

PID제어계를 위한 누적방지기법에 관한 연구

류지수 김영곤* 박태건** 이기상*
 *단국대학교 전기공학과, **충북과학대학 전자과

A Study on Anti-Windup Schemes for PID Control Systems

* Ji-Su Ryu*, Young-Gon Kim*, Tae-Geon Park** and Kee-Sang Lee*
 *Dankook University, **Chungbuk Provincial College of Science and Technology

Abstract - In this paper, the anti-windup schemes developed so far are summarized and the similarities/differences of those schemes are discussed. The anti-windup schemes are applied to a DC servomotor system with PID controller to perform comparative study and sensitivity analysis. Based on those results, some criteria for choosing anti-windup scheme are suggested. The results of this study provide a very useful guideline for selecting and designing the anti-windup scheme for various types of PID control systems.

$$u^r = \begin{cases} u_{max} & ; u > u_{max} \\ u & ; u_{min} \leq u \leq u_{max} \\ u_{min} & ; u < u_{min} \end{cases} \quad (2-2)$$

여기서 u 와 u^r 는 제어기의 출력과 실제의 공정 입력을 말한다. 입력 제한으로 인하여 실제의 공정입력은 순시적으로 제어기의 출력과 다르게 될 수 있다. 이러한 차이를 고려하지 않고 설계된 폐루프 제어기는 심각한 제어성능의 감퇴를 초래하게 되는데 이러한 성능 감퇴를 "누적현상(windup)"이라 하며, 특히 PID와 같이 적분동작을 포함한 제어기를 도입한 제어계에서 심각한 문제를 발생시킨다. 누적현상을 해결하는 가장 기본적인 방법은 당초 제어기 설계시에 입력제한을 고려하는 것이지만, 이러한 제어기의 설계는 매우 어려운 제어기 설계이론을 이용해야할 뿐만 아니라 설계된 제어기도 매우 복잡하여 실현상의 문제점이 발생할 수도 있다. 따라서 누적현상의 방지대책은 비선형성 또는 구동기 포화를 고려하지 않고 제어기를 설계한 다음 이의 실현 단계에서 누적현상을 방지하기 위한 추가적인 제한보상을 실시하는 것이며, 이를 "누적방지(anti-windup : AW)"라고 한다.

1. 서 론

PID제어기는 그 구조의 단순성에도 불구하고 목표치 추적, 외란효과와 감쇠, 프로세스와 모델 파라미터의 불일치에 대한 강인성 등 고성능제어계에 요구되는 제반 특성을 가지고 있어 산업용 공정 제어에 관한 한 첨단 제어기법보다 훨씬 더 일반적으로 채택되고 있다[1]. 그러나 PID제어기의 효과적인 적용을 위해서는 고도의 제어성능을 보장해주는 이득조정 기법, MIMO 시스템의 적용방법 및 누적현상을 제거하기 위한 보다 능률적인 기법의 개발이 필수적이다. 이중 이득조정기법은 응답의 패턴인식 기법[2], 릴레이 변환기법[1], 퍼지논리와 인공신경망을 도입한 조정기법이 다수 연구개발 되었으며[3], MIMO시스템에 적용을 위한 자동조정기법 등도 지속적으로 연구 발표되고 있다. 한편 적분동작과 구동장치의 제한으로 인해 발생하는 성능감퇴를 최소화하기 위한 대책인 누적방지기법도 이미 70년대부터 연구되어 Conditioning 기법, 상태관측자기법 등 다양한 기법이 제안되었다. 그러나 누적방지기법은 PID제어기를 상용화한 각 사의 know-how로서 기본적 기술만이 공개되었으며, 최근에서야 Hanus, Atherton 및 Astrom 등에 의해 연구결과가 알려지기 시작했다[1,4,5]. 따라서 이제까지 개발된 다양한 누적방지기법의 성능비교 및 누적방지기법의 선택기준 설정에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

3. PID 제어계를 위한 누적방지 기법

누적방지 기술은 매우 다양하며 비교적 잘 알려진 몇 가지 기법은 다음과 같다[1].

