(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0094946
(43) 공개일자 2011년08월24일

(51) Int. Cl.
H02P 21/02 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2010-0014689
(22) 출원일자 2010년02월18일
심사청구일자 2010년02월18일

(71) 출원인
경상대학교산학협력단
경상남도 진주시 가좌동 900
한국서부발전 주식회사
서울특별시 강남구 삼성동 167
(72) 발명자
신휘범
경상남도 진주시 이현동 이현하이클래스웰가아파트 105동 203호
이순영
경상남도 진주시 금산면 장사리 진주푸르지오2단지아파트 201동 802호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이현수, 김태헌, 정홍식

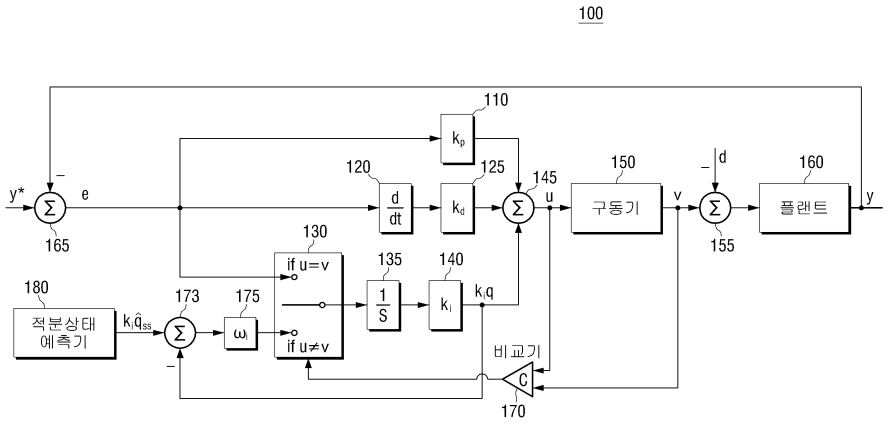
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 반포화 비례적분미분 제어기

(57) 요 약

비례적분미분(PID) 제어기가 개시된다. 본 비례적분미분 제어기는, 선형영역 또는 포화영역으로 동작하는 구동기, 플랜트의 기준값과 출력값의 오차에 대한 비례 연산을 수행하는 비례 제어기, 오차에 대한 미분 연산을 수행하는 미분 제어기, 구동기가 선형영역으로 동작하면, 오차에 대한 적분 연산을 수행하는 적분 제어기, 구동기가 포화영역으로 동작하면, 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 적분상태 예측기 및, 예측된 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 이용하여, 구동기가 선형영역에 진입하기 전에 적분 제어기의 초기 상태가 선형영역의 적분상태 값이 되도록 하는 적분상태 초기화 루프를 포함한다.

대 표 도 - 도4



(72) 발명자

박종만

인천광역시 계양구 용종동 214 초정마을쌍용아파트 310동 1802호

신현식

경기도 안성시 공도읍 진사리 643 안성공도우림루미아트아파트 105동 2005호

특허청구의 범위

청구항 1

비례적분미분(PID) 제어기에 있어서,

선형영역 또는 포화영역으로 동작하는 구동기;

플랜트의 기준값과 출력값의 오차에 대한 비례 연산을 수행하는 비례 제어기;

상기 오차에 대한 미분 연산을 수행하는 미분 제어기;

상기 구동기가 선형영역으로 동작하면, 상기 오차에 대한 적분 연산을 수행하는 적분 제어기;

상기 구동기가 포화영역으로 동작하면, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 적분상태 예측기; 및

상기 예측된 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 이용하여, 상기 구동기가 선형영역에 진입하기 전에 상기 적분 제어기의 초기 상태가 선형영역의 적분상태 값이 되도록 하는 적분상태 초기화 루프;를 포함하는 비례적분미분 제어기.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 적분상태 예측기는,

아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기:

$$\widehat{Q_{ss}} = \frac{1}{k_i}\left[\frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v\right]$$

여기서, $\widehat{Q_{ss}}$는 예측된 적분 제어기의 값, k_i는 적분 제어기의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, e는 플랜트의 출력 오차, τ는 고유 시정수, v는 플랜트의 입력이다.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 적분상태 예측기는,

아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기:

$$\widehat{Q_{ss}} = \frac{1}{k_i}\left[\frac{1}{b}\dot{e} + v\right]$$

여기서, $\widehat{Q_{ss}}$는 예측된 적분 제어기의 값, k_i는 적분 제어기의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, v는 플랜트의 입력이다.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 적분상태 예측기는,

아래의 수학식을 이용하여, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 출력을 예측하여, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기:

$$k_i\widehat{a_{ss}} = \frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v$$

여기서, $k_i\widehat{a_{ss}}$는 예측된 적분 제어기의 출력, k_i는 적분 제어기의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, e는 플랜트의 출력 오차, τ 는 고유 시정수, v는 플랜트의 입력이다.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 적분상태 예측기는,

아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기:

$$k_i\widehat{a_{ss}} = \frac{\dot{e}}{b} + v$$

여기서, $k_i\widehat{a_{ss}}$는 예측된 적분 제어기의 출력, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, v는 플랜트의 입력이다.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 구동기의 입력과 상기 구동기의 출력을 비교하여 상기 구동기가 선형영역 또는 포화영역에서 동작하는지를 판단하는 비교기;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 비교기는,

상기 구동기의 입력과, 상기 구동기의 출력을 예측하여, 상기 구동기가 선형영역 또는 포화영역에 동작하는지를 판단하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 구동기가 선형영역에서 동작하면, 상기 오차가 상기 적분 제어기에 입력되도록 하고, 상기 구동기가 포화영역에서 동작하면, 상기 적분 제어기가 상기 적분상태 초기화 루프에 연결되도록 제어하는 스위치;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 비례적분미분 제어기.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 반포화 비례적분미분 제어기에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 구동기가 포화영역에서 동작할 때 적분기의 정상상태 값을 예측하고, 예측된 값을 구동기가 선형영역으로 진입할 때 사용하여, 적분 와인드업 현상을 방지하는 비례적분미분 제어기를 제공하는 데 있다.

배 경 기 술

[0002] 일반적인 피드백 제어기는 시스템이 외부 명령에 따라 작동하도록 제어 대상의 출력을 감지하여 명령 값을 신속하게 추종하도록 하는 장치로, 비례(P) 제어기, 비례적분(PI)제어기, 비례적분미분(PID) 제어기 등이 있다.

[0003] 종래 비례적분미분 제어기에 대해서 1) 제한 적분기(limited integrator) 방식, 2) 조건 적분(conditional integration) 방식, 3) 역추적 계산(tracking back calculation) 방식과 같은 3가지 방식으로 제어를 수행하였다.

