

궤환선형화 가능한 비선형 시스템의 입력제약을 고려한 동적 와인드업 방지

A Dynamic Anti-windup Scheme for Input-constrained Feedback Linearizable Nonlinear Systems

윤성식 *, 박종구 **, °윤태웅 *

*고려대학교 전기·전자·전파공학부(Tel: 82-02-3290-3240; Fax: 82-02-928-8909; E-mail: twy@cello.korea.ac.kr)

**성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부(Tel: 82-031-290-7138; Fax: 82-031-290-7131; E-mail: pjkg@yurim.skku.ac.kr)

Abstract: This paper proposes a dynamic compensation scheme for input-constrained feedback linearizable nonlinear systems to cope with the windup phenomenon. Given a feedback linearizing controller for such a nonlinear system designed without considering its input constraint, an additional dynamic compensator is proposed to account for the constraint. This dynamic anti-windup is based on the minimization of a reasonable performance index, and some stability properties of the resulting closed-loop are presented.

Keywords: constraint, windup, compensator, nonlinear, feedback linearization

1. 서론

산업 현장의 제어 공학 분야에서 많이 관찰되는 비선형성 중의 하나는 제어 입력의 포화(saturation) 현상이다. 예를 들어, 화학 공정 제어 시스템의 경우 파이프에 흐르는 유체의 양을 밸브를 사용하여 조절하게 되는데, 밸브가 완전히 열릴 수 있는 상한과 완전히 닫히는 하한이 존재하게 된다. 이러한 구동기(actuator)의 포화는 대상 시스템의 성능을 나빠지게 할 뿐만 아니라, 그러한 현상이 일어났을 때에는 되먹임 루우프(feedback loop)가 끊어지는 상태가 되어 플랜트나 제어기가 불안정한 경우 전체 시스템의 안정도를 해치게 된다. 일반적으로 제어 시스템 설계시, 정상 상태 오차를 없애거나 줄이기 위하여, 제어기가 적분기를 갖도록 설계한다. 이 경우 기준입력이나 외부 교란의 갑작스런 변화는, 제어기의 적분 작용에 의하여 상당히 큰 신호를 발생 시키며, 이 현상으로 인하여 플랜트 출력에 좋지 않은 영향, 즉 큰 오버슈트(overshoot)와 오랜 정상 상태 도달 시간(settling time) 등을 일으킨다. 제어 시스템 설계 분야에서, 이러한 현상을 와인드업(windup)이라 하고, 이를 방지하는 구조를 와인드업 방지(anti-windup) 구조라 한다.

제어 입력 신호의 포화 현상을 다루는 데에는 크게 두가지 접근 방법이 있다. 하나는, 제어기 설계 과정에서부터 제어 한계(control bounds)를 고려하여 결코 제어기의 출력이 제한된 값을 넘지 못하도록 하는 방법이며[1]-[5], 다른 방법으로는 제어기 설계의 첫 단계에서는 포화현상을 고려하지 않고 설계한 다음, 포화현상으로 인한 부정적인 영향을 보상하기 위하여 적절한 보상 구조를 채택하는 방법이 있다[6]-[9]. 후자의 방법은 포화 시스템에 있어서 '2단계 설계 기법(two-step design technique)'라고 하는데, 실제적으로는 후자의 방법이 광범위하게 사용되고 있다. 이 기법들 중 [8]과 [9]에서는 선형 시스템에 대해 합리적인 성능지수를 최소화하는 동적(dynamic) 보상 구조를 갖는 와인드업 방지 구조를 제안하였다. 한편 비선형 시스템을 위한 제어기를 설계하는 경우 궤환 선형화 기법이 주로 사용된다 [11], [12]. 이 궤환 선형화 가능한 비선형 시스템에 대해, 최근에는 [10]에서는 와인드업 방지를 위한 정적(static) 보상 구조를 제안하였으나, 여기서는 제어기의 파라미터들과 와인

드업 방지 보상항의 게인(gain)을 독립적으로 설계하지 못하고 함께 설계해야하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 [8]과 [9]에서의 선형 시스템을 위한 2단계 와인드업 방지 보상 기법을 궤환 선형화 가능한 비선형 시스템에서의 경우로 확장한다. 이 보상기 설계는 포화현상이 없을 때의 제어기 상태변수와 포화현상이 있을 때 제어기 상태변수의 오차의 2-노름(norm)을 성능지수로 하여 이를 최소화하는 방식으로 하고, 설계된 보상기는 플랜트와 제어기의 파라미터 함으로 표현되며 유일하게 결정된다. 전체 시스템의 안정도는 DOA(domain of attraction)와 BIBS(bounded-input bounded-state) 성질 관점에서 증명한다.

2. 동적 와인드업 방지 보상기 설계

1. 문제 설정

플랜트는 다음과 같은 MIMO(multi-input multi-output) 비선형 시스템을 고려하자:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x) + G(x)u \\ y(t) &= h(x) \\ u &= \sigma(v) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x \in \mathbb{R}^n$ 은 상태변수 벡터, $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$, $u_i = \sigma_i(v_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\sigma_i(\cdot)$ 는 포화함수, v_i 는 포화함수 이전의 입력, $f(x)$ 는 평활한(smooth)한 벡터장(vector field), $G(x)$ 는 평활한 $n \times m$ 비선형 행렬, $y = [h_1(x) \ \dots \ h_m(x)]^T$, $h_i(x)$ 는 평활한 스칼라 함수이다.

어떤 정수 $r (= r_1 + r_2 + \dots + r_m \leq n)$ 과 다음과 같은 좌표