- ① 설정치 제한 및 실현가능기준입력기법
 - ② 증분형 알고리즘
 - ③ 조건부 적분
 - ④ 추적형 누적방지기법, conditioning기법, 관측자기법
- 본 논문에서는 추적형 누적방지기법, 실현가능기준입력기법, conditioning기법, 관측자기법등을 고찰하고 이 들을 직류서보를 위한 PID제어시스템에 적용한 결과를 비교 검토한다.

3.1 제한적 적분기(Limited Integrator)

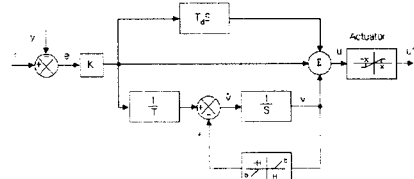


그림 3-1. 제한 적분 누적방지기구를 포함한 PID제어기.

2. PID제어계와 누적현상 문제

비례적분미분(PID)제어는 단위제어기, 직접 디지털제어 패키지의 한 부분 또는 공정용 분산 제어 시스템의 한 부분으로 매우 다양하게 사용되고 있다. 비례범위(proportional band)내에서 PID제어는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2-1)$$

여기서 $u(t)$ 는 제어기출력으로 비례적분미분제어의 합이고 e 는 제어오차 ($e=r-y$)이다. PID제어기의 파라메타는 비례이득인 K , 적분시간인 T_i 그리고 미분시간인 T_d 이다.

모든 산업공정은 입, 출력등의 중요 변수에 대한 제약조건을 가지고 있다. 예를 들어 전동기의 구동에 흔히 사용되는 전압제어기는 제한된 전압, 전류범위 내에서 동작하며, 유압제어 장치에 많이 사용되는 밸브도 허용 동작범위 내에서 동작할 뿐만 아니라 구동전동기의 특성에 따라 제한된 비율로 증가, 감소한다. 이러한 제약조건을 "공정 입력제한(plant input limitations)"이라 한다. 입력제한의 가장 일반적인 형태는 크기와 변화율에 관한 것이며 이중 입력제한은 다음으로 표현할 수 있다.

제한적 적분기법은 그림 3-1과 같이 실현될 수 있다[3]. 이 기법에서는 적분기출력을 고이득(b)을 가진 DZ(deadzone)을 통해 제한하여 적분기의 입력을 감소시킴으로서 적분치를 구동기 선형 동작영역내의 값으로 제한한다. 구동기의 선형영역 전체를 활용하기 위해서는 DZ영역이 구동기의 선형영역과 동일하도록 선택되어야 한다. 적분치가 DZ를 벗어나면 제한신호는 $f=b(v(t)-H)$ 가 되며 b 는 DZ이득, $v(t)$ 는 적분치, H 는 DZ의 범위이다. 위의 구조에서 이득(b)가 충분히 크면 적분기 출력은 H근방의 값으로 제한됨을 알 수 있다. 결과적인 PID제어기의 표현식은 다음과 같고 여기서 v 는 적분기 출력이며 기준입력을 일정치로 가정함으로써 $\dot{e} = -\dot{y}$ 를 도입하였다.

$$\dot{v} = \frac{K}{T_i} e - f \quad (3-1a)$$

$$u = v + Ke - KT_d \dot{y} \quad (3-1b)$$

$$f = \begin{cases} b(v-H), & |v| > H \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-1c)$$

3.2 추적형 누적방지법(Tracking Anti-Windup : TAW)

그림 3-2는 추적형 누적방지법기의 구조이다[1].

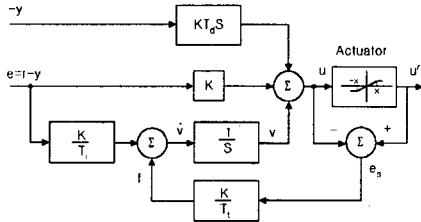


그림 3-2. 추적형누적방지기구(TAW-A)를 포함한 PID제어기

이 기법의 기본개념은 제어기 출력과 구동기 출력의 차를 제한하여 적분기의 입력을 감소시킴으로서 구동기의 포화를 방지하는 것이다. 그림 3-2의 구조(TAW-A)에서는 구동기 출력(u')을 측정하여 이를 제어기출력(u)과 비교하여 제한신호를 발생하고 이득 $1/T_i$ 를 곱해 적분기에 투입한다. 포화가 없는 경우에는 편차신호가 영이므로 제어기의 정상적인 동작에 하등의 영향을 주지 않는다. 구동기가 포화되면 영이 아닌 편차신호가 발생하여 누적방지기구가 동작하여 적분기입력을 감소시킨다. 이 경우 결과적인 PID제어기의 표현식은 다음과 같다.