[0004] 구체적으로, 제한 적분기는 구동기가 선형영역에 동작하도록 비례적분 제어기의 출력을 높은 이득의 데드존(dead zone)을 통해 적분기로 궤환하여 적분기의 출력을 제한하는 방법이고, 조건적 적분은 구동기가 선형 또는 포화영역에서 동작하는가에 따라 적분기를 동작하거나, 중지하여 적분상태의 값을 제한하는 방법이다. 그리고, 역추적 계산 방법은 구동기가 포화영역에서 동작하면 제어기 출력과 구동기 출력의 차이를 적분기의 음의 궤환으로 음의 궤환을 하여 포화영역에서 적분기의 값이 비정상적으로 커지는 것을 방지하는 방법이다.

[0005] 그러나, 이와 같은 종래의 상술한 방법들은 포화영역에서 적분기의 출력을 적절히 제어하는 방법으로, 부하조건, 선형영역에 진입할 때 적분기의 상태 등에 따라 과도한 오버슈트가 발생하거나 정착시간이 길어져 제어 성능이 현저히 저하되는 경우가 발생하는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 따라서, 본 발명의 목적은 구동기가 포화영역에서 동작할 때 적분기의 정상상태 값을 예측하고, 예측된 값을 선형영역에 진입할 때 적분기의 초기값으로 사용하여 외란 또는 동작 조건에 관계없이 거의 일정한 출력 응답을 얻고, 오버슈트가 커지고 정착시간이 길어지는 등의 와인드업 현상을 방지하는 비례적분미분 제어기를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 이상과 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 비례적분미분 제어기는, 선형영역 또는 포화영역으로 동작하는 구동기, 플랜트의 기준값과 출력값의 오차에 대한 비례 연산을 수행하는 비례 제어기, 상기 오차에 대한 미분 연산을 수행하는 미분 제어기, 상기 구동기가 선형영역으로 동작하면, 상기 오차에 대한 적분 연산을 수행하는 적분 제어기, 상기 구동기가 포화영역으로 동작하면, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 적분상태 예측기, 및, 상기 예측된 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 이용하여, 상기 구동기가 선형영역에 진입하기 전에 상기 적분 제어기의 초기 상태가 선형영역의 적분상태 값이 되도록 하는 적분상태 초기화 루프를 포함한다.

[0008] 이 경우, 상기 적분상태 예측기는, 아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것이 바람직하다.

[0009] $$\hat{q}_{ss} = \frac{1}{k_i}\left[\frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v\right]$$

[0010] 여기서, $\hat{q}_{ss}$는 예측된 적분 제어기의 값, k_i는 적분 제어기의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, e는 플랜트의 출력 오차, τ는 고유 시정수, v는 플랜트의 입력이다.

[0011] 한편, 상기 적분상태 예측기는, 아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것도 바람직하다.

[0012] $$\hat{q}_{ss} = \frac{1}{k_i}\left[\frac{1}{b}\dot{e} + v\right]$$

[0013] 한편, 상기 적분상태 예측기는, 아래의 수학식을 이용하여, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 출력을 예측하여, 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측하는 것이 바람직하다.

[0014] $$k_i\hat{q}_{ss} = \frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v$$

[0015] 여기서, $k_i\hat{q}_{ss}$는 예측된 적분 제어기의 출력, k_i는 적분 제어기의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, e는 플랜트의 출력 오차, τ는 고유 시정수, v는 플랜트의 입력이다.

[0016] 한편, 상기 적분상태 예측기는, 아래의 수학식을 이용하여 상기 적분 제어기의 정상상태에서의 적분상태를 예측할 수 있다.

[0017] $$k_i\hat{q}_s = \frac{\dot{e}}{b} + v$$

[0018] 한편, 본 비례적분미분 제어기는, 상기 구동기의 입력과 상기 구동기의 출력을 비교하여 상기 구동기가 선형영역 또는 포화영역에서 동작하는지를 판단하는 비교기를 더 포함할 수 있다.

[0019] 이 경우, 상기 비교기는, 상기 구동기의 입력과, 상기 구동기의 출력을 예측하여, 상기 구동기가 선형영역 또는 포화영역에 동작하는 지를 판단하는 것이 바람직하다.

[0020] 한편, 본 비례적분미분 제어기는, 상기 구동기가 선형영역에서 동작하면, 상기 오차가 상기 적분 제어기에 입력되도록 하고, 상기 구동기가 포화영역에서 동작하면, 상기 적분 제어기가 상기 적분상태 초기화 루프에 연결되도록 제어하는 스위치를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0021] 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기는 포화영역으로 동작할 때의 적분 제어기의 정상 상태 값을 예측하고, 이를 선형영역으로 진입할 때 이용함으로써, 외란 또는 동작조건에 관계없이 거의 일정한 출력응답을 얻을 수 있게 된다.

[0022] 그리고, 외란 또는 동작조건에 관계없이 거의 일정한 출력응답을 얻을 수 있다는 점에서, 제어기가 포화영역에서 동작하여 발생하는 과도한 오버슈트와 정착시간 등 제어 성능을 쉽게 개선할 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 비례적분미분 제어기의 동작 영역을 도시한 도면,

도 2는 선형영역 진입 조건에 따른 응답 궤적을 도시한 도면,

도 3은 선형영역 진입 조건에 따른 출력 응답을 도시한 도면,

도 4는 본 실시예에 따른 반포화 비례적분미분 제어기의 구성을 도시한 블록도,

도 5 및 도 6은 도 4의 적분상태 예측기를 구체적으로 도시한 도면,

도 7은 외란이 없는 상태에서 초기 조건에 따른 응답 궤적을 반포화가 없는 경우와 비교한 도면,

도 8은 도 7의 조건에서 출력, 적분상태, 입력 등 응답 비교한 도면,

도 9는 일정한 외란이 있는 상태에서 초기 조건에 따른 응답 궤적을 반포화가 없는 경우와 비교한 도면, 그리고,

도 10은 도 9의 조건에서 출력, 적분상태, 입력 등 응답 비교를 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 이하 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시 예를 보다 상세하게 설명한다.

[0025] 도 1은 비례적분미분 제어기의 동작 영역을 도시한 도면이다. 구체적으로, 도 1은 k_pe-k_iq 좌표계에서 선형영역과 포화영역을 나타낸다. 이하에서는 비례적분미분 제어기의 선형영역에서의 동작을 먼저 설명하고, 도 1과 관련된 내용은 후술한다.

[0026] 일반적인 발전소의 보일러 온도제어, 전동기의 속도제어 시스템은 내부 비례적분미분 제어 루프, 외부 비례적분미분 제어 루프 등으로 구성되는 캐스케이드(cascade) 형태로 제어된다.

