

다단제어용 안티 와인드업 기술 개발

배정은 · 김경훈 · 추승철 · 허재필 · 임상훈 · 성수환[†]

경북대학교 응용화학공학부
41566 대구광역시 북구 대학로 80
(2020년 4월 9일 접수, 2020년 5월 4일 수정본 접수, 2020년 5월 13일 채택)

Development of Anti-windup Techniques for Cascade Control System

Jeong Eun Bae, Kyeong Hoon Kim, Syng Chul Chu, Jaepil Heo, Sanghun Lim and Su Whan Sung[†]

School of Applied Chemical Engineering, Kyungpook National University,
80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, Korea
(Received 9 April 2020; Received in revised form 4 May 2020; accepted 13 May 2020)

요 약

본 연구에서는 다단제어(Cascade Control)를 위한 안티 와인드업(Anti-windup) 기술을 개발하였다. 다단제어는 외란을 보다 효과적으로 제어하기 위해 내부에 피드백(Feedback) 제어루프를 추가한 제어구조이다. 단일루프제어(Single-loop Control)와는 다르게 두 개의 제어루프로 이루어져 내부의 종속제어루프(Secondary Control)가 외부의 주제어루프(Primary Control)에 영향을 미치는 특징을 가지고 있다. 산업현장에서 다단제어에 적용하는 기존의 안티 와인드업 기술은 주로 주제어기(Primary Controller)와 종속제어기(Secondary Controller)에 각각 로컬 역연산법(Back Calculation)을 적용하는 것이다. 하지만 이 방법은 종속제어기의 제어출력이 포화되었을 때 발생하는 주제어기의 적분누적(Integral-windup) 현상을 효과적으로 제거하지 못한다. 이를 해결하기 위해 기존 로컬 안티 와인드업 기술을 확대 적용한 두 가지의 다단제어용 안티 와인드업 기술을 제안한다. 첫 번째는 다단 조건부 적분법(Cascade Conditional Integration)이고 두 번째는 다단 역연산법(Cascade Back Calculation)으로 단일루프제어에 적용되어 왔던 로컬 조건부 적분법과 역연산법을 다단제어로 확대 적용하여 다단제어 시스템에서 PID제어기의 적분누적 현상을 방지하고자하였다. 개발한 다단 조건부 적분법과 다단 역연산법은 간단하고 직관적이면서도 종속제어기의 제어출력의 포화로 인해 발생한 적분누적 현상을 효과적으로 방지할 수 있고 공정이나 제어기 형태에 상관없이 우수한 제어성능을 유지할 수 있었다. 향후 실제 공정 적용을 통해 신뢰성을 확보한다면 산업현장의 다단제어기 성능을 개선하는데 크게 기여를 할 수 있을 것이다.

Abstract – In this research, the anti-windup techniques for the cascade control system are newly developed. Cascade control system has an additional internal feedback control loop to reject disturbances better than the conventional control system. Remarkable difference between the conventional single-loop control system and the cascade control system is the interaction that the controller output saturation of the secondary control loop strongly affects the integral action of the primary control loop. In industry, local back calculation anti-windup method has been mainly used for each controller without considering the interaction between the two controllers. But it cannot eliminate the integral-windup of the primary controller originated from the saturation of the secondary controller output. To solve the problem, the two anti-windup techniques of the cascade conditional integration and the cascade back calculation are proposed in this research by extending the local anti-windup techniques for the single-loop control system to the cascade control system. Simulation confirmed that the proposed methods can effectively remove the integral windup of the primary controller caused by the saturation of the secondary controller output and show good control performances for various types of processes and controllers. If the reliability of the proposed methods is proved through the applications to real processes in the future, they would highly contribute to improving the control performances of the cascade control system in industry.

Key words: PID, Anti-windup, Cascade Control System, Conditional Integration, Back Calculation

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: suwhansung@knu.ac.kr

‡이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

PID제어기는 간단하고 직관적인 구조, 불확실성에 대한 강건성, 우수한 제어성능으로 인해 산업현장에서 가장 광범위하게 사용되는 제어기이다. 지금까지 PID제어기의 제어성능을 높이기 위해 여러 노력들이 있었다. 첫 번째로, PID제어기의 튜닝파라미터를 공정의 동특성에 맞게 체계적으로 결정해주기 위한 PID자동튜닝(PID Autotuning) 분야에 많은 연구결과들이 제시되었고 실제 산업현장에 효과적으로 활용되고 있다[1-6]. 또한, 여러 개의 PID제어기들과 공정모델을 체계적으로 조합하여 보다 우수한 제어성능을 도출하는 모델기반 PID제어기(Model-based PID Controllers), 다중입출력 PID 제어기(MIMO PID Controllers), 앞먹임-되먹임 조합 PID제어기(Combined Feedforward and Feedback PID Controller), 다단제어(Cascade Control)등의 고급 제어기(Enhanced Controllers)들이 개발되었고 다양한 분야에 적용되고 있다[1,2,7,8]. 이 두 분야에 대한 중요성이 현재까지 많이 강조되었고 이와 관련된 훌륭한 새로운 기법들이 개발되었다. 하지만, 상대적으로 그 중요성을 인정받지 못했던 분야가 안티 와인드업(Anti-windup) 분야이다. 이것은 실제 산업현장에서 빈번하게 일어나는 액츄에이터의 포화(Saturation)로 인한 PID제어기의 적분누적(Integral-windup) 현상을 막아 PID제어기의 성능이 저하되는 것을 방지하는 기술이다. 단일루프제어시스템(Single-loop Control)에서는 대체로 현장 적용성이 뛰어난 안티 와인드업 기술들이 잘 개발되어 개선의 여지가 많지 않다[9]. 하지만 다단제어 구조에서는 아직 산업계에 쉽게 적용할 정도로 간단하면서도 효과적인 안티 와인드업 기술이 개발되어 있지 않다. 몇몇 연구자들이 체계적이고 일반적인 안티 와인드업 보상기(Anti-windup Compensator; AWC) 설계 기술을 제시하였으나 이 방법들을 현장에 적용하기 위해서는 공정모델이 요구되며, 큰 시간지연을 체계적으로 반영하기 힘들다[10-12]. 무엇보다 산업현장에 적용되기에는 너무 복잡하고 제어기 설계상 너무 큰 계산 부하(Computation Load)를 요구한다. 그래서 이 방법들은 산업현장에서 효용성이 높은 간단하고 직관적인 PID제어기를 다단제어에 사용하는 의미를 되새기킨다.