$$\dot{v} = \frac{K}{T_i} e + \frac{1}{T_i} (u' - u) \quad (3-2a)$$

$$u = v + Ke - KT_d \dot{y} \quad (3-2b)$$

추적 시정수 (T_i)는 일반적으로 미분시간 (T_d)보다 크고 적분시간 (T_i)보다 작게 선정해야하며 특별한 선정기준이 없는 경우 $T_i = \sqrt{T_i T_d}$ 가 바람직하다.

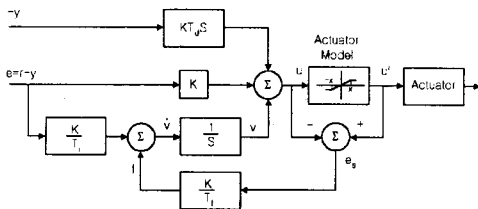


그림 3-3. 추적형누적방지기구(TAW-B)를 포함한 PID제어기

그림 3-3 (TAW-B)은 구동기 출력의 측정이 불가능하거나 측정경비가 큰 경우에 효과적인 누적방지 실현기법으로 이 구조에서는 구동기 출력을 측정하는 대신 구동기 모델을 도입하여 그 출력을 추정한 다음 제어기 출력과 구동기 출력 추정치의 차를 제한신호로 사용함으로써 그림 3-2와 동일한 누적방지 효과를 거둘 수 있다. 그림 3-3 구조의 한가지 단점은 구동기 모델이 시정수를 가진 동태방정식과 포화함수로 구성된 경우, 모델에 근거한 제어기 출력의 제한이 결국 구동기 응답 속도를 제한하여 전체 제어계의 응답속도를 저하시키는 요인이 될 수 있다는 점이다.

3.3 변화된 추적형 누적방지법(TAW/LI)

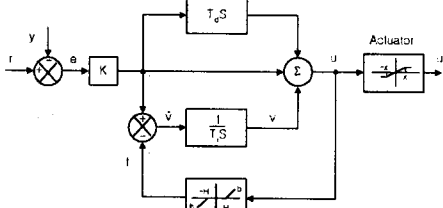


그림 3-4. 제한적분을 사용한 추적형 누적방지기구(TAW/LI)를 포함한 PID제어기

추적형 누적방지법기의 문제점을 해결하기 위한 한가지 구성은 그림 3-4 와 같이 제한적 적분기를 도입하는 것이다[4]. 제한적 적분기를 도입하면 제한 신호가 DZ를 도입한 고이득기법에 의해 발생되므로 일종의 모델에 의해 적분기 입력을 제한하면서도 구동기 입력의 제한으로 인한 구동기 응답속도의 감퇴를 방지할 수 있다. 결과적인 PID제

어기의 표현식은 다음과 같다.

$$\dot{v} = \frac{K}{T_i} e - \frac{1}{T_i} f \quad (3-3a)$$

$$u = v + Ke - KT_d \dot{y} \quad (3-3b)$$

$$f = \begin{cases} b(u-H), & |u| > H \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-3c)$$

이 구조에서 DZ의 범위 ($-H \sim H$)가 구동기의 선형동작 영역과 일치하는 경우, 추적시정수 (T_i)와 DZ이득(b)는 $b = T_i/H$ 인 관계를 가진다. 그림 3-1의 제한적 적분기 기법에서 제한신호는 적분기 출력에 근거하여 발생되는 반면 위 구조에서의 제한신호는 제어기출력에 근거하여 발생된다. 최근 C. Bohn과 D.P. Atherton은 그림 3-2, 그림 3-3등의 추적형 누적방지법기 추적시정수 (T_i) 와 DZ이득(b)의 변화에 매우 민감함을 발견하였으며 이러한 문제점을 방지하기 위해 해서 그림 3-5과 같은 변경된 추적형 누적방지 구조를 제안하였다 [4].

