

직류 전동기 구동을 위한 PI 제어기의 Anti-Windup

이지명*, 이기도, 이동춘
 영남대학교 전기 전자 공학부

Anti-Windup of PI Controller for DC Mortor Drives

G-Myoung Lee*, Gi-Do Lee, Dong-Choon Lee

School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University

Abstract - This paper presents anti-windup to compensate the integrator windup of the current and the speed PI controller of DC motor, which suppress the overshoot of transient response without delay of rising time. The simulation results using Simulink show the validity of anti-windup methods.

1. 서론

DC 전동기의 고성능 운전을 위해서는 속도 제어기와 전류 제어기가 요구된다. 이때 비교적 속응성이 좋으며, 구성이 간단한 PI제어기를 많이 사용한다. 또한 PI제어기는 적분항을 포함하고 있으므로 단위 계단 입력에 대해 정상편차를 '0'으로 보장할 수 있다. 그러나, 제어기 출력을 제한하기 위해 제어기 출력에 제한치가 포함될 경우, 과도상태시 제어기가 포화된다. 따라서, 오차를 적분하는 적분기 항이 매우 커지면 와인드업(Windup)현상이 발생하고, 제어기 출력에 오버슈트가 발생한다. 또한, 제어편차의 부호를 반대로 바꾸는데 많은 시간이 걸리게 되어 적분기가 정상상태에 도달하는 시간이 길어진다.

이러한 현상을 막기 위해 적분기 입력을 제한하는 것을 안티 와인드업(Anti-windup)기법이라 한다. 제어신호의 조건에 따라 적분기 동작을 온/오프하는 조건부(Conditioning) 안티와인드업 기법[1]와 적분기 출력이나 제어기 출력을 불감대(Dead zone)나 이득을 통하여 적분기 입력으로 제한하는 방법 등을 이용하고 있다[2][3].

2. Anti-windup 기법

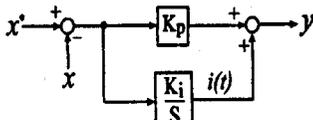


그림 1. PI제어기.

그림 1은 와인드업 현상을 일으킬 수 있는 일반적인 PI제어기를 보이고 있다. 제어기 출력 단에 비선형 요소인 제한기(Limiter)를 설치할 경우 대부분의 PI 시스템은 제어기 포화가 발생하여 제어기 제한값 x 에 관계없이 제어기 출력값 y 는 일정한 값에 머무르게 된다.

2.1 리미팅(Limitation) 기법

적분기 출력 값을 이득이 큰 불감대를 통해 적분기 입력으로 제한하여 적분기의 입력을 제한하는 방법이다. 액츄에이터(Actuator)의 선형영역을 보장하기 위해 불감대의 영역(H')이 액츄에이터의 선형영역과 같도록 하면 제어기 출력을 선형영역

으로 제한하는 역할을 수행할 수 있다. 이 기법에서 적분기 입력으로 제한되는 값은

$$b(t) = a [i(t) - H] \tag{1}$$

이 된다. 이 값이 적분기 출력을 제어기의 선형영역으로 한정한다. 그러나 이 방법은 제어기의 전체 출력 값에 대한 고려없이, 단순히 적분기의 와인드업 현상의 억제만을 고려하였으므로 상승시간(Rising time)이 빠른 시스템의 경우 오버슈트를 야기할 수 있다.

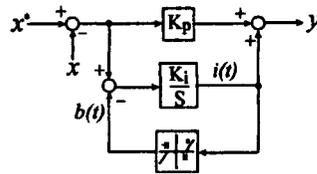


그림 2.리미팅 안티와인드업 기법

2.2 Tracking 기법

리미팅 기법의 단점을 보완하기 위해 제어기 출력 값을 추적(Tracking)하여 그 값을 적분기 입력으로 제한하는 기법이다.

2.2.1 Tracking 기법 1

제어기 출력이 액츄에이터 제한을 초과하면, 제어기 출력 값과 실제로 프로세스에 인가되는 신호의 차이가 추적시정수(Tracking time constant) T_t 로 제한된 값이 적분기 입력으로 제한된다.

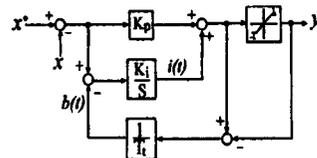


그림 3. Tracking 기법 1.

그러나, 제어기 출력을 제한하면 제어기의 일관성이 결여되고, 제어기의 출력이 포화되는 결과를 야기하여 액츄에이터의 반응속도가 제한된다[1]. 이 기법은 제어기 출력을 제한할 필요가 있는 시스템에 많이 사용되는 기법이다.

2.2.2 Tracking 기법 2

이 기법은 Tracking 기법 1에서 발생하는 제어기의 일관성 문제를 보완하기 위하여 제어기 출력 리미트를 제거한 안티와인드업 시스템이다. 제한되지 않은 제어기 출력 값이 프로세스

에 적용되고 이 신호가 불감대를 거쳐 적분기 입력에 제환되므로 제어기의 일관성 문제가 해결된다. 여기서 불감대의 이득은 $a = T_i/T_i$ 로 설계된다.

