 의해 최소 한계 간극으로 정의한 5 nm 이하가 되면 디스크와 SIL 의 충돌을 방지하기 위해 피드백 루프는 안전모드로 전환된다.

3.1 Lead-Lag 제어기 설계

플랜트는 VCM 액츄에이터와 전류 증폭기로 구성되어 있으며, 동특성을 sine-sweep method 으로 구한 결과는 그림 3 과 표 1 에 나타내었고, 전달함수는 다음과 같다. 여기서, ζ , ω_n , 그리고 k 는 각각 감쇠비, 공진 주파수, open-loop 게인이다.

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{132.64 \times 1.777 \times 10^5}{s^2 + 183.7s + 1.777 \times 10^5} \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{V}} \right) \quad (1)$$

여기서, ζ , ω_n , 그리고 k 는 각각 감쇠비, 공진 주파수, open-loop 게인이다. 플랜트의 전달함수를 바탕으로 SISO-tool 를 이용하여 lead-lag 제어기를 설계하였으며, NFR 서보 시스템의 안정성을 확보할 수 있도록 이득여유, 위상여유, 대역폭, 그리고 open-loop 게인을 설계하였다. 안정성을 위한 위상여유는 30 deg 에서 40 deg 이며, open-loop 게인은 목표 간극 2 nm 와 디스크의 외란 55 μm 을 고려하여 95 dB 이상 되어야 한다. 설계한 개루프 전달 함수와 설계 파라미터는 그림 4 와 표 2 로 나타냈다.

3.2 PID 제어기 설계

PID 제어기는 식 (2)와 같이 설계하였으며, PID 제어기는 P, I, 그리고 D 제어기의 합으로 나타낼 수 있다.

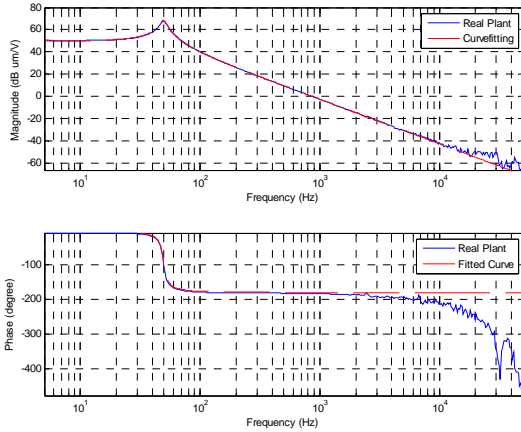


Fig.3. Frequency response and linear transfer functions of the measured plant

Table 1 Dynamic characteristic of the designed plant

Parameter	Value
First resonance frequency (Hz)	50.05
Second resonance frequency(Hz)	20.94
5Hz sensitivity (μm/V)	306.74
Gain of current amplify (A/V)	0.08

$$G_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2)$$

여기서, k_p , k_i 그리고 k_d 는 PID 제어기의 proportional, integral, 그리고 derivative 설계 파라미터이다. 간극 오차 신호는 다음과 같이 정의하였다.

$$e(t) = r - y(t) \quad (3)$$

r 은 목표 값이며 $y(t)$ 는 출력 값이다. 이를 다시 표현하면

$$u(s) = e(s) \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) \quad (4)$$

설계한 개루프 전달함수는 그림 5 와 표 3 과 같다.

4. 최적화된 PID 제어기 설계

PID 제어기는 설계가 간편하지만, 최적의 제어 파라미터를 찾기가 어려운 단점을 지고 있으며, 이를 찾기 위해서는 많은 실험을 통하여 얻어진다. 시간적 소모를 줄이고 PID 제어기의 최적의 제어 파라미터를 찾기 위해 LQR 방식을 NFR 시스템에 적용하였다. 그림 6 는 LQR 방식을 사용한 SIL 기반 NFR 시스템의 최적화된 PID 제어기를 보여주고 있다. 플랜트 전달함수인 식 (1) 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

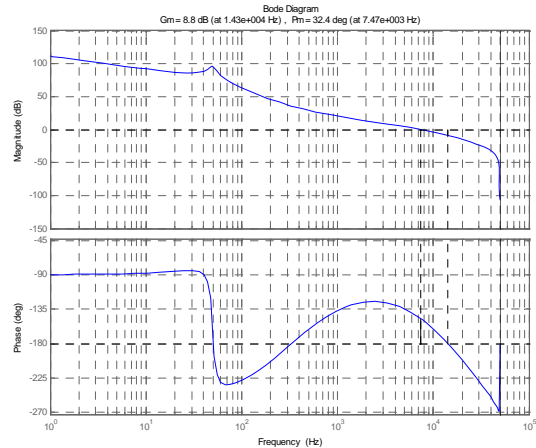


Fig.4. Open loop transfer function of the air gap controller using lead-lag type

Table 2 Dynamic characteristic of the open loop transfer function using lead-lag controller