[0027] 이때, 비례적분미분 제어기의 궤환 루프 내의 일차 플랜트의 특성식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 1

[0028] $$\dot{y} = -\frac{1}{\tau}y + bv - c$$

[0029] 여기서 y는 제어 대상 변수이고, v는 제어 수단으로 플랜트 입력을 나타내며, τ는 시스템의 고유 시정수를 나타낸다. 그리고, d는 외란을 나타내며, 동작 조건에 따라 일반적으로 일정한 값을 갖는다.

[0030] 한편, 플랜트 입력(v)은 구동기에 의해 발생하는데, 일반적으로 구동기의 출력은 다음과 같이 포화 비선형에 형태로 제한된다.

수학식 2

[0031] $$v=\begin{cases} U_h & \text{if } u > U_h \\ u & \text{if } U_l \le u \le U_h \\ U_l & \text{if } u < U_l \end{cases}$$

[0032] 여기서, u는 비례적분미분 제어기의 출력을 나타내며, U_h는 구동기의 최대 출력이고, U_l는 구동기의 최소 출력이다. 수학식 2에서와 같이 비례적분미분 제어기 출력과 구동기의 출력이 같으면 비례적분미분 제어기가 선형영역에서 동작하는 것을 의미하며, 제어기 출력과 구동기의 출력이 다르면 비례적분미분 제어기가 포화영역에서 동작하는 것을 의미한다.

[0033] 선형 영역에서의 비례적분미분 제어기의 출력은 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

수학식 3

[0034] $$u = k_p e + k_i q + k_d \dot{e}$$

[0035] 여기서, k_p는 비례 제어기의 이득이고, k_d는 미분 제어기의 이득이고, k_i는 적분 제어기의 이득이다. 그리고, e는 비례적분미분 제어기의 오차로, $e = y^+ - y$로 표시할 수 있다. 그리고, y^*는 제어 명령 또는 기준값이다. 그리고, q는 적분상태로, 다음과 같은 수학식 4로 표시할 수 있으며, $\dot{e}$는 오차 동특성으로 수학식 5와 같이 표시할 수 있다.

수학식 4

[0036] $$\dot{q} = e$$

수학식 5

[0037] $$\dot{e} = -\frac{1}{\tau} e - bu + d + \frac{1}{\tau} y^+$$

[0038] 상술한 수학식 3 내지 5를 정리하면 다음과 같은 적분 제어기의 값q_{ss}을 계산할 수 있다.

수학식 6

[0039] $$k_i q_{ss} = \left(d + \frac{1}{\tau} y^+ \right) / b$$

[0040] 수학식 6을 참고하면, 주어진 적분 제어기의 정상상태 값은 외란(d)과 기준값(y^*)에 의해 결정됨을 알 수 있다.

[0041] 한편, 수학식 5 및 수학식 6을 정리하면 선형영역에서의 오차 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

[0042] $$(1+bk_d)\dot{e}=-\left(\frac{1}{\tau}+bk_p\right)e+bk_i(q_{ss}-q)$$

[0043] 그리고, 수학식 4 및 수학식 7을 라플라스 변환하면, 선형영역에서 오차에 대한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 8

[0044] $$E(s)=\frac{s}{s^2+\left(\frac{1/\tau+bk_p}{1+bk_d}\right)s+\frac{bk_i}{1+bk_d}}e(0)+\frac{bk_i/(1+bk_d)}{s^2+\left(\frac{1/\tau+bk_p}{1+bk_d}\right)s+\frac{bk_i}{1+bk_d}}\left[sQ_{ss}(s)-q(0)\right]$$

[0045] 한편, 정상상태에서 적분 제어기의 값이 일정하면 오차에 대한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

[0046] $$E(s)=\frac{s}{s^2+\left(\frac{1/\tau+bk_p}{1+bk_d}\right)s+\frac{bk_i}{1+bk_d}}e(0)+\frac{bk_i/(1+bk_d)}{s^2+\left(\frac{1/\tau+bk_p}{1+bk_d}\right)s+\frac{bk_i}{1+bk_d}}\left[q_{ss}-q(0)\right]$$

[0047] 수학식 9를 참고하면, 오차 응답의 안정도는 기본적으로 비례적분미분 제어기의 이득에 결정됨을 알 수 있다. 그리고, 오차 응답은 계단 명령에 의한 출력의 초기 오차와 적분 제어기의 초기 오차에 의해서도 결정됨을 알 수 있다.

[0048] 따라서, 비례적분미분 제어기가 포화영역에서 동작할 때 적분 제어기의 정상상태의 값 q_{ss}를 예측하고, 선형영역에 진입하기 전에 이 값을 적분상태의 초기값 $q(0)$으로 인가하면 적분 제어기 초기 오차에 의한 영향을 최소화할 수 있게 된다.

[0049] 한편, 포화영역에서는 구동기의 제한 값으로 오차가 응답하고, 선형영역에서는 외란 등 동작 조건에 관계없이 비례적분미분 제어기의 이득에 의해 결정된 유사한 오차 응답특성을 얻을 수 있다.

[0050] 비례적분미분 제어기가 포화 비선형에 의해 제한되는 경우, 선형영역의 상위와 하위 경계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 10

[0051] $$B_h:\ k_sq=-k_pe-k_d\dot{e}+U_h$$
$$B_l:\ k_sq=-k_pe-k_d\dot{e}+U_l$$

[0052] 일반적으로 미분항이 비례항 및 적분항에 비하여 일반적으로 작으므로, 상술한 수학식 10은 다음과 같이 근사화하여 나타낼 수 있다.

수학식 11

[0053] $$B_h:\ k_sq\approx-k_pe+U_h$$
$$B_l:\ k_sq\approx-k_pe+U_l$$

[0054] 수학식 11을 이용하여, $k_p e - k_i q$에서의 선형영역과 포화영역을 나타내면 상술한 도 1과 같다. 다시 도 1을 참고하면, B_h와 B_l은 선형영역의 상위 경계와 하위 경계를 나타내고, 두 경계 사이의 진한 영역이 선형영역이다. 그리고, 정상상태에서 비례적분미분 제어기의 동작점(F)은 수직축인 $k_i q$ 축에 위치한다. 여기서, 오차는 영이고, 적분 제어기 정상상태는 수학식 6에 따라 외란 등 동작 조건에 의해 수직축에 위치한다.

[0055] 한편, 비례적분미분 제어기가 안정하게 동작하기 위해서 정상상태의 적분상태는 다음 조건을 만족해야 한다.

수학식 12

[0056] $$U_l \le k_i q_{ss} \le U_h$$

[0057] 비례적분미분 제어기의 시작점 S는 이전의 정상상태와 새로운 명령 값에 의해 $k_p e - k_i q$ 평면에 표현할 수 있다. 시작점의 수직축 좌표는 이전의 정상상태 값 즉, 외란 등 동작조건에 의해 결정되고, 수평축 좌표는 기준 명령에 의해 결정된다. 따라서 시작점은 도 1에서 U_h와 U_l 사이의 수평 폭 안에 존재할 수 있다.