본 연구에서는 다단제어 구조에서 종속제어기(Secondary Controller)의 제어출력이 포화되었을 때, 주제어기(Primary Controller)의 적분누적 현상을 방지하여 제어성능 저하를 막을 수 있는 새로운 다단 안티 와인드업 기술을 개발하였다. 모사를 통하여 개발한 기술이 간단하면서도 효과적으로 주제어기의 적분누적 현상을 제거할 수 있음을 성공적으로 검증하였다.

2. 다단제어용 안티 와인드업 기술 개발

먼저 단일루프제어와 다단제어의 차이점은 Fig. 1과 같다. 여기서 주목해야 하는 점은 종속제어기의 제어출력이 포화상태일 때 공정출력이 느려지게 되고 이로 인해 주제어기의 적분파트가 지나치게 비대해질 수 있다는 것이다. 즉, 자기 자신의 포화현상이 아닌 다른 제어기 출력의 포화에 의해 적분누적 현상이 발생할 수 있다. 이를 극복하기 위해 다단제어용 안티 와인드업 기술을 추가로 적용할 필요가 있다.

단일루프제어에서 적분누적 현상을 막기 위해 적용되는 기법은 로컬 조건부 적분법(Conditional Integration)과 로컬 역연산법(Back Calculation)이 있다. 조건부 적분법은 제어출력이 포화상태일 때 제어기 적분파트의 적분동작을 정지시켜서 적분누적 현상을 방지하는 기법이다. 역연산법은 제어출력이 포화된 정도에 비례하여 적분동작을 감소시키는 방식으로 적분누적 현상을 억제하는 기법이다.

본 연구에서는 기존 단일루프 로컬 안티 와인드업 기술을 확대 적용하여 두 가지의 다단제어용 안티 와인드업 기술을 제안한다. 첫 번째가 다단 조건부 적분법(Cascade Conditional Integration)이고 두 번째가 다단 역연산법(Cascade Back Calculation)으로 단일제어에 적용되어 왔던 로컬 조건부 적분법과 로컬 역연산법을 다단제어로 확대 적용하여 다단제어 시스템에서 제어기의 적분누적 현상을 방지하고자 한다. 각각에 대해 설명하면 다음과 같다.

2-1. 다단 조건부 적분법

제한한 다단 조건부 적분법을 적용한 k번째 샘플링의 PID제어 출력은 아래와 같이 계산된다.

$$u_{p1}(k) = k_{c1}(y_{s1}(k) - y_1(k)) \tag{1}$$

$$u_{d1}(k) = k_{c1} \tau_{d1} \frac{(y_{s1}(k) - y_1(k)) - (y_{s1}(k-1) - y_1(k-1))}{\Delta t} \tag{2}$$

$$u_{pid1}(k) = u_{p1}(k) + u_{i1}(k) + u_{d1}(k) \tag{3}$$

$$\text{If } u_{pid1}(k) > u_{\max1}, u_1(k) = u_{\max1} \tag{4}$$

$$\text{If } u_{pid1}(k) < u_{\min1}, u_1(k) = u_{\min1} \tag{5}$$

$$\text{If } u_{\min1} \leq u_{pid1}(k) \leq u_{\max1}, u_1(k) = u_{pid1}(k) \tag{6}$$

$$y_{s2}(k) = u_1(k) \tag{7}$$

$$u_{p2}(k) = k_{c2}(y_{s2}(k) - y_2(k)) \tag{8}$$

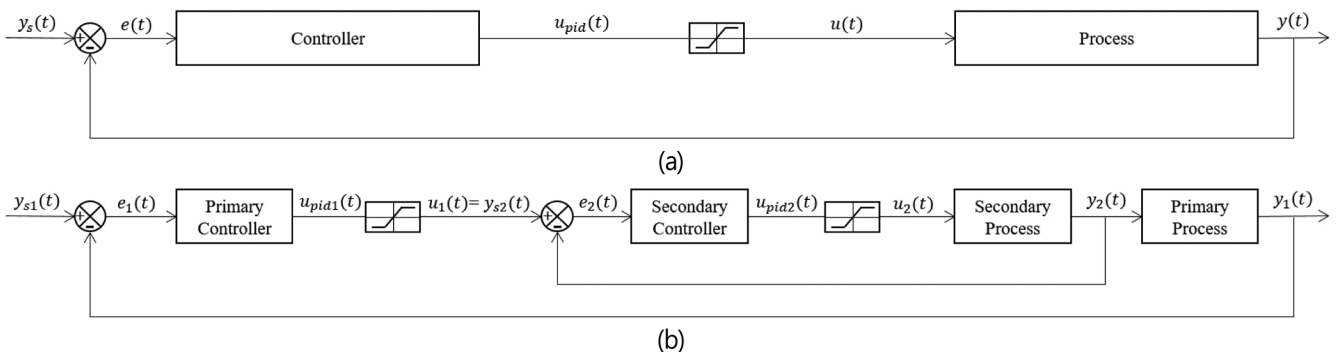


Fig. 1. Block diagram of single-loop and cascade control. (a) Single-loop control, and (b) Cascade control.

$$u_{d2}(k) = k_{c2}\tau_{d2} \frac{(y_{s2}(k) - y_2(k)) - (y_{s2}(k-1) - y_2(k-1))}{\Delta t} \quad (9)$$

$$u_{pid2}(k) = u_{p2}(k) + u_{i2}(k) + u_{d2}(k) \quad (10)$$

$$\text{If } u_{pid2}(k) > u_{\max2}, u_2(k) = u_{\max2} \text{ and } check_{u2} = 0 \quad (11)$$

$$\text{If } u_{pid2}(k) < u_{\min2}, u_2(k) = u_{\min2} \text{ and } check_{u2} = 0 \quad (12)$$

$$\text{If } u_{\min2} \leq u_{pid2}(k) \leq u_{\max2}, u_2(k) = u_{pid2}(k) \text{ and } check_{u2} = 1 \quad (13)$$

$$u_{i1}(k+1) = u_{i1}(k) + \left[\frac{k_{c1}}{\tau_{i1}} (y_{s1}(k) - y_1(k)) check_{u2} + \frac{1}{\tau_{i1}} (u_1(k) - u_{pid1}(k)) \right] \Delta t \quad (14)$$

$$u_{i2}(k+1) = u_{i2}(k) + \left[\frac{k_{c2}}{\tau_{i2}} (y_{s2}(k) - y_2(k)) + \frac{1}{\tau_{i2}} (u_2(k) - u_{pid2}(k)) \right] \Delta t \quad (15)$$