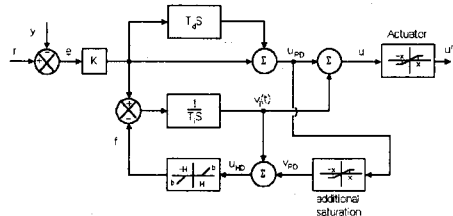


그림 3-5 제한적분과 포화모델을 도입한 추적형 누적방지기구(MTAW/LI)를 포함한 PID제어기

이 누적방지법기의 특징은 PD동작에 대한 포화모델을 도입하였다는 점이다. 이 누적방지기구를 포함한 PID제어기는 다음 식으로 실현된다.

$$u_{PD} = Ke - KT_d \dot{y} \quad (3-4a)$$

$$v_{PD} = \text{Min}(u_{PD}, H_{PD}) \quad (3-4b)$$

$$\dot{v}_i = \frac{K}{T_i} e - \frac{1}{T_i} f \quad (3-4c)$$

$$u_{HD} = v_{PD} + v_i \quad (3-4d)$$

$$f = \begin{cases} b(u_{HD}-H), & |u_{HD}| > H \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-4e)$$

이 누적방지구조에서 적분기출력은 부(negative)의 값을 갖지 않으며 따라서 DZ이득(b)를 크게 할 경우, 매우 느린 응답이 얻어지는 추적형 누적방지법기의 문제점을 피할 수 있다.

3.4 관측자형 누적방지법

이 누적방지법기는 Astrom등에 의해 제시되었다[1]. 관측자기법을 설명하기 위해 단일 입출력계를 위한 비례적분 제어기의 상태방정식 표현을 고려한다.

$$\dot{v} = \frac{K}{T_i} (w - y) = \frac{K}{T_i} e \quad (3-5a)$$

$$u = v + Ke \quad (3-5b)$$

$$u' = \text{sat}(u) \quad (3-5c)$$

여기서 v 는 적분제어기의 출력이다. $u' \neq u$ 일 때 상태의 추정을 위해 다음과 같은 추정기가 사용된다. L 은 관측자이득으로 제어기의 상태 추정치 (v_e)는 u 와 u' 의 차에 의해 결정된다.

$$\dot{v}_e = \frac{K}{T_i} e + L(u' - u) \quad (3-6a)$$

$$u = v_e + Ke \quad (3-6b)$$

$$u' = \text{sat}(u) \quad (3-6c)$$

이 누적방지법기에서 관측자이득을 $1/T_i$ 로 선정하면 관측자 기법기 추적형기법과 동일함을 알 수 있다.

3.5 실현가능 기준입력 및 conditioning제어기

Hanus는 제어기 상태변수의 적합성을 회복하기 위하여 "실현 가능한 기준입력(realizable reference signal: RRS)"을 도입하였다 [2, 5]. 이 기법은 제어기 출력과 공정입력(구동기 출력)의 차가 영로 되면 제어계의 응답이 원래의 기준입력을 추적하는 특성을 갖게 해 주는 바람직한 특성을 가진다. conditioning기법이란 제어기 상태변수의 적합성 회복을 의미한다. 여기에서는 편차 제한을 전체한 식(3-7)의 선형 시불변 제어기를 대상으로 제어기출력과 프로세스 입력간의

불일치를 제거하기 위한 실현 가능한 기준입력(RRS)와 conditioned controller(CC)의 의미와 유도과정을 설명한다.

$$\dot{v} = Av + B(w - y) \quad (3-7a)$$

$$u = Cv + D(w - y) \quad (3-7b)$$

$$u^r = saf(u) \quad (3-7c)$$

여기서 w : 기준 입력력, y : 출력변수, u : 제어기 출력

v : 제어기의 상태변수, u^r : 구동기 출력(공정입력)

RRS, 즉 w^r 은 제어기출력(u)와 공정 입력력(u^r)의 불일치로 인하여 발생하는 제어기 상태변수의 부적합성을 해소하기 위한 기준입력이다. 따라서 RRS는 w 대신 w^r 을 제어기에 투입했을 때 $u = u^r$ 이 성립되도록 선정되어야 하며 이 경우 다음 식이 성립된다.

$$\dot{v} = Av + B(w^r - y) \quad (3-8a)$$

$$u^r = Cv + D(w^r - y) \quad (3-8b)$$

D의 역 행렬의 존재를 가정하면, w^r 은 식(3-7b)와 식(3-8b)의 차에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$w^r = w + D^{-1}(u^r - u) \quad (3-9)$$