Parameter	Value
Cut-off frequency	7.62 kHz
Open-loop gain	Over 95 dB [5Hz]
Gain margin	8.8 dB
Phase margin	32.4 deg

$$s^2 y(s) + 2\zeta\omega_n s y(s) + \omega_n^2 y(s) = Ku(s) \quad (5)$$

방정식 (5)에 s 을 곱하면

$$s^3 y(s) + 2\zeta\omega_n s^2 y(s) + \omega_n^2 s y(s) = Ksu(s) \quad (6)$$

역 라플라스 변환하면

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = Ku(t) \quad (7)$$

여기서 $\dot{e}(t) = -\dot{y}(t)$, $\ddot{e}(t) = -\ddot{y}(t)$, $\ddot{\ddot{e}}(t) = -\ddot{\ddot{y}}(t)$ 시스템은 다음과 같이 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$q(t) = \begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{e}(t) \\ \ddot{e}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

그리고 이를 미분하면

$$\dot{q}(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}(t) \\ \ddot{e}(t) \\ \ddot{\ddot{e}}(t) \end{bmatrix} = \underline{A}q(t) + \underline{B}\dot{u}(t) \quad (10)$$

여기서

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}, \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

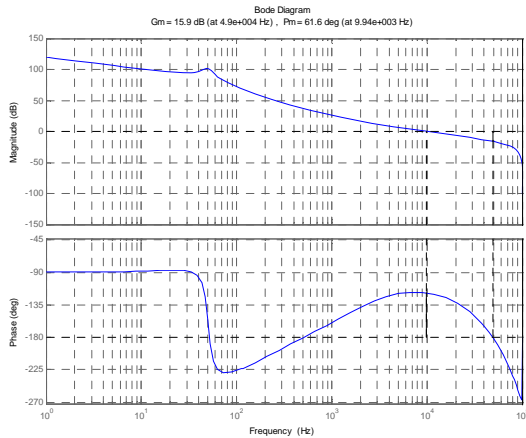


Fig.5. Open loop transfer function of the air gap controller using PID type

Table 3 Dynamic characteristic of the open loop transfer function using PID controller

Parameter	Value
Cut-off frequency	9.94 kHz
Open-loop gain	Over 95 dB [5Hz]
Gain margin	15.9 dB
Phase margin	61.6 deg

여기서

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}, \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

성능 지표(performance index)를 다음과 같이 정의하면

$$J_p = \int_0^{\infty} (q^T(t)Qq(t) + \dot{u}^T(t)Ru(t)) dt \quad (11)$$

Q 와 R 는 대칭 행렬들로서 가중치(weighting functions)이다. 성능 지표를 최소화하는 PID 제어기의 변수를 구하면 최적화된 제어 입력을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{u}^*(t) &= -R^{-1}B^T Sq(t) \\ &= -Kq(t) \\ &= -[K_1 \quad K_2 \quad K_3]q(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, K 는 제어 게인이며, S 는 algebraic Riccati 방정식을 만족하는 양의 대칭 행렬이다. Algebraic Riccati 방정식은 다음과 같으며

$$\underline{A}^T S + \underline{S} \underline{A} - \underline{S} \underline{B} R^{-1} \underline{B}^T \underline{S} + \underline{Q} = 0 \quad (13)$$

방정식(13)과 (12)를 통합하면 제어기의 입력 값을

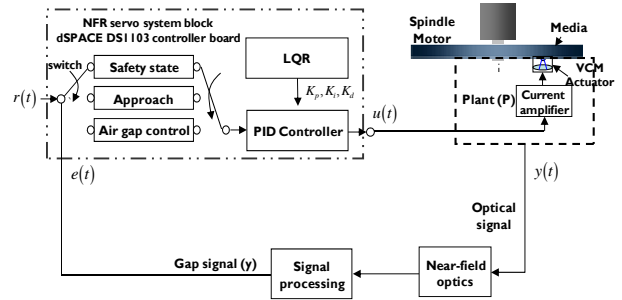


Fig.6. Proposed NFR servo system using optimal PID controller

구하면

$$u(t) = -K_1 \int e(t) dt - K_2 e(t) - K_3 \dot{e}(t) \quad (14)$$

제어기의 파라미터는 다음과 같다.

$$[k_i \quad k_p \quad k_d] = -[K_1 \quad K_2 \quad K_3] \quad (15)$$

LQR 방식으로 구한 제어 변수는 $k_p = 119.5$, $k_i = 14.5$, $k_d = 0.005$ 이다.