여기서, 아래첨자 1과 2는 각각 주제어기와 종속제어기를 나타낸다. k 는 k 번째 샘플링을 나타낸다. y 와 u 는 각각 공정출력과 제어출력을 나타내고 u_{pid} 는 PID제어기의 출력값이다. Δt 는 샘플링 시간이다. 아래첨자 p, i 그리고 d 는 각각 PID제어기의 비례파트, 적분파트 그리고 미분파트이고, 아래 첨자 \max 와 \min 은 각각 제어출력의 상한치와 하한치를 나타낸다. k_c, τ_i 그리고 τ_d 는 각각 PID제어기의 비례이득, 적분시간 그리고 미분시간을 의미한다. τ_t 는 추종시상수(Tracking Time Constant)로 적분동작을 얼마나 신속히 약화시킬 것인지를 결정하는 변수이고 추천범위는 $\tau_d \leq \tau_i \leq \tau_t$ 이다[1]. $check_{u2}$ 는 적분을 활성화($check_{u2} = 1$)할 것인지 비활성화($check_{u2} = 0$)할 것인지를 결정하는 변수이다.

제안한 다단 조건부 적분법의 핵심은 식 (14)와 (15)로 각각 주제어기와 종속제어기의 적분파트를 보여주고 있다. 여기서, $(1/\tau_{i1})(u_1(k) - u_{pid1}(k))\Delta t$ 와 $(1/\tau_{i2})(u_2(k) - u_{pid2}(k))\Delta t$ 는 각 단일루프에 대한 로컬 역연산법 안티 와인드업 기술에 해당한다. 즉, 주제어기와 종속제어기 자신의 제어출력이 포화되었을 때 적분을 줄여주는 역할을 한다. $(k_{c1}/\tau_{i1})(y_{s1}(k) - y_1(k))check_{u2}\Delta t$ 는 종속제어기 출력이

포화되었을 때, 주제어기의 적분동작을 중단시켜 종속제어기의 제어출력이 포화되더라도 주제어기의 적분동작이 비대해지는 현상을 방지하는 다단 조건부 적분법에 해당한다.

2-2. 다단 역연산법

다단 역연산법을 적용한 다단제어 구조는 Fig. 2와 같고, 이 때 k 번째 샘플링의 PID제어 출력 수식은 아래와 같다.

$$\text{If } u_{\max1} > u_{\max1 \cdot c}, u_{\max1 \cdot f} = u_{\max1 \cdot c} \quad (16)$$

$$\text{If } u_{\max1} < u_{\max1 \cdot c}, u_{\max1 \cdot f} = u_{\max1} \quad (17)$$

$$\text{If } u_{\min1} < u_{\min1 \cdot c}, u_{\min1 \cdot f} = u_{\min1 \cdot c} \quad (18)$$

$$\text{If } u_{\min1} > u_{\min1 \cdot c}, u_{\min1 \cdot f} = u_{\min1} \quad (19)$$

$$u_{p1}(k) = k_{c1}(y_{s1}(k) - y_1(k)) \quad (20)$$

$$u_{d1}(k) = k_{c1}\tau_{d1} \frac{(y_{s1}(k) - y_1(k)) - (y_{s1}(k-1) - y_1(k-1))}{\Delta t} \quad (21)$$

$$u_{pid1}(k) = u_{p1}(k) + u_{i1}(k) + u_{d1}(k) \quad (22)$$

$$\text{If } u_{pid1}(k) > u_{\max1 \cdot f}, u_1(k) = u_{\max1 \cdot f} \quad (23)$$

$$\text{If } u_{pid1}(k) < u_{\min1 \cdot f}, u_1(k) = u_{\min1 \cdot f} \quad (24)$$

$$\text{If } u_{\min1 \cdot f} \leq u_{pid1}(k) \leq u_{\max1 \cdot f}, u_1(k) = u_{pid1}(k) \quad (25)$$

$$y_{s2}(k) = u_1(k) \quad (26)$$

$$u_{p2}(k) = k_{c2}(y_{s2}(k) - y_2(k)) \quad (27)$$

$$u_{d2}(k) = k_{c2}\tau_{d2} \frac{(y_{s2}(k) - y_2(k)) - (y_{s2}(k-1) - y_2(k-1))}{\Delta t} \quad (28)$$