식(3-9)의 RRS를 식(3-18a)와 식(3-7b)를 이용하여 정리하면 다음의 CC가 얻어진다.

$$w^r = w + D^{-1}(u^r - u) \quad (3-10a)$$

$$\dot{v} = Av + B(w^r - y) \quad (3-10b)$$

$$u = Cv + D(w - y) \quad (3-10c)$$

식(3-10)의 Conditioned Controller에는 RRS가 별도의 식으로 삽입되어 있어 별도의 계산을 수행하여야 한다. 식(3-10)에서 w^r 을 소거하면 식(3-11)이 얻어지며 이러한 제어기 표현을 self conditioned controller(SCC)라 한다.

$$\dot{v} = (A - BD^{-1}C)v + BD^{-1}u^r \quad (3-11a)$$

$$u = Cv + D(w - y) \quad (3-11b)$$

예) 단일 입 출력계를 위한 PI제어기의 경우 :

위의 누적방지기법은 MIMO계를 대상으로 전개한 것이지만 이해를 돕기 위하여 단일 입 출력계를 위한 PI제어기를 고려한다. PI제어기는 다음의 동태방정식으로 표현된다.

$$\dot{v}(t) = K_i(w(t) - y(t)) \quad (3-12a)$$

$$u(t) = v(t) + K(w(t) - y(t)) \quad (3-12b)$$

따라서 $A=0, B=K_i, C=1, D=K$ 이다. 이들 파라미터를 대입하여 'CC'를 구성한 결과는 다음과 같다

$$CC : w^r = w + \frac{(u^r - u)}{K} \quad (3-13a)$$

$$\dot{v} = K_i(w^r - y) \quad (3-13b)$$

$$u = v + K(w - y) \quad (3-13c)$$

위식에서 w^r 을 소거하여 SCC를 구한 결과는 아래와 같다.

$$SCC \quad \dot{v} = -\frac{K_i}{K}v + \frac{K_i}{K}u^r \quad (3-14a)$$

$$u = v + K(w - y) \quad (3-14b)$$

식(3-14)에서 $K_i = K/T_i$ 이므로 위의 CC들은 3.2절에 기술한 추적형 누적방지 기법에서 추적 시정수를 $T_i = T_i$ 로 선정할 경우에 해당한다.

4. 직류서보전동기를 위한 PID제어기에의 적용

누적방지기구의 도입효과를 비교하기 위하여 속도제어용 PI제어계를 대상으로 각 누적방지기구를 도입하여 시뮬레이션 결과를 비교 검토한다. 사용된 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

$$J_m = 442 \times 10^{-6} [kg \cdot m^2] \quad B_m = 15 \times 10^{-6} [kg \cdot m^2 / sec]$$

$$R_a = 3.2 [\Omega] \quad L_a = 8.6 \times 10^{-3} [H]$$

$$K_b = 0.06 [V \cdot s / rad] \quad K_t = 17 \times 10^{-3} [N \cdot m / A]$$

제어입력은 전기자 전압(v_d)이며 정격최대 전압은 12[V]이다. 제어 출력은 각속도로 설정하며, 제어기는 비례적분형으로 선정하였다. 각 누적방지기구를 도입한 제어계의 성능은 %오버슈트, 정정시간(최종치와의 편차 0.2%이내) 및 제어기출력과 구동기출력(공정입력)의 차를 기준으로 평가하였다. 여기서 제어기출력과 공정입력의 차는 전체 제어시간 동안의 적분치이며 가장 직접적인 누적방지 효과의 평가기준으로 다음과 같이 표현된다.

$$Err_{sc} = \int_{t_0}^{t_f} |u(t) - v(t)| dt$$

우선 표 1에는 누적현상을 보이기 위하여 누적방지기구를 도입하지 않은 PI제어계의 응답특성을 정리하였으며 이로부터 제어기출력과 구동기출력의 차가 매우 크게 발생하여 누적현상을 초래함을 알 수 있다.