[0058] 한편, 비례적분미분 제어기에서 와인드업 방지 방법은 선형영역에 진입할 때 적분 제어기의 초기값을 포화영역에서 동작하는 동안 어떻게 설정하느냐에 달려있다. 포화영역에서 플랜트의 출력은 제어기와는 무관하게 제어기 출력의 포화 값 U_h 또는 U_l에 의해 응답한다. 이때 비례적분미분 제어기는 제어기와 플랜트의 응답이 일치하지 않은 출력 오차를 적분하고, 선형영역에 진입 시 적분 제어기의 초기값에 대응한다.

[0059] 그리고, 비례적분미분 제어기가 선형영역에서 동작하면 기본적으로 제어기 이득에 의해 결정된 출력 응답은 수학식 9에서처럼 일치하지 않는 적분 제어기의 초기값과 정상상태 값의 차이에 의해 적분 와인드업 현상이 발생하여 큰 오버슈트가 발생하거나 정착시간이 매우 길어진다.

[0060] 도 2는 비례적분미분 제어기가 포화영역에서 선형영역에 진입할 때 정상상태 값에 대한 적분 제어기의 초기값에 따른 오차와 적분상태 따른 응답 궤적을 나타낸다.

[0061] 도 2를 참고하면, 응답 궤적은 적분 제어기의 초기값과 적분 제어기의 정상상태 값에 따라 변화하게 된다. 구체적으로, 응답 궤적은 수학식 9에서와 같이 적분 제어기의 초기값과 적분 제어기의 정상상태 값에 따라 변화하게 된다.

[0062] 도 3은 도 2의 조건에서 기준값으로 나누어진 출력의 시간 응답을 나타낸다.

[0063] 도 3을 참고하면, 초기값이 정상상태의 값보다 증가하면 제어 시스템의 제동이 작아져 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다.

[0064] 따라서, 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기는 적분 와인드업 현상을 방지하기 위하여, 적분 제어기의 출력을 제어하는 기존의 방법과 달리, 구동기의 포화영역에서 적분 제어기의 정상상태 값을 예측하고, 예측된 정상상태 값을 선형영역에 진입할 때의 초기값으로 사용하여, 외란 또는 동작 조건에 관계없이 거의 일정한 출력 응답을 얻고, 오버슈트가 커지고 정착시간이 길어지는 등의 와인드업 현상을 방지하고자 한다.

[0065] 도 4는 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기를 나타낸다.

[0066] 도 4를 참고하면, 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기(100)는 비례 제어기(110), 미분 제어기(120, 125), 스위치(130), 적분 제어기(135, 140), 감산기(145, 165, 165), 구동기(150), 플랜트(160), 비교기(170), 적분상태 초기화 루프(173), 저역통과필터(175), 및 적분상태 예측기(180)를 포함할 수 있다.

[0067] 비례 제어기(110)는 플랜트(160)의 기준값(y^*)과 출력값(y)의 오차(e)에 대한 비례 연산을 수행할 수 있다.

[0068] 미분 제어기(120, 125)는 플랜트(160)의 기준값(y^*)과 출력값(y)의 오차(e)에 대한 미분 연산을 수행할 수 있다.

[0069] 스위치(130)는 구동기(150)의 동작 상태에 따라 적분 제어기(135, 140)에 입력 상태를 변환할 수 있다. 구체적으로, 스위치(130)는 구동기(150)가 선형영역에서 동작하는 경우, 적분 제어기(135, 140)가 플랜트(160)의 기준

값(y^*)과 출력값(y)의 오차(e)에 대한 적분 연산을 수행하도록 할 수 있으며, 구동기(150)가 포화영역에서 동작하는 경우, 적분상태 초기화 루프(130, 135, 140, 173, 175)가 형성되도록 할 수 있다. 즉, 비례적분미분 제어기(100)가 선형영역에서 동작하면, 비례적분미분 제어기(100)는 일반적인 비례, 적분, 미분 동작을 통해 플랜트를 제어한다.

[0070] 적분 제어기(135, 140)는 입력되는 값에 대한 적분 연상을 수행할 수 있다. 구체적으로, 적분 제어기(135, 140)는 구동기(150)가 선형영역에서 동작하는 경우, 플랜트(160)의 기준값(y^*)과 출력값(y)의 오차(e)에 대한 적분 연산을 수행하고, 구동기(150)가 포화영역에서 동작하는 경우, 적분 제어기(135, 140)의 출력값과 적분상태 예측기의 출력값($k_i\hat{q}_{ss}$)의 오차에 대한 적분 연산을 수행할 수 있다.

[0071] 구동기(150)는 선형영역 또는 포화영역으로 동작한다. 구체적으로, 구동기(150)는 비례 제어기(110), 미분 제어기(120, 125), 적분 제어기(135, 140)의 합산을 감산기(145)로부터 입력받는다.

[0072] 플랜트(160)는 제어 대상이 되는 목표로, 발열체, 모터 등의 구성일 수 있다.

[0073] 비교기(170)는 구동기(150)의 동작상태를 판단한다. 구체적으로, 비교기(170)는 구동기(150)의 입력과 구동기(150)의 출력을 비교하여 구동기(150)가 선형영역 또는 포화영역에서 동작하는지를 판단할 수 있다. 즉, 구동기(150)의 입력과 구동기(150)의 출력이 동일한 경우, 비교기(170)는 구동기(150)가 선형영역에서 동작하는 것으로 판단할 수 있으며, 구동기(150)의 입력과 구동기(150)의 출력이 상이한 경우, 포화영역에서 동작하는 것으로 판단할 수 있다. 그리고, 이와 같은 판단 결과는 스위치(130)의 제어명령으로 입력된다.

[0074] 한편, 비교기(170)는 구동기(150)의 모델 값, 즉 시뮬레이션 값을 가질 수 있다. 구체적으로, 비교기(170)는 구동기(150)의 출력을 예측하고, 예측된 구동기(150)의 출력과 구동기(150)의 입력을 비교하여, 구동기(150)가 선형영역 또는 포화영역에서 동작하는지를 판단할 수 있다.

[0075] 적분상태 초기화 루프(173)는 예측된 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 이용하여, 구동기(150)가 선형영역에 진입하기 전에 적분 제어기(135, 140)의 초기 상태가 선형영역의 적분상태 값이 되도록 한다. 구체적으로, 적분상태 초기화 루프(173)는 적분 제어기(135, 140)의 출력값을 입력받아, 적분 제어기(135, 140)에 대한 루프를 형성하고, 적분상태 예측기(180)에서 예측된 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 기초로 구동기(150)가 선형영역에 진입하기 전에 적분 제어기(135, 140)의 초기 상태가 선형영역의 적분상태 값이 되도록 할 수 있다.