$$u_{pid2}(k) = u_{p2}(k) + u_{i2}(k) + u_{d2}(k) \quad (29)$$

$$\text{If } u_{pid2}(k) > u_{\max2}, u_2(k) = u_{\max2} \quad (30)$$

$$\text{If } u_{pid2}(k) < u_{\min2}, u_2(k) = u_{\min2} \quad (31)$$

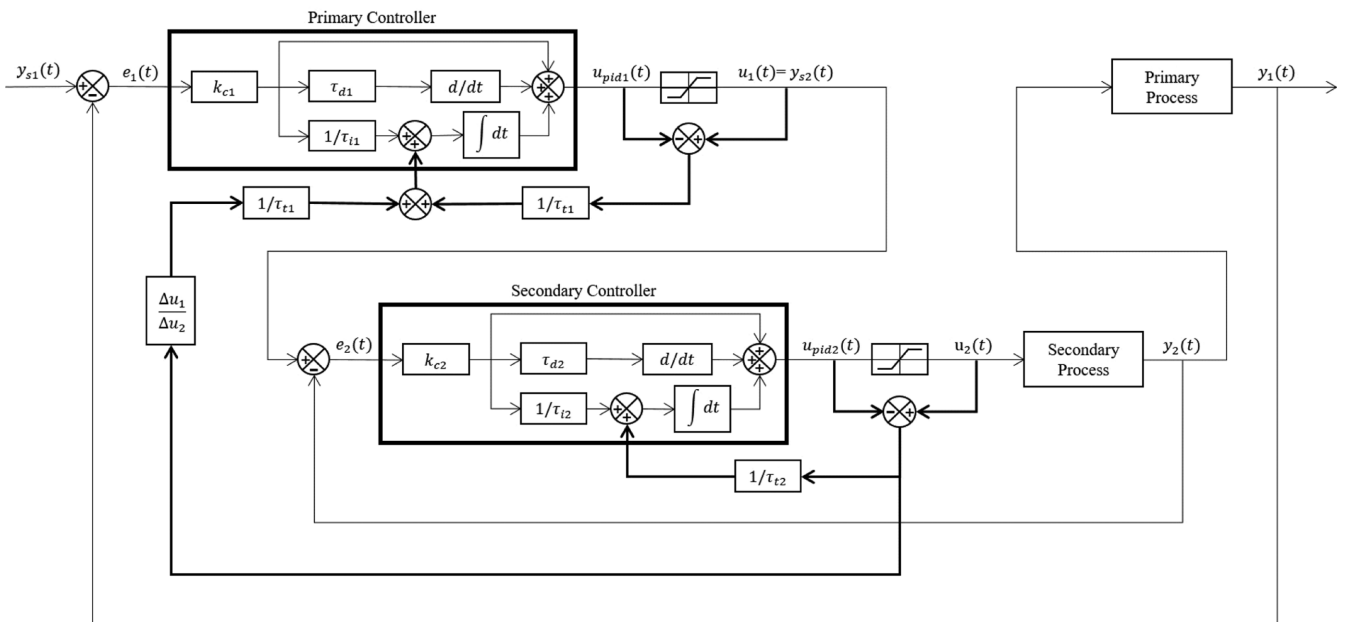


Fig. 2. Block diagram of cascade back calculation.

$$\text{If } u_{\min 2} \leq u_{pid2}(k) \leq u_{\max 2}, u_2(k) = u_{pid2}(k) \quad (32)$$

$$u_{i1}(k+1) = u_{i1}(k)$$

$$+ \left[\frac{k_{c1}}{\tau_{i1}} (y_{s1}(k) - y_1(k)) + \frac{1}{\tau_{i1}} (u_1(k) - u_{pid1}(k)) + \frac{1}{\tau_{i1}} (u_2(k) - u_{pid2}(k)) \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \right] \Delta t \quad (33)$$

$$u_{i2}(k+1)$$

$$= u_{i2}(k) + \left[\frac{k_{c2}}{\tau_{i2}} (y_{s2}(k) - y_2(k)) + \frac{1}{\tau_{i2}} (u_2(k) - u_{pid2}(k)) \right] \Delta t \quad (34)$$

여기서, $u_{\max 1 \cdot f}$ 과 $u_{\min 1 \cdot f}$ 은 주제어기의 최종 상한치와 하한치이다.

제안한 다단 역연산법의 핵심은 식 (33)와 (34)로 각각 주제어기와 종속제어기의 적분파트를 보여주고 있다. 여기서, $(1/\tau_{i1})(u_1(k) - u_{pid1}(k))\Delta t$ 와 $(1/\tau_{i2})(u_2(k) - u_{pid2}(k))\Delta t$ 는 각 단일루프에 대한 로컬 역연산법 안티 와인드업 기술에 해당한다. $(1/\tau_{i1})(u_2(k) - u_{pid2}(k))(\Delta u_1/\Delta u_2)\Delta t$ 는 종속제어기 출력이 포화되었을 때, 포화된 정도에 비례하여 주제어기의 적분동작을 감소시켜 종속제어기의 제어출력이 포화되더라도 주제어기의 총 적분동작이 비대해지는 현상을 억제하는 다단 역연산법에 해당한다. 여기서, $\Delta u_1/\Delta u_2$ 는 스케일 보정항으로 u_1 과 u_2 사이의 스케일 차이를 반영하기 위한 것이다. 이 스케일 보정항으로 인해 종속제어출력과 주제어출력 간의 큰 스케일 차이가 있더라도 종속제어출력이 포화되었을 때에 주제어기의 적분누적 현상을 정상적으로 방지할 수 있다.

2-2-1. 스케일 보정항 결정

종속공정(Secondary Process)이 일차시간지연 형태라면, 스케일 보정항 $\Delta u_1/\Delta u_2$ 는 다음과 같다.

$$G_{p2}(s) = \frac{y_2(s)}{u_2(s)} = \frac{k_2 \exp(-\theta_2 s)}{\tau_2 s + 1} \quad (35)$$

$$G_{c2}(s) = \frac{u_2(s)}{u_1(s) - y_2(s)} = k_{c2} + \frac{k_{c2}}{\tau_{i2} s} + k_{c2} \tau_{d2} s \quad (36)$$

$$\frac{u_1(s)}{u_2(s)} = \frac{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{G_{c2}(s)} \quad (37)$$

여기서, $G_{p2}(s)$ 와 $G_{c2}(s)$ 는 각각 종속공정과 종속제어기의 전달함수이다. 여기서 k_{c2} , $(k_{c2}/\tau_{i2})(1/s)$ 그리고 $k_{c2} \tau_{d2} s$ 는 각각 종속제어기의 비례파트, 적분파트 그리고 미분파트를 나타낸다.

종속제어기가 적분파트를 가지고 있으면 정상상태에서의 스케일 보정항은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{u_1(s)}{u_2(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{G_{c2}(s)} = k_2 \quad (38)$$

종속제어기가 적분파트가 없는 P제어기나 PD제어기인 경우, 정상상태에서의 스케일 보정항은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{u_1(s)}{u_2(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{G_{c2}(s)} = \frac{1 + k_{c2}k_2}{k_{c2}} \quad (39)$$

2-2-2. 주제어기 출력의 최종 상한치 결정

정상상태(Steady-state) 관점에서, 아래와 같이 계산된 주제어기의 $u_{\max 1 \cdot c}$ 과 $u_{\min 1 \cdot c}$ 은 종속제어기의 $u_{\max 2}$ 과 $u_{\min 2}$ 에 해당하도록 계산된 주제어기의 상한치이다.

$$u_{\max 1 \cdot c} = u_{\max 2} \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \quad (40)$$

$$u_{\min 1 \cdot c} = u_{\min 2} \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \quad (41)$$

여기에, 식 (16)-(19)과 같이 최초에 지정된 상한치 $u_{\max 1}$ 과 $u_{\min 1}$ 와 새로 계산된 상한치 $u_{\max 1 \cdot c}$ 과 $u_{\min 1 \cdot c}$ 를 만족하는 최종 주제어기의 상한치를 $u_{\max 1 \cdot f}$ 과 $u_{\min 1 \cdot f}$ 로 결정하였다.

