

시변 주기외란 신호에 대한 강인 적응형 하이브리드 제어시스템

조현철*, 김관형**

*울산과학기술대학교 전기전자학부

**동명대학교 컴퓨터공학과

Robust Adaptive Hybrid Control System against Time-varying Periodic Disturbance Signal

*Hyun Cheol Cho, **Gwan Hyung Kim

*School of Electrical & Electronic Eng., Ulsan College

**Dept. of Computer Eng., Tongmyung Univ.

E-mail : kimgh69@nate.com

요 약

Adaptive feedforward control(AFC) is largely aimed for improving control performance of dynamic systems particularly involving periodic disturbance signals in engineering fields. This paper presents a novel hybrid AFC approach for specific systems with multiple disturbances in control input and state variables. The proposed AFC mechanism is hierarchically composed of the conventional AFC and a PID typed auxiliary control law in parallel. The former is generic to decrease periodic disturbance in control actuators and the latter is additionally constructed to overcome control deterioration due to time-varying uncertainty of given systems. We carry out numerical simulation to test reliability of the hybrid AFC system and compare its control performance with a well-known conventional AFC method in terms of time and frequency domains for proving of its superiority.

키워드

AFC, 시변 주기 외란, 하이브리드 제어, 보조제어

I. 서 론

적응형 피드포워드 제어(AFC)는 주기적 외란에 대하여 강인한 시스템 응답을 개선시키는 제어시스템의 일종으로서, 컴퓨터의 하드디스크와 같은 데이터 저장 장치나 회전 절삭기 등과 같은 산업기기의 고급 제어기술에 널리 적용되고 있다 [1,2]. 본 논문은 제어입력 외란 및 시스템 상태 외란에 대한 강인 적응형의 하이브리드 AFC 알고리즘을 제안한다. 구성된 제어시스템은 기존의 AFC 시스템에 PID 형태의 보조제어규칙을 조합한 메커니즘을 갖는다. 이러한 보조제어시스템은 시스템 상태외란으로 인한 시변 불확실성 시스템에 대한 강인한 제어시스템 구현을 목적으로 한

다. 하이브리드 AFC 파라미터는 최급 강하 기반 최적화 기법을 적용하여 수정규칙을 산출한다. 본 논문에서 제안한 제어알고리즘의 타당성 검증을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며 기존 AFC 시스템에 대한 개선정도를 시간 및 주파수 영역에서 각각 비교 분석하였다.

II. 고조파 외란 시스템

외란 플랜트에 대한 이산시간 k 에 대한 선형 이산시스템의 상태 및 출력 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + B\delta(k) + Fw(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\quad (1)$$

본 논문에서 고려하는 외란은 플랜트의 상태에

적용되는 외란신호와 제어입력변수에 적용되는 주기적 외란신호가 있다. 상태외란의 경우 실시간 시스템 구현에서 관측되는 일반적인 노이즈 신호로 간주되며, 제어외란은 일반 AFC 시스템에서 다루는 주기적 외란신호로서 다음과 같이 표현된다.

$$d(k) = \sum_{i=1}^n \{a_i(k)\cos(\omega_i k) + b_i(k)\sin(\omega_i k)\} \quad (2)$$

여기서 $a_i(k)$ 와 $b_i(k)$ 는 외란신호의 시변 파라미터를 나타내며 $\omega_i \in [\omega_1, \omega_n]$ 는 각 고조파 성분의 주파수 대역폭을 나타낸다.

3. 하이브리드 AFC 시스템

기존의 AFC 시스템은 제어입력 측의 외란 $d(k)$ 를 상쇄하는 제어입력신호 $u(k)$ 를 생성하여 출력 $y(k)$ 가 0으로 수렴하도록 한다. 이러한 제어 목적을 달성하기 위한 가장 간단한 제어전략은 식 (1)의 시스템 동특성이 안정하다는 가정 하에, 외란신호 $d(k)$ 와 동일한 주파수 대역폭과 진폭을 갖는 제어입력신호 $u(k)$ 를 산출하여야 한다. 본 논문은 이러한 외란특성에도 강인 적용한 제어특성을 위하여 기존의 AFC와 외란의 시변 불확실성에 대응하기 위한 보조제어기가 추가로 정의되는 하이브리드 방식의 AFC 시스템을 제안하며 제어입력신호는 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = \sum_{i=1}^m \{ \alpha_i(k)\cos(\omega_i k) + \beta_i(k)\sin(\omega_i k) + \gamma_i(k) \} \quad (3)$$