5. NFR 서보 시스템 실험 결과

5.1 Lead-Lag 제어기 실험 결과

앞서 설명한 lead-lag 제어기와 PID 제어기의 성능을 실험을 통해 비교하기 위해서 우선 lead-lag 제어기를 사용하여 디스크의 회전 속도가 300 rpm, 600 rpm 에서 간극 에러 신호를 측정하였으며, 초기 위치에서 목표 지점까지 플랜트가 진행되는 과정에서 발생하는 오버슈트를 측정하였다. 오버슈트의 계산은 다음과 같이 하였다.

$$Overshoot = \frac{y_{fin} - y_{min}}{y_{fin}} \quad (16)$$

여기서, y_{fin} 는 플랜트가 초기 위치에서 목표 지점까지 이동 시 미리 정한 60 nm 에서 개루프인 어프로치 모드에서 페루프 모드로 전환될 때의 플랜트의 간극이며, y_{min} 는 모드가 전환될 때 발생하는 오버슈트로 인해 플랜트가 최소가 되는 간극을 말한다. NFR 시스템에서 lead-lag 제어기를 사용하여 간극 제어한 결과는 그림 7, 8 과 표 4 로 정리하였다. 그림 7, 8 의 (a)와 (b)는 각각 디스크가 300 rpm 과 600 rpm 으로 회전하고 초기 위치에서 목표 지점 30 nm 까지 접근하는 과정에서 발생하는 오버슈트와 30 nm 에서 간극을 유지하고 있을 때 나타나는 잔류오차 신호를 표현하였다. 표 4 에 디

스크의 회전 속도를 변화시키면서 오버슈트와 잔류오차를 정리하였으며, 오버슈트와 잔류오차는 회전 속도가 증가함에 따라 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 디스크가 300 rpm 으로 회전하고 있을 때 잔류오차와 오버슈트는 3.39 nm 와 39.90 % 이고 600 rpm 회전 시에는 이보다 증가한 7.15 nm 와 70.43 % 이다.

5.2 최적화된 PID 제어기 실험 결과

최적화된 PID 제어기 역시 lead-lag 제어기와 같은 조건에서 실험을 진행하였다. 측정 결과는 그림 9, 10 과 표 5 에 정리하였다. 표 5 에서 볼 수 있듯이 디스크의 회전 속도가 증가할수록 오버슈트와 잔류오차가 증가하였지만, lead-lag 제어기보다는 PID 제어기가 제어성능 측면에서 우수하다는 것을 알 수 있다. PID 제어기와 lead-lag 제어기의 성능은 제어기의 개루프 전달함수를 비교하여 평가 될 수 있다. 그림 4, 5 와 표 2, 3 에서 알 수 있듯이 0 Hz 에서 1kHz 까지 PID 제어기의 루프 게인 값이 10~15 dB 높으며, 대역폭을 비롯한 이득 여유와 위상여유 모든 면에서 PID 제어기가 높기 때문에 성능 면에서 lead-lag 제어기보다 디스크의 회전 속도와 관계 없이 우수하다. PID 제어기를 사용하여 간극제어 시 잔류오차와 오버슈트는 디스크가 300 rpm 으로 회전할 때 2.83 nm 와 24.78 % 이고 600 rpm 회전 시 4.42 nm 와 40.78 % 이다.