이렇게 함으로써, 종속제어기 출력의 최대 범위가 주제어기의 출력 최대 범위에 비해 너무 작을 경우, 주제어기의 반응성이 느려지는 것을 방지할 수 있다. 이 방법을 사용하지 않을 경우에는 식 (33)에서 $(u_2(k) - u_{pid2}(k))$ 항의 $u_{pid2}(k)$ 값이 $u_2(k)$ 에 비해 너무 커져 적분동작을 지나치게 감소시켜 설정치 추종에 있어 반응성을 떨어뜨리게 된다.

3. 모 사

제안된 다단 안티 와인드업 기술의 제어성능을 검증하고 비교하기 위해 다양한 상황의 공정을 가정하고 종속제어기가 포화되는 조건에 대해 모사하였다. 이 때 종속제어기 출력의 상한치는 정상상태 값의 1.3배, 하한치는 0, 그리고 추종시상수는 적분시간과 같은 값으로 적용하였다.

첫 번째 공정은 종속공정이 저감쇠(under-damped)공정이고 두 제어기 모두 PID제어기 형태이다. 주공정(Primary Process)과 종속공정(Secondary Process)은 3차, 2차 시간지연 모델로 다음과 같다.

$$G_{p1} = \frac{1.0 \exp(-1.0s)}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \quad (42)$$

$$G_{p2} = \frac{0.7 \exp(-0.3s)}{s^2 + 2s + 2} \quad (43)$$

여기서, G_{p1} 과 G_{p2} 는 주공정과 종속공정의 전달함수이다. 주제어기와 종속제어기는 ITAE-2 튜닝룰[1]을 이용하여 제어파라미터를 결정하였다(주제어기: $k_{c1} = 0.881$, $\tau_{i1} = 2.937$, $\tau_{d1} = 1.057$, 종속제어기: $k_{c2} = 5.012$, $\tau_{i2} = 1.043$, $\tau_{d2} = 0.524$). 그리고 종속제어기 제어출력의 상한치는 3.714 이고 하한치는 0 이다.

Fig. 3은 각 방법들의 제어성능을 보여주고 있다. 제안한 방법들이 확실히 기존 방법에 비해 우수한 결과를 보여주고 있다.

두 번째 공정은 종속제어기가 P제어기인 공정이다. 주공정과 종속공정은 3차, 1차 시간지연 모델로 다음과 같다.

$$G_{p1} = \frac{1.0 \exp(-0.4s)}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \quad (44)$$

$$G_{p2} = \frac{2.0 \exp(-0.1s)}{s + 2} \quad (45)$$

주제어기는 ITAE-2 튜닝룰[1]을 이용하여 제어파라미터를 결정하였고($k_{c1} = 1.859$, $\tau_{i1} = 2.741$, $\tau_{d1} = 0.919$) 종속제어기는 ZN 튜닝룰[1]을 이용하여 제어 파라미터를 결정하였다 ($k_{c2} = 4.251$). 그리고 종속제어기 제어출력의 상한치는 1.3 이고 하한치는 0 이다.

제안한 방법들이 종속제어출력의 포화로 인한 주제어기의 적분이 비대해지는 것을 막아 Fig. 4의 제어 결과와 같이 두 번째 공정

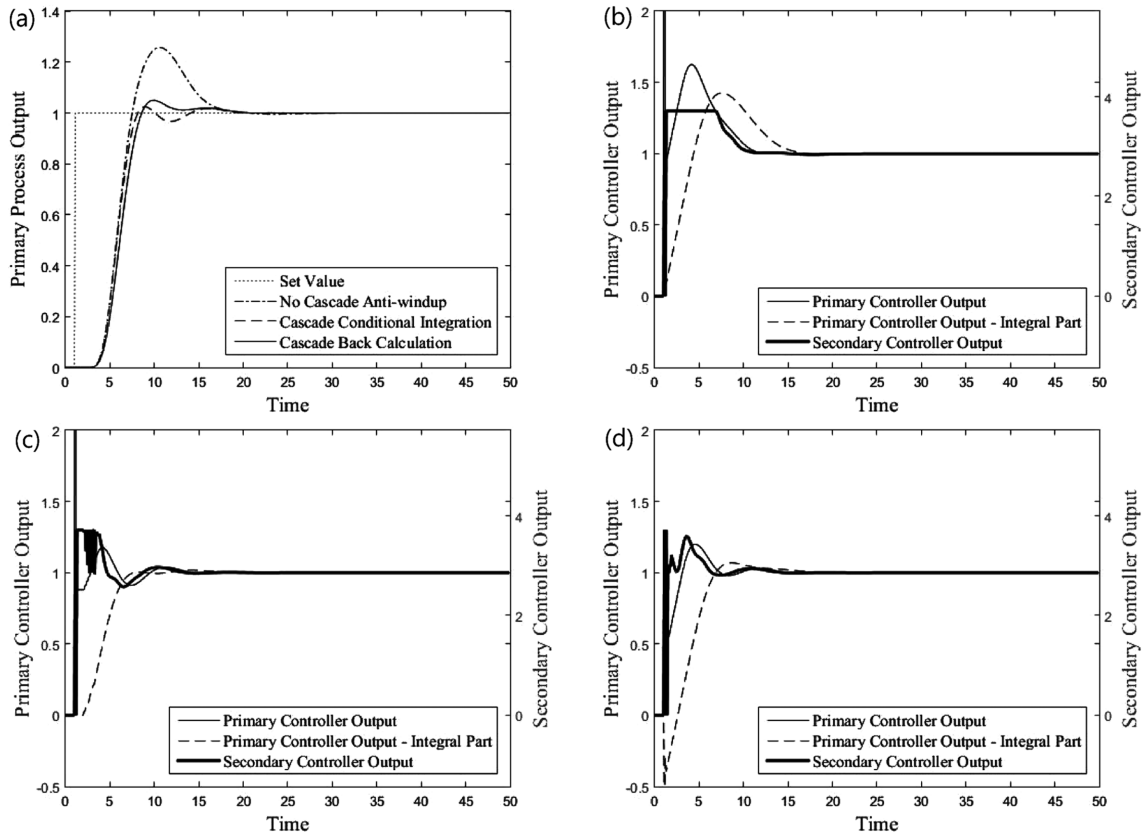


Fig. 3. Control performances of the proposed methods for the first process. (a) Primary process output, (b) Controller output – no cascade anti-windup, (c) Controller output – cascade conditional integration, and (d) Controller output – cascade back calculation.