표 1. 누적방지기구를 도입하지 않은 PID제어계의 응답특성

K	T _i	%overshot	setting time	Err _{sc}
0.6	0.03	55	5	1224.6
0.4	0.2	37	3.57	47.507

특히 K=0.6, Ti=0.03인 경우의 제어응답은 그림 4-1에 보인 것처럼 매우 큰 오버슈트와 정정시간을 가지며 입출력이 모두 심한 채터링현상을 수반한다. 이러한 현상은 구동기의 내구성에 악영향을 끼친다. K=0.4, Ti=0.2인 경우에는 입출력 채터링이 발생하지는 않지만 누적현상으로 인하여 비교적 큰 오버슈트와 정정시간을 가진다. 그림 4-2는 전형적인 누적방지기법인 TAW-A를 도입하고 Tr=1(sec)로 선정할 경우의 응답으로 오버슈트가 2.8%, 정정시간이 1.74(sec)로 감소함을 보여준다.

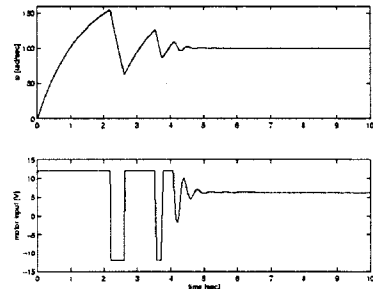


그림 4-1. K=0.6, Ti=0.03인 PID제어계의 출력응답

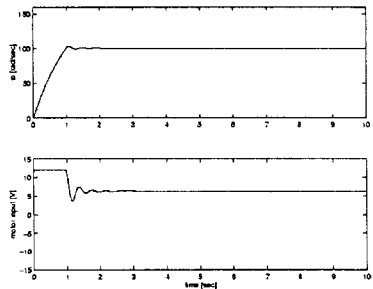


그림 4-2. 누적방지기구(LI)를 도입한 PID제어계의 출력응답

표 2는 누적방지 기구로서 제한적 적분기를 도입한 경우, H와 b의 변화에 대한 PI제어계 응답을 정리한 결과이다. 일반적으로 H의 증가는 오버슈트와 제어기출력과 공정입력의 편차의 증가를 초래하며 이득 b의 증가는 오버슈트, 정정시간 및 제어기출력과 공정입력 간의 편차를 모두 감소시켜줄 수 있다. 비교 결과는 누적방지기구의 파라미터를 H=7, b=15로 선정할 경우 %오버슈트와 Err_{sc}가 최소인 반면 정정시간은 H=12, 즉 H가 구동기제한과 일치할 때 최소로 됨을 보여준다.

표 2. LI기법에서 H와 b의 변화에 따른 비교

H	b	%overshot	setting time	Err _{sc}
7	1	28	3.26	58.78
	10	1.5	1.66	20.38
	15	1.5	1.73	17.82
12	1	30	2.53	62.08
	10	8	1.60	24.45
	15	7.5	1.38	22.03
15	1	31	2.57	64.09
	10	12	1.66	27.11
	15	11.5	1.66	24.75

표 3은 누적방지기구로서 TAW-A를 도입하고 추적시정수 값을 변화시킨 경우 제어계 응답이다. 추적시정수 0.5-5.0에서 유사한 제어응답

이 언어지며, 매우 적은 T_t 적용시 채터링입력이 발생한다. 이기법은 다양한 누적방지 기법 중 제어기출력과 구동기 출력의 편차가 가장 작으며 추적시정수의 변화에 대해 비교적 둔감하다.

표 3. TAW기법에서 T_t 변화에 따른 비교

추적시정수	%overshot	settling time	Err_{∞}
0.1	3.6	2.41	0.268
1.0	3.8	2.34	0.221
10	4	2.34	2.202
50	8	2.42	10.08

표 4는누적방지 기법으로 TAW/LI를 도입하고 H와 b를 변화시킨 결과이다. 설계 파라미터 중 H의 증가는 오버슈트와 제어기출력과 공정입력의 차를 증가시키며 이득(b)의 증가는 오버슈트와 제어기출력과 공정입력의 차를 감소시킴을 알수 있다. 비교 결과는 누적방지기구의 파라미터를 H=7, b=15로 선정할 경우 %오버슈트와 Err_{∞} 가 최소인 반면 정정시간은 H=12, b=15, 즉 H가 구동기제한과 일치할때 최소로 됨을 보여주며 이결과는 LI의 경우와 동일하다. LI기법에서의 제한정보가 적분기출력과 구동기제한의 차이인 반면 TAW/LI에서 제한 정보는 제어기출력과 구동기출력의 차이이므로 좀더 확실한 누적방지 효과를 가진다.