[0076] 적분상태 예측기(180)는 구동기(150)가 포화영역으로 동작하면, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 예측할 수 있다. 구체적으로, 비례적분미분 제어기(100)가 포화영역에서 동작할 때 플랜트 출력 오차의 동특성은 상술한 수학식 5 및 수학식 6을 참고하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

수학식 13

[0077] $$\dot{e} = -\frac{1}{\tau}e - bv + bk_i q_{ss}$$

[0078] 여기서, 구동기(150)의 출력(v)은 포화영역에서 U_l 또는 U_h 값을 갖는바, 수학식 13을 이용하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태의 값을 다음과 같이 예측할 수 있다.

수학식 14

[0079] $$k_i\hat{q}_{ss} = \frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v$$

[0080] 여기서, $k_i\hat{q}_{ss}$는 예측된 적분 제어기(135, 140)의 출력, k_i는 적분 제어기(135, 140)의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, e는 플랜트의 출력 오차, τ는 고유 시정수, v는 플랜트의 입력이다.

[0081] 따라서, 적분상태 예측기(180)는 상술한 수학식 14를 이용하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 출력을 예측하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 예측할 수 있다. 수학식 14를 이용하는 형태의 적분상태 예측기(183, 185, 187)를 구비하는 비례적분미분 제어기(100)의 구성은 도 5에 도시되어 있다.

[0082] 한편, 제어시스템의 시정수를 고유 시정수 τ 보다 매우 빠르게 비례적분미분 제어기(100)의 이득을 선정하면 적분 제어기(135, 140)의 정상상태를 다음과 같은 식으로 근사적으로 예측할 수 있다.

수학식 15

[0083] $$k_i\widehat{q_{ss}} = \frac{\dot{e}}{b} + v$$

[0084] 따라서, 적분상태 예측기(180)는 상술한 수학식 15를 이용하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 출력을 예측하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 예측할 수도 있다. 수학식 15를 이용하는 형태의 적분상태 예측기(183, 187)를 구비하는 비례적분미분 제어기(100)의 구성은 도 6에 도시되어 있다.

[0085] 또한, 적분상태 예측기(180)는 다음의 수학식 16 및 수학식 17을 이용하여, 적분 제어기(135, 140)의 정상상태에서의 적분상태를 직접으로 예측할 수도 있다.

수학식 16

[0086] $$\widehat{q_{ss}} = \frac{1}{k_i}\left[\frac{1}{b}\dot{e} + v\right]$$

[0087] 여기서, $\widehat{q_{ss}}$는 예측된 적분 제어기(135, 140)의 값, k_i는 적분 제어기(135, 140)의 이득, $\dot{e}$는 플랜트 출력 오차의 동특성, v는 플랜트의 입력이다.

수학식 17

[0088] $$k_i\widehat{q_{ss}} = \frac{1}{b}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau}e\right) + v$$

[0089] 저역통과필터(173)는 적분상태 예측기(180)에서 사용된 미분 작용에 의한 잡음을 줄이고 급격한 변화를 방지한다. 구체적으로, 저역통과필터(173)는 파라미터 ω_i를 가질 수 있다. 파라미터 ω_i를 갖는 저역통과필터가 포함된 적분상태 초기화 동특성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 18

[0090] $$\frac{q(s)}{\widehat{q_{ss}}(s)} = \frac{1}{s/\omega_i k_i + 1}$$

[0091] 수학식 18을 참고하면, 정상상태 적분 제어기(135, 140)의 초기상태 인가시간을 파라미터 ω_i를 통해 적절히 조절할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 적분상태 예측기(180)는 오차 미분을 사용하므로 저역통과필터의 대역폭은 미분 잡음에 의해 제한된다.

[0092] 이와 같이 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기(100)는 적분 제어기(135, 140)의 정상상태 값을 예측하고, 선형영역에 진입할 때, 적분 제어기(135, 140)의 초기값을 이용하는바, 외란 또는 동작 조건에 관계없이 거의 일정한 출력 응답을 얻고, 오버슈트가 커지고 정착시간이 길어지는 등의 와인드업 현상을 방지할 수 있게 된다.

[0093] 도 7은 외란이 없는 또는 무 부하 상태에서 여러 초기조건에 따른 계단 응답에 대한 $k_p e - k_i q$ 좌표계에서의 궤적

을 나타내는 도면이다. 여기서, S1은 적분 제어기의 초기값이 다음 동작의 정상상태 값보다 작은 경우이고, S2는 비슷한 경우, S3는 큰 경우를 나타낸다.

[0094] 도 7을 참고하면, 와인드업에 대한 보상이 없는 비례적분미분 제어기의 경우 적분 제어기의 초기값이 클수록 선형영역의 경계조건을 지날 때 적분상태의 값이 정상상태의 값보다 매우 커서 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다.

[0095] 반면에, 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기의 경우, 선형영역에 진입 시 초기 조건에 관계없이 예측 값으로 시작하므로 응답이 모두 같음을 알 수 있다. 구체적으로, 본 실시예에 적용된 비례적분미분 제어기의 응답은 포화영역에서는 제한된 구동기의 최대 출력으로 거동하고 선형영역에서 거의 같은 초기값으로 구동되므로 외란 조건이 같으면 도 8a 내지 도 8c에 도시된 바와 같은 출력 응답을 나타낸다.

[0096] 도 9는 외란이 있거나, 전부하 상태에서 여러 초기조건에 따른 계단 응답에 대한 $k_p e - k_q q$ 좌표계에서의 궤적을 나타낸다. 여기서, S1은 적분 제어기의 초기값이 다음 동작의 정상상태 값보다 작은 경우, S2는 영인 경우, S3는 큰 경우를 나타낸다.

[0097] 도 9를 참고하면, 종래의 와인드업에 대한 보상이 없는 비례적분미분 제어기의 경우 적분 제어기의 초기값이 정상상태 값보다 작을지라도 구동기의 포화상태에 의해 선형영역의 경계조건을 지날 때 적분상태의 값이 정상상태의 값보다 매우 커서 무부하인 경우보다 더 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다.

[0098] 반면에 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기(100)의 경우 오히려 오버슈트가 줄어듦을 알 수 있다. 이는 포화영역에서 정상상태의 적분상태를 예측하여 선형영역에 진입 시 초기 조건으로 사용하므로 초기조건에 관계없이 예측 값으로 시작하므로 응답이 모두 같기 때문이다. 또한 무부하인 경우보다 오버슈트의 절대 크기는 작아지고, 기준 명령에 대한 상대적인 크기는 같다.

[0099] 도 10은 도 9의 조건에서 출력, 적분상태, 입력 등 응답 비교를 도시한 도면이다.

[0100] 도 10을 참고하면, 본 실시예에 따른 비례적분미분 제어기(100)는 출력이 제한되는 경우에도 부하에 관계없이 응답이 일정하게 발생함을 확인할 수 있다.