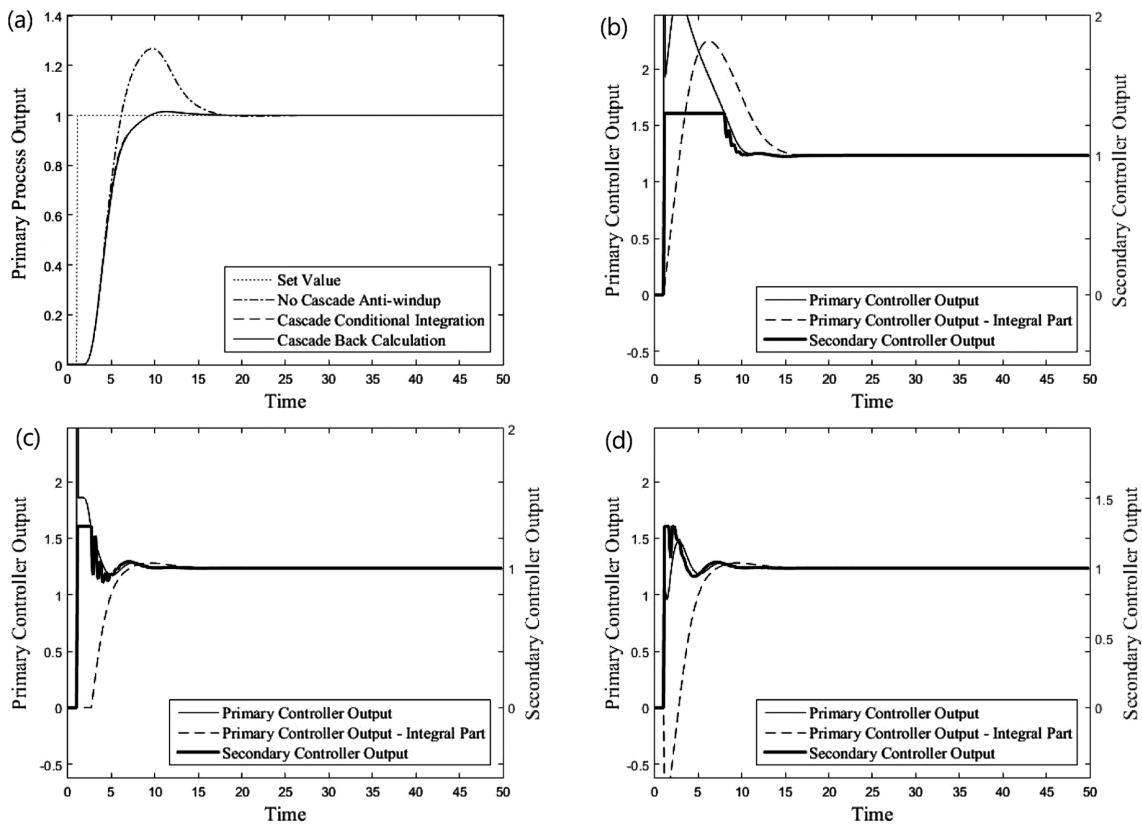


Fig. 4. Control performances of the proposed methods for the second process. (a) Primary process output, (b) Controller output – no cascade anti-windup, (c) Controller output – cascade conditional integration, and (d) Controller output – cascade back calculation.