6. 결론

본 연구에서는 SIL 을 기반으로 한 NFR 시스템에서 간극제어 시 과도응답 특성과 정상상태 응답 특성을 향상시켜 대상 플랜트가 초기 위치에서 목표 지점까지 접근하는 과정에서 생기는 오버슈트와 목표 지점에서 간극을 일정하게 유지할 때 나타나는 잔류오차를 PID 제어기를 사용하여 감소시켰다. PID 제어기 사용시 문제가 되는 제어 파라미터를 구하는 방법으로 LQR 방식을 사용하여 시간적인 소모를 줄일 수 있었다. PID 제어기의 성능을 평가하기 위해서 lead-lag 제어기와 PID 제어기를 NFR 서보 시스템에 적용하여 실험을 진행하여 Lead-lag 제어기를 사용하였을 때 보다 PID 제어기를 사용함으로써 디스크가 300 rpm 으로 회전 시 오버슈트와 잔류오차를 각각 37.89 %, 16.52 % 감소시켰으며, 600 rpm 으로 회전 시에는 각각 42.09 %, 38.18 % 줄일 수 있었다. 이와 같이 제안한 최적화된 PID 제어기를 적용하여 NFR 서보 시스템의 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

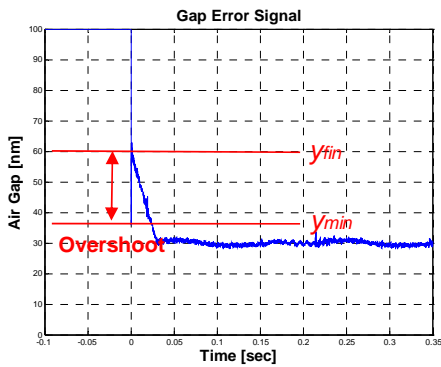
[1] 김수경, “차세대 광저장 장치 기술”, 전자공학 회지, 제 30 권, 제 12 호, 2003. 12.
 [2] J. G. Kim, M, S. Kang, T. W. Kwon, J. Jeong, N.C. Park, H. S. Yang, and Y. P. Park, 2007, “Improved Gap Control for SIL Based Near Field Recording System”, Technical Digest of ISPS07, 2007.
 [3] Ju-Il LEE, Michael VAN DER AA, Coen VERSCHUREN, Ferry ZIJP and Martin VAN DER MARK, ‘Development of an Air Gap Servo System for High Data Transfer Rate Near Field Optical Recording’, Jpn. J. Appl. Phys. A, vol. 44 no.5B, pp. 3423–3426, 2005.
 [4] Masataka SHINODA, Kimihiro SAITO, Tsutomu ISHIMOTO, Tatsumi ITO, Ariyoshi NAKAOKI, Masanobu YAMAMOTO, Osamu MAEDA, Toshihiro HASHIZU, Takeharu ASANO, Keigo AGA, Katsuji TAKAGI, and Minoru TAZOE, “High Density Near-Field Optical Disc System” Jpn. J. Appl. Phys. A, vol. 45 no.2B, pp. 1321–1324, 2006.
 [5] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki, and M. Yamamoto, ‘Gap servo system for a biaxial device using an optical gap signal in a near field readout system’, Jpn. J. Appl. Phys. A, vol. 42, no.5, pp. 2719–2724, 2003.
 [6] T. Ishimoto, S. M. Kim, T. Yamaskik, T. Yukumoto, A. Nakaoki, M. Yamamoto, “Approach of Improving Disk Performance to High-Quality Gap Control in Near-Field Optical Disk Drive System”, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 3981-3986 ,2007.
 [7] Kiam Heong Ang, Gregory Chong, ‘PID Control System Analysis, Design, and Technology’, IEEE, Vol. 13, no 13 pp. 559-576, 2005.
 [8] Seung-Min and Tae-Yong Kuc, ‘An Adaptive PID Learning control of DC Motors’, IEEE, 1997.
 [9] M. Shamsuzzohal and Moonyong Lee, “Design of Robust PID Controllers for Unstable Processes”, SICE-ICASE International Joint Conference, 2006.

Table 4 Overall Experimental results of air gap control using lead-lag controller for SIL based NFR system

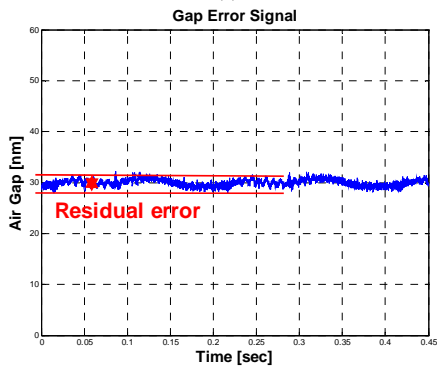
Rotation rpm (rpm)	300	600
Residual error(nm)	3.39	7.15
Minimum Gap(nm)	36.06	17.74
Overshoot (%)	39.90	70.43