여기서 파라미터 $\alpha_i(k)$ 와 $\beta_i(k)$ 그리고 코사인과 사인함수의 항은 기존 AFC 시스템에 대한 수학적 표현을 나타내며, $\gamma_i(k)$ 는 보조 제어입력신호를 나타낸다. 식 (3)에서 $\alpha_i(k)$ 와 $\beta_i(k)$ 는 최적화 기법을 통해 파라미터의 추정식을 유도하기 위해 최급 강하기법[3]을 이용하며 최종적으로 각각의 파라미터 수정규칙은 다음과 같다.

$$\alpha_i(k+1) = \alpha_i(k) - \eta y(k) (CI_N B) \cos(\omega_i k), \quad i=1, \dots, m \quad (4-1)$$

$$\beta_i(k+1) = \beta_i(k) - \eta y(k) (CI_N B) \sin(\omega_i k), \quad i=1, \dots, m \quad (4-2)$$

식 (3)에서 보조제어 시스템 $\gamma_i(k)$ 는 이산 선형 PID 제어형태로 구성하였으며 다음과 같이 표현된다[4].

$$\gamma_i(k) = \gamma_i(k-1) + \sum_{j=1}^3 \sigma_{i,j} y(k-j+1) \quad (5)$$

여기서 $\sigma_{i,j}$ 는 보조 제어시스템의 파라미터로 주어지며, 마찬가지로 최급강하 최적화 기법을 통해 수정규칙을 산출하여야 한다. 앞서 도출한 유사한 과정을 통해 최급 강하 기반 최적화 기법에 의한 $\sigma_{i,j}$ 의 수정규칙은 다음과 같다.

$$\sigma_{i,j}(k+1) = \sigma_{i,j}(k) - \eta y(k) y(k-j), \quad j=1, 2, 3 \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)의 파라미터 수정규칙을 바탕으로 본 논문에서 제안하는 하이브리드 AFC 시스템의 구성도는 그림 1과 같다.

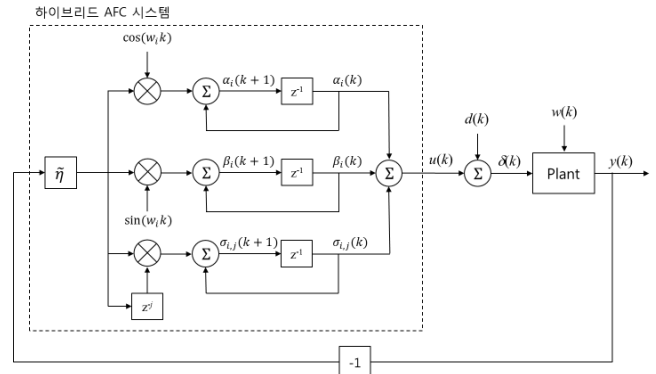


그림 1 제안한 하이브리드 AFC 시스템의 블록선도

4. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 모의실험에 적용한 플랜트의 상태 및 출력 방정식은 다음과 같다[4].

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.16 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \end{bmatrix} w(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $w(k) \sim N(0,1)$ 이며 외란 신호 $d(k)$ 를 구성하기 위하여 $n=5$ 로 하였으며, 주파수 대역폭 $\omega_i = 2\pi(i-1)$, $i=1, \dots, 5$ 로 결정하였고 외란 파라미터는 각각 $a_i(k) \sim N(0.1, 0.05)$ 와 $b_i(k) \sim N(1, 0.05)$ 로 정의하였다. 이러한 시스템 환경에 대하여 본 논문에서 제안한 하이브리드 AFC 시스템을 적용하여 시스템 응답을 검출하여 분석하였다. AFC 파라미터인 α , β , σ 에 대한 초기값은 0과 1사이의 항등분포를 갖는 랜덤값으로 하였다. 구성된 하이브리드 AFC의 반복 시뮬레이션을 통해 식 (3)에서 $m=9$ 일 때 최적의 제어성능을 갖는 것을 알 수 있었다. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 하이브리드 AFC에 대한 시스템 응답을 보여주며 또한 기존의 AFC 기법을 함께 시뮬레이션을 실시하여 그 결과파형을 비교 분석 하였다. 이 결과파형으로부터 하이브리드 AFC의 경우 약 1초까지 과도응답 특성을 보이고 있으며 정상상태응답에서 최대 진폭이 약 0.25임을 관측할 수 있다. 하지만 기존 AFC의 경우 최대 진폭이 약 0.8 정도로 관측되었으며 하이브리드 AFC의 경우 상대적으로 제어오차가 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 한편 두 제어방식에 대하여 전체 제어시간 동안 기준값 0에 대한 오차값을 $e_{sum} = \sqrt{e^T e}$ 와 같이 연산하였으며 기존 AFC의 경우 $e_{sum} = 13.9$, 하이브리드 AFC의 경우 $e_{sum} = 3.7$ 으로 관측되었다. 따라서 하이브리드 AFC가 기존 AFC 방식에 대하여 약 73.4%의 개선정도를 보이고 있다. 그림 3은 주파수 영역에서 두 제어시스템의 결과파형을 각각 보여주고 있다. 기존 AFC의 경우 저주파 대역에서 약 18dB 부근의 진폭을 가지지만