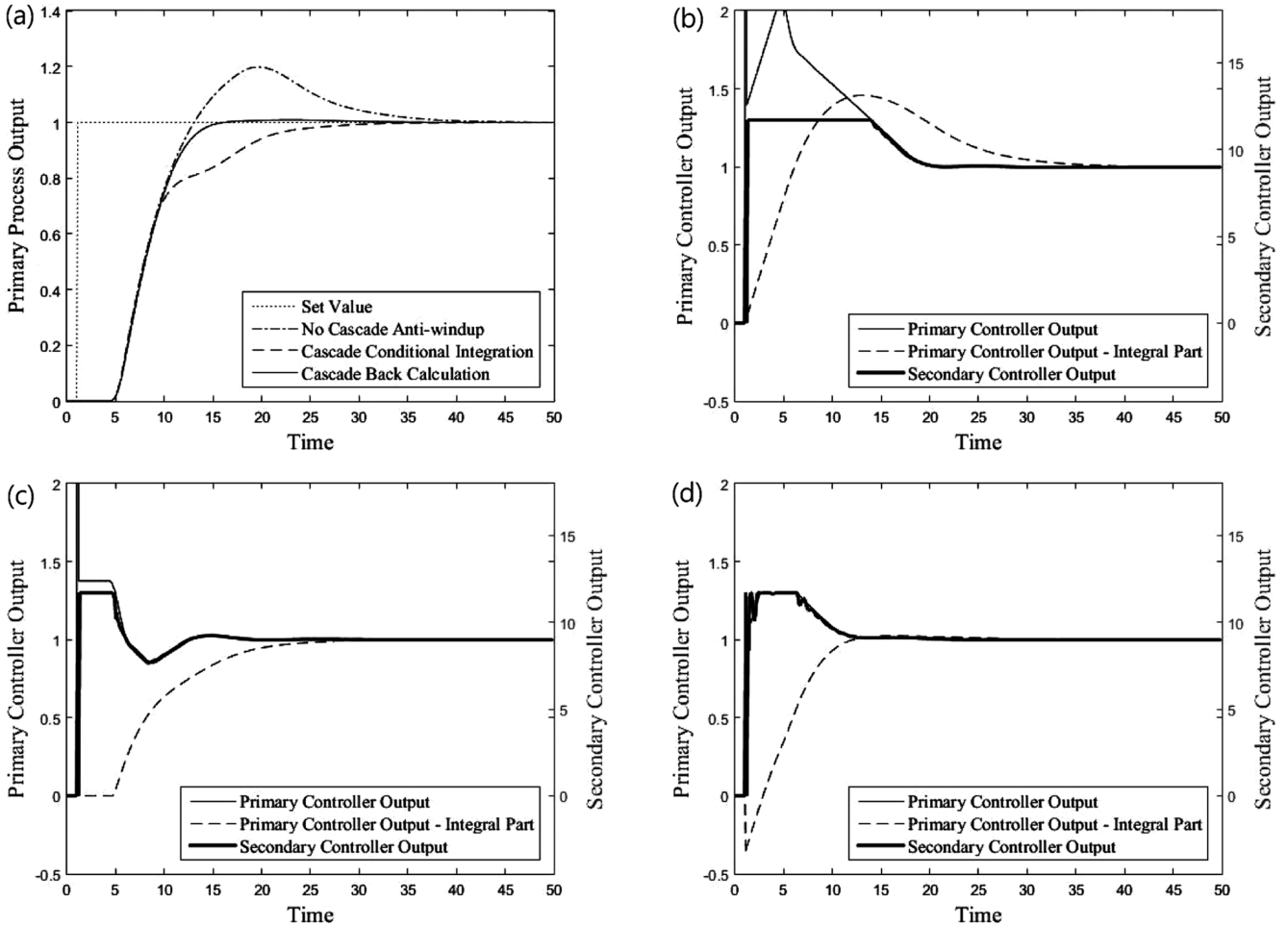


Fig. 5. Control performances of the proposed methods for the third process. (a) Primary process output, (b) Controller output – no cascade anti-windup, (c) Controller output – cascade conditional integration, and (d) Controller output – cascade back calculation.

에서도 제안된 방법들의 제어성능이 보다 우수함을 알 수 있다.

세 번째 공정은 종속공정의 반응시간이 주공정에 비해 매우 빠른 공정이다. 주공정과 종속공정은 모두 2차 시간지연 모델로 다음과 같다.

$$G_{p1} = \frac{1.0\exp(-3.0s)}{4s^2 + 6s + 1} \quad (46)$$

$$G_{p2} = \frac{1.0\exp(-0.1s)}{s^2 + 3s + 9} \quad (47)$$

주제어기와 종속제어기는 ITAE-2 튜닝률[1]을 이용하여 제어파라미터를 결정하였다(주제어기: $k_{c1} = 1.375, \tau_{i1} = 6.884, \tau_{d1} = 1.367$, 종속제어기: $k_{c2} = 15.085, \tau_{i2} = 0.346, \tau_{d2} = 0.331$). 그리고 종속제어기 제어출력의 상한치는 11.7 이고 하한치는 0 이다. Fig. 5와 같이 종속공정에 비해 주공정의 시간지연이 상당히 길어도 특히 제안된 방법들 중에 다단 역연산법이 우수한 성능을 보인다.

네 번째 공정은 종속공정의 반응시간이 주공정과 비슷한 공정이다. 주공정과 종속공정은 모두 2차 시간지연 모델로 다음과 같다.

$$G_{p1} = \frac{1.0\exp(-1.0s)}{4s^2 + 6s + 1} \quad (48)$$

$$G_{p2} = \frac{1.0\exp(-0.7s)}{3s^2 + 3s + 1} \quad (49)$$

주제어기와 종속제어기는 ITAE-2 튜닝률[1]을 이용하여 제어파라미터를 결정하였다(주제어기: $k_{c1} = 1.745, \tau_{i1} = 6.612, \tau_{d1} = 1.107$, 종속제어기: $k_{c2} = 2.251, \tau_{i2} = 3.126, \tau_{d2} = 1.079$). 그리고 종속제어기 제어출력의 상한치는 1.3 이고 하한치는 0 이다. Fig. 6과 같이 두 공정의 동특성이 비슷할 경우에도 제안된 방법들은 효과적으로 적분누적 현상을 억제하고 우수한 제어성능을 보여줌을 알 수 있다.

다단 조건부 적분법과 다단 역연산법 모두 기존의 로컬 안티 와인드업 기술만 사용했을 경우에 비해 효과적으로 적분누적 현상을 막는 것을 볼 수 있었다. 종속제어기의 포화는 실제 산업현장에서 빈번하게 일어나는 액츄에이터의 포화에 해당하는 조건으로, 제안된 다단제어용 안티 와인드업 기술을 적용하면 이를 효과적으로 방지할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 다단 조건부 적분법은 몇 가지 공정에서 주공정의 출력이 타겟값의 일정 범위 내에서 안정되는데 시간이 오래 걸리는 현상을 보였다. 다단 역연산법은 모든 공정에서 가장 좋은 제어성능을 보였고, 다양한 공정 및 조건에서 발생하는 적분누적 현상을 효과적으로 방지하였다.