Table 5 Overall Experimental results of air gap control using PID controller for SIL based NFR system

Rotation rpm (rpm)	300	600
Residual error(nm)	2.83	4.42
Minimum Gap(nm)	45.13	35.68
Overshoot (%)	24.78	40.78

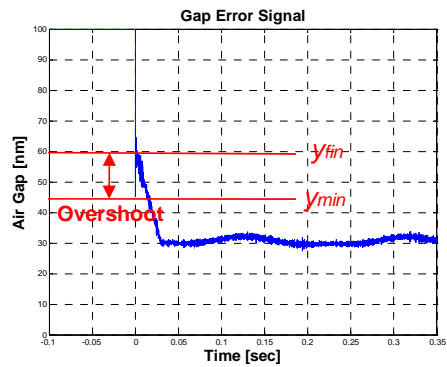


(a)

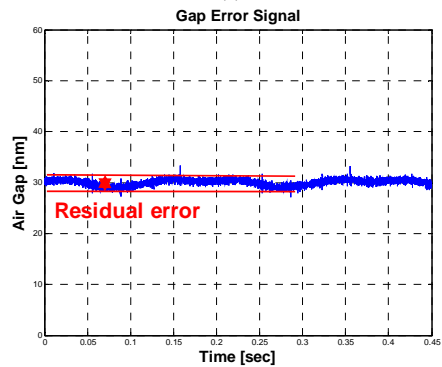


(b)

Fig.7. Experimental results of air gap control using lead-lag controller for SIL based NFR system (a) Overshoot at 300 rpm (b) Residual error at 300 rpm

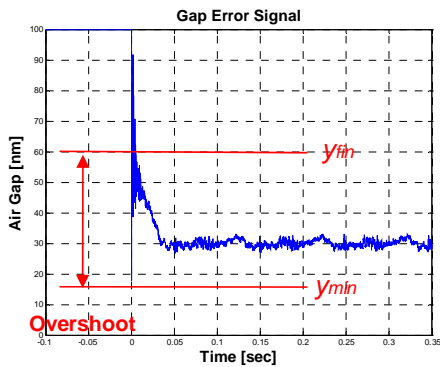


(a)

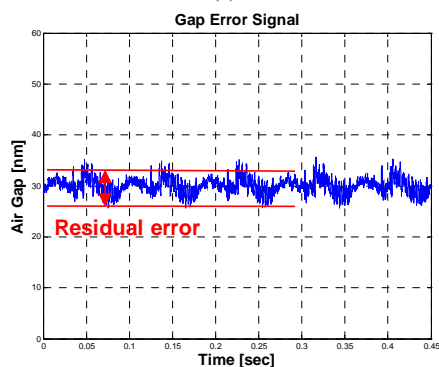


(b)

Fig.9. Experimental results of air gap control using PID controller for SIL based NFR system (a) Overshoot at 300 rpm (b) Residual error at 300 rpm

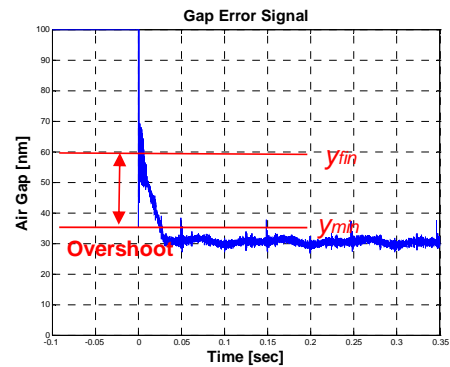


(a)

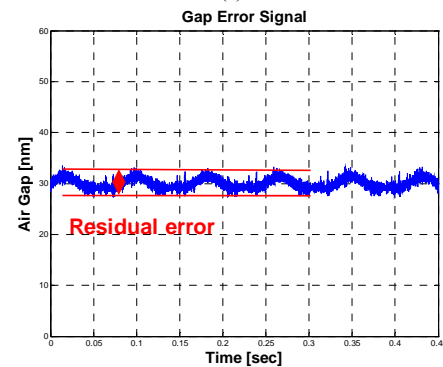


(b)

Fig.8. Experimental results of air gap control using lead-lag controller for SIL based NFR system (a) Overshoot at 600 rpm (b) Residual error at 600 rpm



(a)



(b)

Fig.10. Experimental results of air gap control using PID controller for SIL based NFR system (a) Overshoot at 600 rpm (b) Residual error at 600 rpm