[0101] 이상에서는 본 발명의 바람직한 실시예에 대해서 도시하고, 설명하였으나, 본 발명은 상술한 특정의 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이고, 그와 같은 변경은 청구범위 기재의 범위 내에 있게 된다.

부호의 설명

[0102] 100: 비례적분미분 제어기 110: 비례 제어기

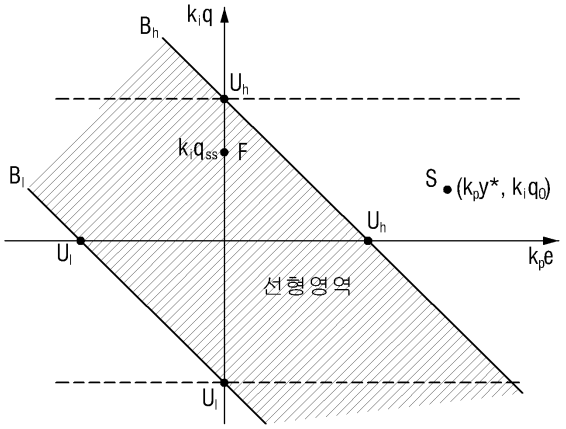
120: 미분 제어기 135: 적분 제어기

150: 구동기 160: 플랜트

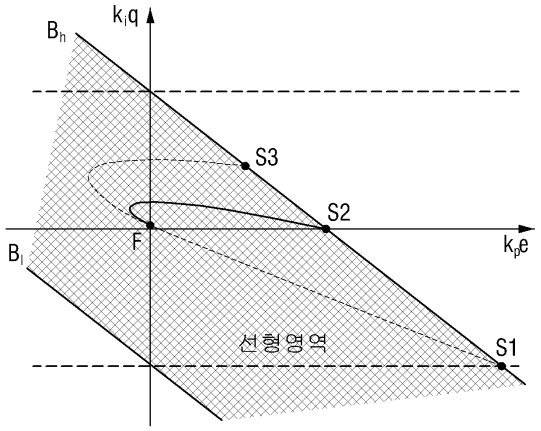
170: 비교기 180: 적분상태 예측기

도면

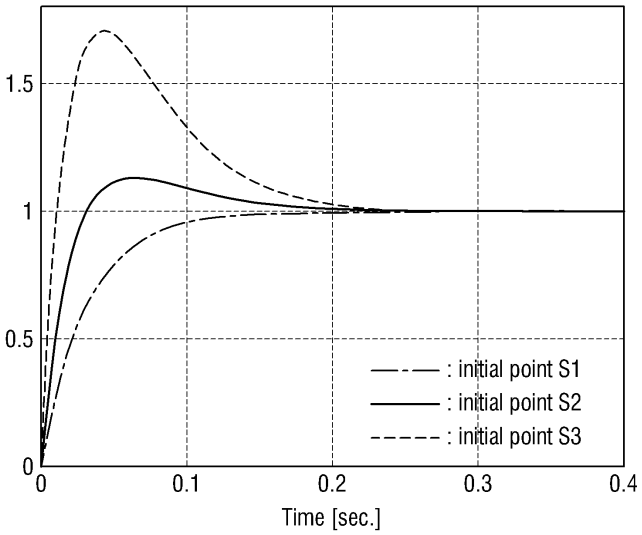
도면1



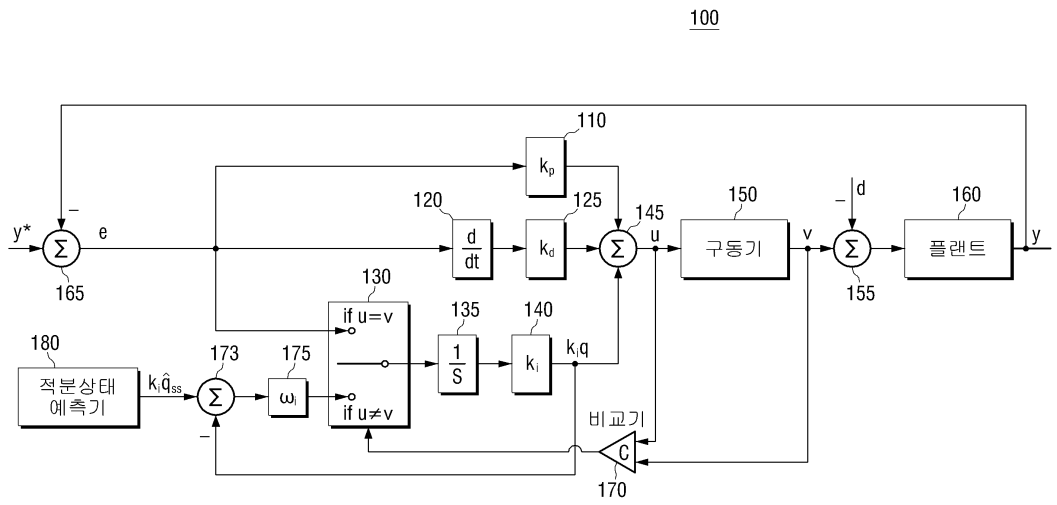
도면2



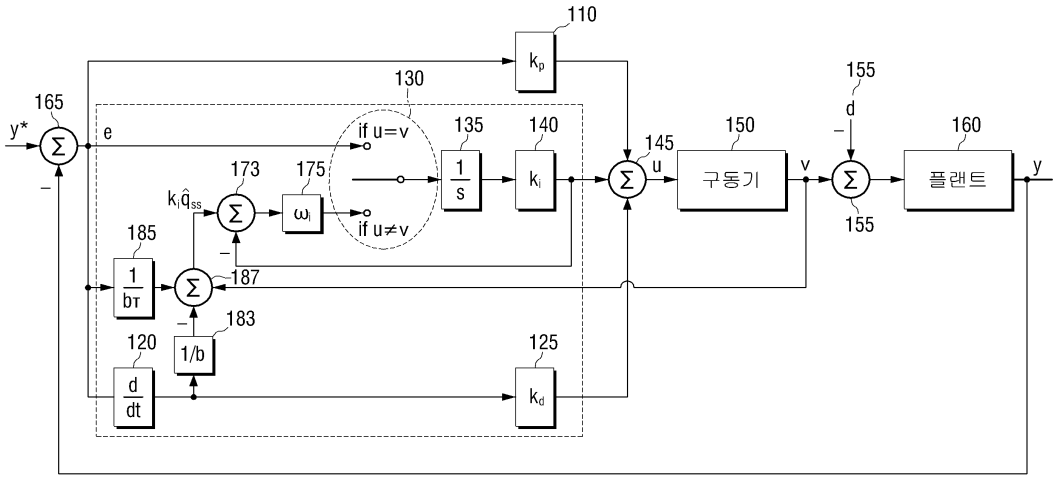
도면3



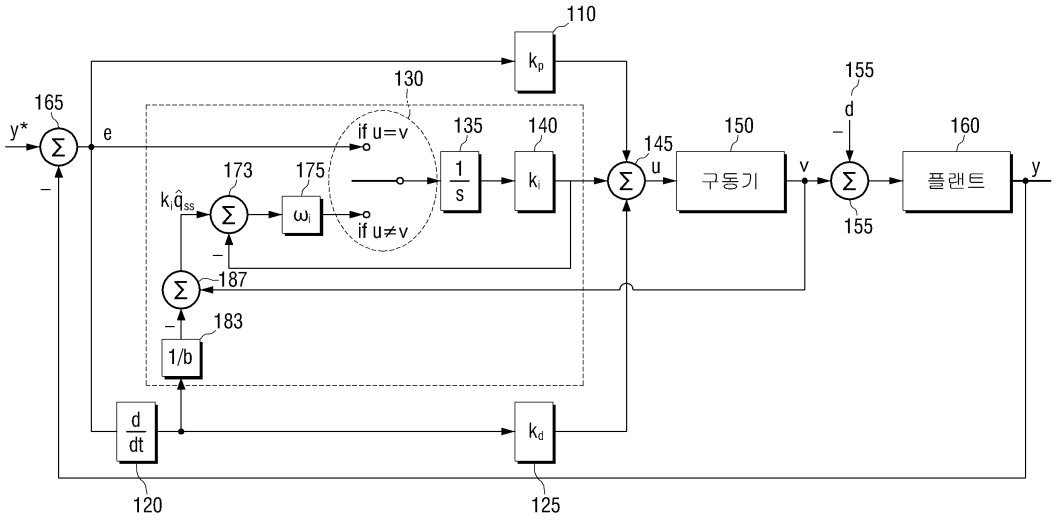
도면4


100
110
k_p
120
$\frac{d}{dt}$
125
k_d
145
u
150
구동기
v
d
160
플랜트
y
y*
e
165
155
130
if u=v
if u≠v
135
$\frac{1}{S}$
140
k_i
k_iq
180
적분상태
예측기