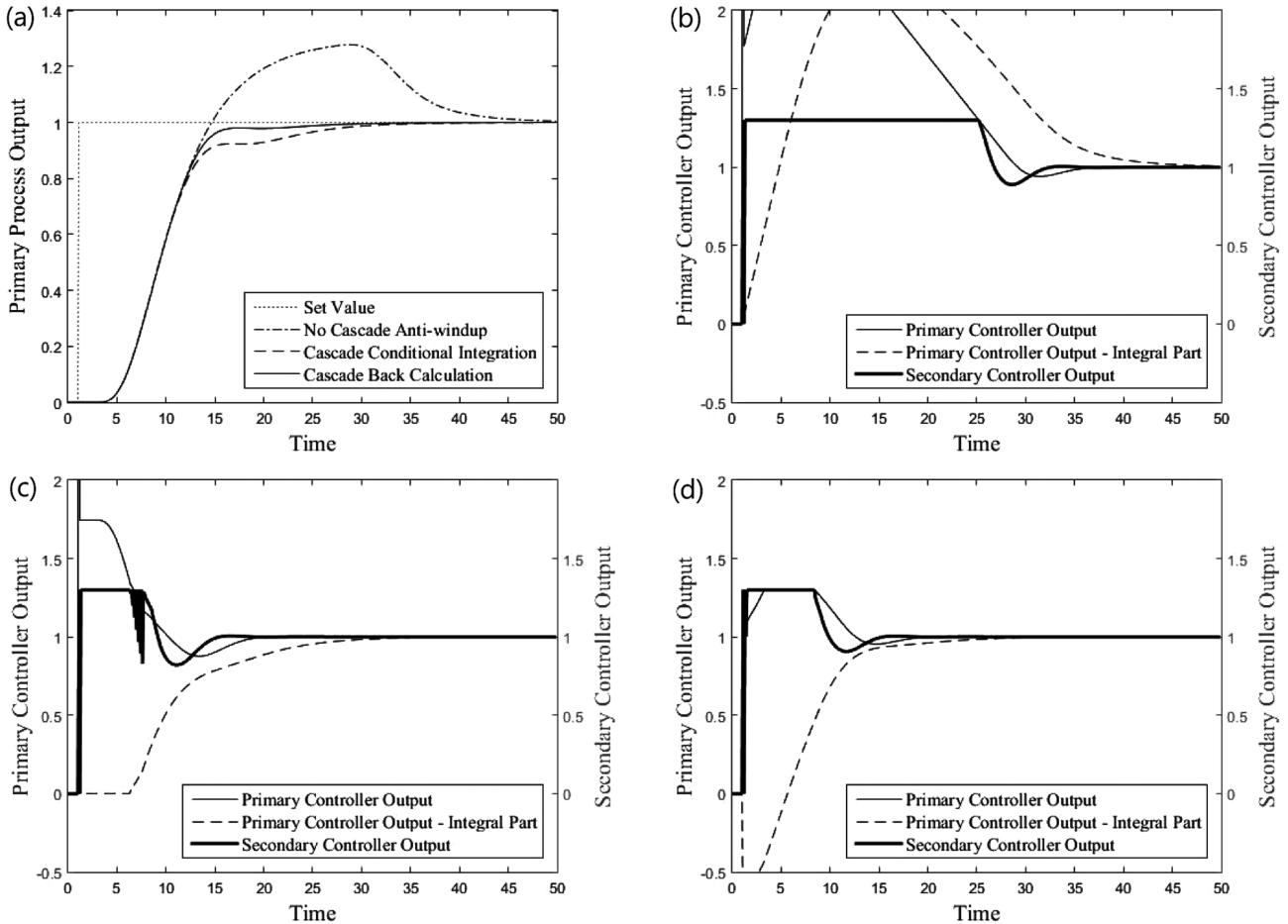


Fig. 6. Control performances of the proposed methods for the fourth process. (a) Primary process output, (b) Controller output – no cascade anti-windup, (c) Controller output – cascade conditional integration, and (d) Controller output – cascade back calculation.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 다단제어 구조에서 종속제어기의 제어출력이 포화되었을 때, 주제어기의 적분누적 현상을 방지하여 제어성능 저하를 막을 수 있는 다단 안티 와인드업 기술을 개발하였다. 단일루프 제어시스템에서 이미 널리 사용되고 있는 로컬 안티 와인드업 기술인 조건부 적분법과 역연산법의 개념을 확장하여 다단제어용 안티 와인드업 기술을 개발함으로써 로직의 신뢰성과 강건성을 확보하였다.

모사 결과, 다단 역연산법이 다단제어에서 종속제어기의 제어출력의 포화로 인해 발생한 적분누적 현상을 효과적으로 방지하였고 공정이나 제어기 형태에 상관없이 가장 좋은 제어성능을 보였다. 향후 실제 공정 적용을 통해 신뢰성을 확보한다면 산업현장의 다단 제어의 제어성능을 높이는 데 큰 기여를 할 수 있을 것이다.

References

1. Sung, S. W., Lee, J. and Lee, I. B., Process Identification and PID Control, John Wiley & Sons (2009).
2. Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F. and Doyle III, F. J., Process Dynamics and Control, John Wiley & Sons(2010).

3. Berner, J., Haggglund, T., and Astrom, K. J., "Asymmetric Relay Autotuning – Practical Features for Industrial Use," *Control Eng. Practice*, **54**, 231-245(2016).
4. Lee, J., Sung, S. W., Lee, F. Y., Baldea, M., and Edgar, T. F., "Full Closed-Loop Tests for the Relay Feedback Autotuning of Stable, Integrating, and Unstable Processes," *ACS Omega*, **4**(20), 18760-18770(2019).
5. Park, B. E., Kim, K. H., Kang, H. S., Sung, S. W. and Lee, I. B., "Improved Relay Feedback Method Under Noisy and Disturbance Environments," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **52**(5), 430-438(2019).
6. Nikita, S. and Lee, M., "Control of a Wastewater Treatment Plant Using Relay Auto-tuning," *Korean J. Chem. Eng.*, **36**(4), 505-512 (2019).
7. Morari, M. and Zafiriou, E., Robust Process Control, Prentice Hall(1989).
8. Jia, B., Mikalsen, R. Smallbone, A., Zuo, Z. and Feng, H., "Piston Motion Control of a Free-piston Engine Generator: A New Approach Using Cascade Control," *Appl. Energy*, **179**, 1166-1175 (2016).
9. Astrom, K. J., and Haggglund, T., PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America(1995).
10. Rehan, M., Ahmed, A. and Iqbal, N., "Static and Low Order Anti-windup Synthesis for Cascade Control Systems with Actuator Saturation: An Application to Temperature-based Process Con-

- trol,' *ISA Trans.*, **49**(3), 293-301(2010).
11. Mehdi, N., Rehan, M., Malik, F. M., Bhatti, A. I. and Tufail, M., "A Novel Anti-windup Framework for Cascade Control Systems: An Application to Underactuated Mechanical Systems;" *ISA Trans.*, **53**(3), 802-815(2014).
12. Adegbege, A. A. and Heath, W. P., "A Framework for Multivariable Algebraic Loops in Linear Anti-windup Implementations;" *Automatica*, **83**, 81-90(2017).