하이브리드 AFC의 경우 그 진폭의 크기가 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 하지만 고주파 대역폭에서는 진폭이 거의 동일한 것으로 분석되며 이는 저주파 외란에 대하여 하이브리드 AFC의 제어능력이 월등히 우수함을 알 수 있다.

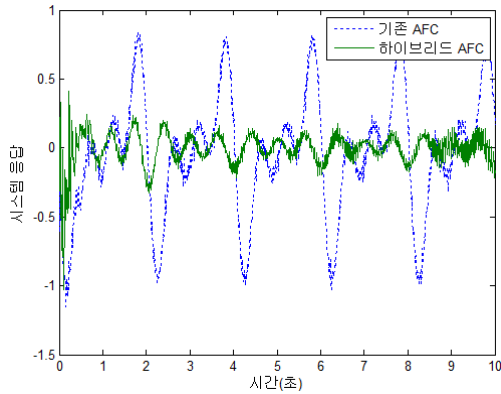


그림 2 시스템 응답 파형

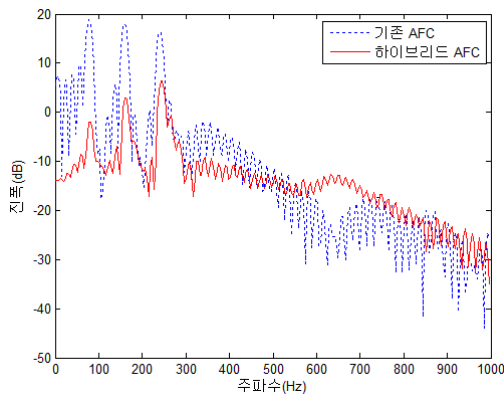


그림 3 시스템 응답의 주파수 스펙트럼

5. 결 론

본 논문은 일반적인 시스템 상태 외란과 제어 액추에이터에 인가되는 제어외란에 대한 강인한 하이브리드 AFC 시스템을 제안하였다. 제안한 AFC 시스템은 기존의 AFC 규칙과 PID 제어규칙으로 조합하여 구성하였으며 각각의 제어기 파라미터는 기존의 최급 강하 기반 최적화 알고리즘을 적용하여 수정규칙을 산출하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 AFC 시스템은 기존의 AFC에 대하여 70% 이상 제어능력이 개선되었음을 알 수 있었으며 주파수 응답에서도 10dB 이상 진폭이 감소되었다. 향후연구로는 실시간 테스트 베드를 구축하여 제안한 AFC 시스템의 실적용 가능성 및 타당성을 검증하고자 한다.

참고문헌

- [1] X. Guo, M. Bodson, "Adaptive cancellation of a sinusoidal disturbance with rapidly varying frequency using an augmented error algorithm," *Proc. of the IEEE Conf on Decision & Control*, Seville, Spain, pp. 4803-4808, Dec., 2005.
- [2] H. Zhang, X. Huang, G. Peng, "A novel adaptive feedforward compensation algorithm for hard disk drive," *Proc. of the Int. Conf. on Mechanics & Automation*, Luoyang, China, June, pp. 1275-1279, 2006.
- [3] J. M. Mendel, *Lessons in estimation theory for signal processing, communications, and control*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1995.
- [4] K. Ogata, *Discrete-time control systems*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1995.