표 4. TAW/LI기법에서 H와 b의 변화에 따른 비교

H	b	%overshot	settling time	Err_{∞}
7	1	0.8	1.844	11.59
	10	0.4	2.96	0.48
	15	0.2	3.123	0.31
12	1	7.0	2.365	15.045
	10	4.0	2.312	1.5625
	15	3.8	2.312	1.0419
15	1	11.0	2.424	17.525
	10	7.0	2.364	4.228
	15	7.0	2.365	3.7245

누적방지기구로서 SCC와 CC를 적용한 경우에는 설계파라미터가 제어기이득에 의해 결정되므로 제어기이득의 변화하지 않는 한 동일한 응답특성을 가진다. $K=0.4$, $T_i=0.2$ (sec)일때 오버슈트는 29% 정정시간은 2.362(sec), 제어기 출력과 구동기 출력의 편차는 7%(V)로 개선된다. 표 5에는 각 누적방지기법 적용시 최대오버슈트, 정정시간, 제어기출력과 공정입력의 편차를 비교하였다.

표 5. 누적방지 기법의 성능 비교

AW scheme	%overshoot	settling time(0.2%)	Err_{∞}	비고
AW 미적용	37	3.570	47.507	$K=0.4, T_i=0.2$ (sec)
LI	7.5	2.362	22.03	H=12, b=15
TAW-OBS	3.8	2.34	0.221	$T_t=1.0$
TAW/LI	3.6	2.312	1.0419	H=12, b=15
CC, SCC	3.7	2.362	0.0468	

TAW/LI기법은 LI기법에 비해 %오버슈트가 적고 제어기 출력과 공정입력의 편차가 매우 적다. 한편 LI기법은 %오버슈트가 비교적 크지만 모든 기법 중 가장 작은 정정시간을 가진다. TAW기법, 관측자 기법, CC 및 SCC기법들은 %오버슈트가 작으며 제어기 출력과 공정입력의 편차가 적었다. 표5의 데이터 중 제한적분을 포함한 기법인 LI, TAW/LI의 성능지표들은 H=12, b=15인 경우에 대한 것이며, 표 2와 표 4는 이들 파라미터가 정정시간을 최소화함을 보여준다. 그러나 이들 파라미터는 %오버슈트와 제어기출력과 공정입력의 차(Err_{∞})의 관점에서 H=7, b=15인 경우에 뒤진다. 그럼에도 이들을 비교 대상으로 선정한 이유는 H=12가 실질적인 구동기 제한과 일치하기 때문이다. 작은 H를 도입하기 위해서는 먼저 기준입력의 달성을 보장해주는 제어입력의 최소치를 알아야 하며 이 경우에는 누적방지기구의 파라미터를 적용방식으로 조정하는 적응형 누적방지기구의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 누적방지기법의 특성비교 및 선정시 고려 사항

5.1 각 누적방지기법간의 특성비교

TAW-A, TAW-B, TAW/LI 및 MTAW/LI는 모두 추적형누적방지 기법에 속한다. 그림 3.2의 추적형누적방지기법은 기본형으로 제어기출력과 구동기출력의 차를 제한시킨다. 그림 3-3의 TAW-B는 구동기 출력의 측정이 불가능하거나 측정정비가 큰 경우에 효과적인 실현기법으로 이 구조에서는 구동기 출력을 측정하는 대신 구동기 모델을 도입하여 그 출력을 추정한 다음 제어기 출력과 구동기 출력 추정치의 차를 제한신호로 사용함으로써 기본형과 동일한 누적방지 효과를 거둘 수 있다. 그림 3-3 구조의 중요한 단점은 구동기 모델이 시정수를 가