$k_i\hat{q}_{ss}$
173
175
ω_i
비교기
C
170

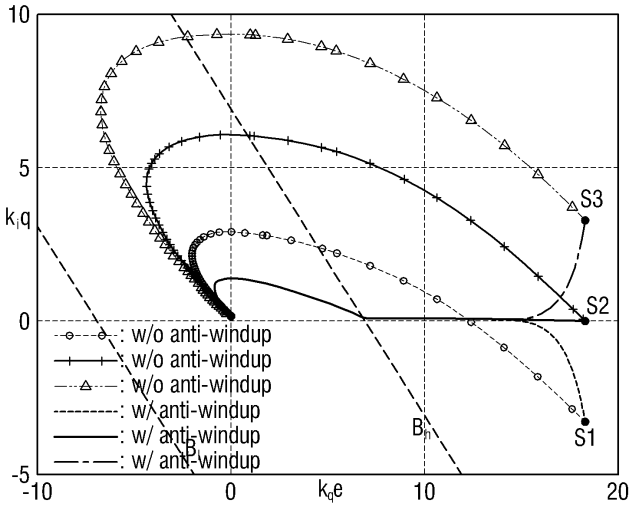
도면5


110
k_p
130
165
y*
e
if u=v
if u≠v
135
$\frac{1}{s}$
140
k_i
145
u
150
구동기
v
155
d
160
플랜트
y
173
175
$k_i\hat{q}_{ss}$
ω_i
185
$\frac{1}{b\tau}$
187
183
1/b
120
$\frac{d}{dt}$
125
k_d

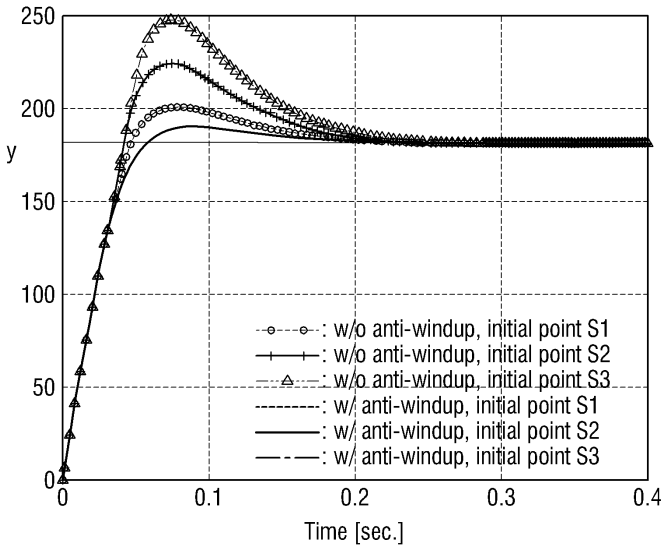
도면6


110
k_p
130
165
y*
e
if u=v
if u≠v
135
$\frac{1}{s}$
140
k_i
145
u
150
구동기
v
155
d
160
플랜트
y
173
175
$k_i\hat{q}_{ss}$
ω_i
187
183
1/b
$\frac{d}{dt}$
120
k_d
125

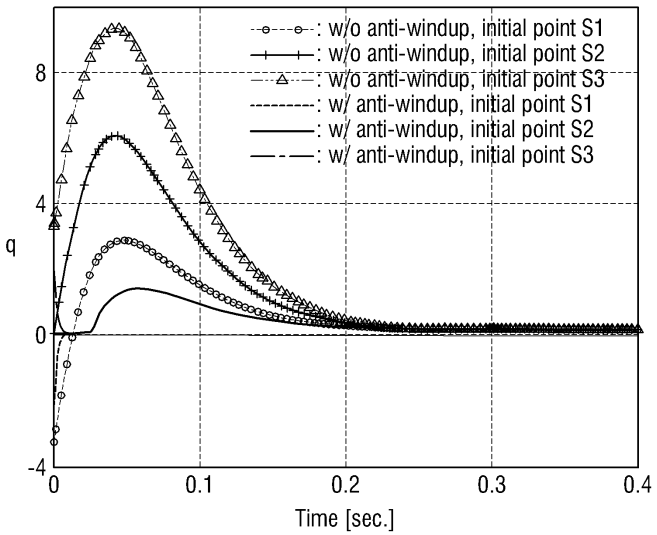
도면7


10
5
0
-5
-10
0
10
20
$k_i q$
$k_q e$
S3
S2
S1
B_h
S5
: w/o anti-windup
: w/o anti-windup
: w/o anti-windup
: w/ anti-windup
: w/ anti-windup
: w/ anti-windup