진 동태방정식과 포화함수로 구성된 경우, 모델에 근거한 제어기 출력의 제한이 구동기 응답속도를 제한함으로써 전체 제어계의 응답속도를 저하시킬 수도 있다는 점이다. TAW/LI 및 MTAW/LI는 정확한 구동기 모델을 도입하는 대신 구동기출력의 제한치를 설계파라미터로 갖는 고이득 DeadZone모델을 도입함으로써 구동기출력을 측정하지 않고도 바람직한 누적방지 효과를 얻을 수 있는 구조이다. 또한 MIMO계에 적용가능한 CC와 SCC는 PID제어계의 경우, TAW-A기법에서 추적시정수를 $T_t = T_t$ 로 선정한 경우에 해당하므로 TAW-A기법과 유사한 특성을 갖지만 파라미터의 선택성이 없다는 문제점을 가진다. 관측자형기법도 관측자이득을 $1/T_t$ 로 선정하면 TAW-A와 동일함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 다룬 8가지 누적방지기법 중 TAW-A, TAW-B, SCC, CC, 관측자형 등의 5가지는 선형파라미터를 가진 TAW로 분류할 수 있으며, 제어계에의 도입효과도 유사하다. Deadzone을 포함시킨 LI, TAW/LI 및 MTAW/LI는 모두 구동기 출력의 측정 및 구동기모델이 요구되지 않으며 대략적인 구동기 출력 제한에 대한 정보만으로 설계 및 실현이 가능한 뿐 아니라 설계파라미터의 선택에 따라 선형파라미터를 가진 누적방지기법으로는 달성할 수 없는 누적방지효과를 얻을 수 있다.

5.2 누적방지기법 선정시 고려사항

본 절에서는 이미 기술한 누적방지기법의 개념과, 실현에 필요한 정보 및 설계의 융통성 등을 비교 고찰한다. 각 기법은 제한정보, 설계시 필요정보, 설계 파라미터의 선택성 등에 의해 구분될 수 있다.

(1) 제한정보에 의한 분류

적분기 출력과 구동기 제한의 차: LI

구동기출력과 제어기 출력의 차: TAW-A, 관측자, CC

구동기 모델출력과 제어기 출력의 차: TAW-B

구동기 제한과 제어기 출력의 차: TAW/LI, MTAW/LI

구동기 출력: SCC

(2) 설계 및 실현시 필요정보(제어기 외부)

구동기 제한: LI, TAW/LI, MTAW/LI

구동기 출력의 추정치: TAW-A, OBS, CC, SCC

구동기 출력의 추정치: TAW-B

구동기 모델: TAW-B

(3) 설계 파라미터의 선택성

PID제어기 이득에 의해 모든 파라미터가 결정됨: SCC, CC

단일 가변 파라미터: TAW-A, TAW-B, OBS

두개 이상의 가변 파라미터: LI, TAW/LI, MTAW/LI

(4) 제한신호의 용도

적분기 입력의 제한: 모든 TAW기법, LI, OBS

기준입력의 제한: CC, SCC

6. 결 론

본 논문의 성능 검토에서는 구동기 출력제한만을 고려하고 출력변화의 제한은 고려하지 않았다. 따라서 구동기의 출력변화를 제한 및 구동기 이득의 변화등을 고려한 성능비교 및 설계에 관한 연구를 진행할 예정이다. 본 논문에서는 동작 범위와 동작 속도가 제한된 구동기를 포함한 PID제어계의 성능개선에 필수적인 요소인 누적방지기법을 다루었다. 현재까지 제안 개발된 누적방지기법들을 종합적으로 기술하고 각 기법의 유사성과 차이점등을 구체적으로 고찰하였으며 누적방지효과를 위한 새로운 성능지표를 제안하였다. 각 기법을 직류전동기 제어시스템에 적용하여 누적방지기구의 파라미터 변화에 따른 제어계의 성능변화를 비교분석함으로써 누적방지기구의 선정, 설계파라미터 결정, 실현방법 등의 선정을 위한 중요정보와 기준을 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Astrom and T. Hagglund, PID controllers : Theory, Design and Tuning, 2nd Ed., Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1996.
- [2] R. Hanus et.al., "Conditioning technique, A general anti-windup and bumpless transfer method," Automatica, Vol. 23, No. 6, pp.729-739. 1987.
- [3] K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy control, Addison-Wesley, 1998
- [4] C. Bohn and D.P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," IEEE Control Systems, April, pp. 34-40., 1995.
- [5] Y. Peng, D. Vrancic and R. Hanus, "Anti-windup, Bumpless and Conditioned transfer techniques for PID controllers," IEEE Control Systems, August pp. 48-56, 1996.