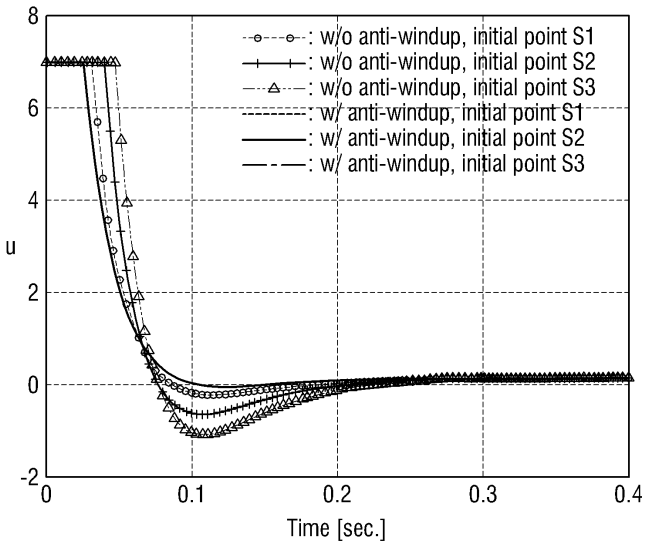
도면8a


250
200
150
100
50
0
y
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]
: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3

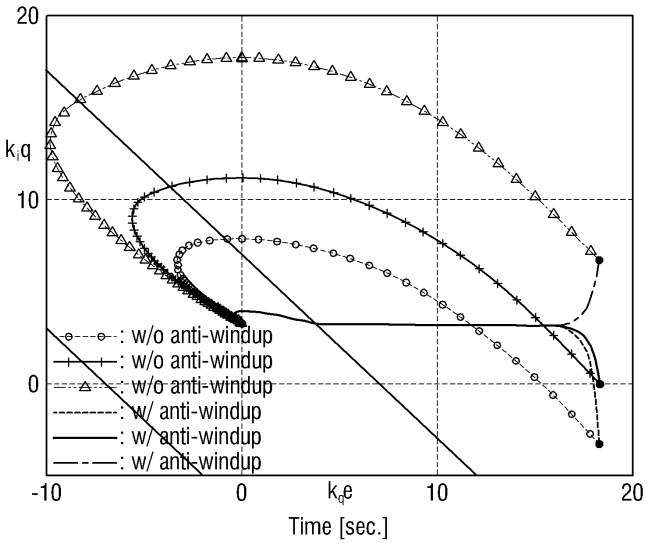
도면8b


: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3
q
8
4
0
-4
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]

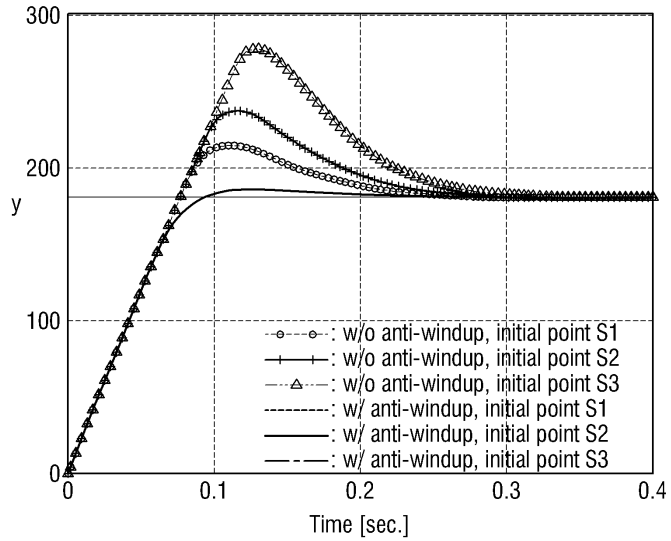
도면8c


: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3
u
8
6
4
2
0
-2
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]

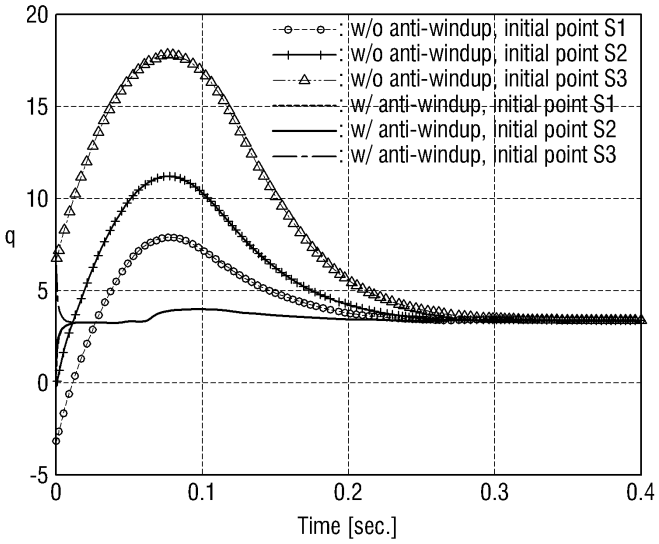
도면9


20
10
0
$k_i q$
-10
0
$k_q e$
10
20
Time [sec.]
: w/o anti-windup
: w/o anti-windup
: w/o anti-windup
: w/ anti-windup
: w/ anti-windup
: w/ anti-windup

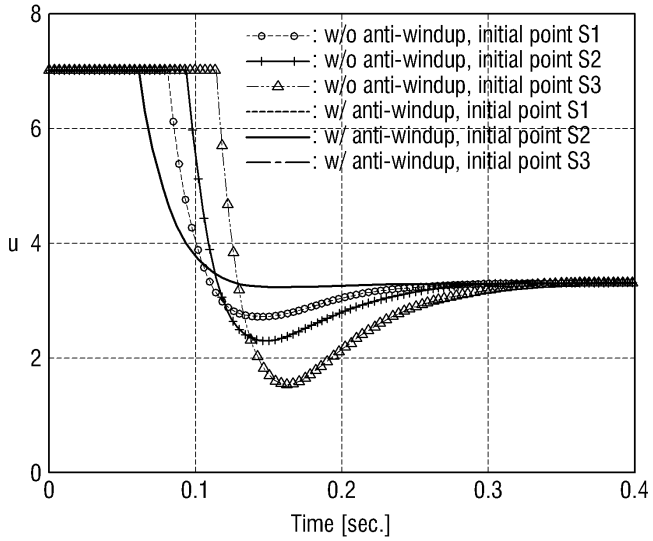
도면10a


300
200
100
0
y
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]
: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3

도면10b


20
15
10
5
0
-5
q
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]
: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3

도면10c


8
6
4
2
0
u
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Time [sec.]
: w/o anti-windup, initial point S1
: w/o anti-windup, initial point S2
: w/o anti-windup, initial point S3
: w/ anti-windup, initial point S1
: w/ anti-windup, initial point S2
: w/ anti-windup, initial point S3