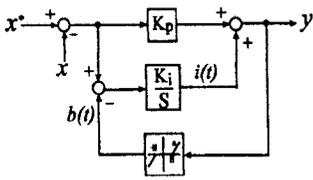


그림 4. Tracking 기법 2.

2.2.3 Tracking 기법 3

Tracking 기법 1과 2의 단점은 제어기가 T_i 나 a 값에 민감하게 반응한다는 점이다. 만약 오버슈트를 작게 하기 위하여 a 를 너무 크게 설계하면, 제환 신호가 커지게 되고 적분기가 부의 값을 가지게 된다. 시간이 증가하면 비례부분의 값은 감소하나 적분기 출력은 이 감소를 보상할 만큼 충분히 증가하지 못해 반응속도가 느려진다. 이것을 피하기 위해 비례항 부분(PID 제어기의 경우 미분항 까지 포함)에 추가적인 제한을 도입한다. 이렇게 하면 a 를 큰 값으로 하여도 반응속도가 느려지지 않는다. 이 기법에서의 적분기 제환 신호는

$$b(t) = a [i(t) + \min(H_p, V_p) - H'] \quad (3)$$

이 된다. 즉 $i(t)$ 는 $H' - V_p$ 와 $H' - H_p$ 사이로 제한됨을 의미한다. $H_p/H' = 0.5 \sim 1.5$ 에서 선택하여 사용한다. 이 비가 작으면 반응 속도는 빨라지고 오버슈트는 커지며, 이 비가 커지면 반대 현상이 일어난다. 또, 이 비가 '0'이면 순수 적분제어기를 의미한다[2][3].

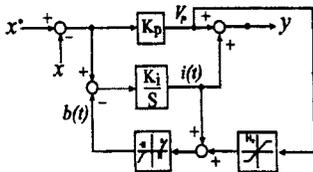


그림 5. Tracking 기법 3.

3. DC 전동기 제어 시스템

3.1 전류제어기

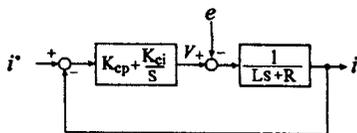


그림 6. DC 전동기의 PI 전류제어기.

그림 6은 DC 전동기의 PI 전류제어기의 블럭선도를 나타낸다. 여기서 L 은 DC 전동기의 전기자 인덕턴스이고 R 은 전기자 저항이다. K_{cp} 는 전류제어기의 비례이득이고, K_{ci} 는 적분이득을 나타낸다. e 는 속도 항에 비례하는 역기전력 성분이다. 출력전류와 전류지령치와의 관계는

$$I(s) = \frac{\frac{K_{cp}}{L}s + \frac{K_{ci}}{L}}{s^2 + \frac{K_{cp} + R}{L}s + \frac{K_{ci}}{L}} I^*(s) \quad (4)$$

와 같다. 제어기의 비례 이득과 적분 이득은 다음과 같다[4]

$$K_{cp} = L\omega_c$$

$$K_{ci} = R\omega_c \quad (5)$$

여기서, ω_c 는 전류제어기의 교차각 주파수

3.2 속도 제어기

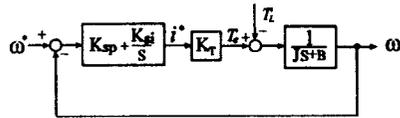


그림 7. DC 전동기의 PI 속도제어기.

그림 7은 DC 전동기의 PI 속도제어기의 블럭선도를 나타낸다. 여기서 J 은 DC 전동기의 관성능률이고 B 는 마찰계수이다. K_{sp} 는 속도제어기의 비례이득이고, K_{si} 는 적분이득을 나타낸다. 속도제어기의 출력은 DC 전동기의 전기자 전류 지령치 i^* 가 된다. K_T 는 토크상수이며, T_L 은 기계적 부하인 부하토크를 나타낸다. 출력속도와 속도지령치의 관계는

$$\omega(s) = \frac{K_T K_{sp} + K_{si} K_T}{J s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} \omega^*(s) \quad (6)$$

제어기의 비례 이득과 적분 이득은 다음과 같다[4].

$$K_{si} = J K_T \omega_n^2$$

$$K_{sp} = 2\xi \omega_n J / K_T \quad (7)$$

여기서, ω_n 는 속도제어기의 교차각 주파수

3.3 전체 시스템

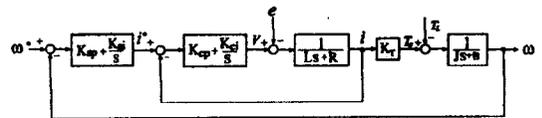


그림 8. 전체 시스템 블럭선도.

그림 8은 시뮬레이션 대상인 DC 모터의 전류 및 속도 제어기의 전체 시스템을 나타낸다. DC 모터의 파라미터는 다음과 같다.
 정격용량 1.5[kw]
 정격전압 115[V]
 정격전류 13[A]
 정격토크 5.85[N.m]
 정격속도 1750[rpm]
 전기자 저항 $R=2.5[\Omega]$
 전기자 인덕턴스 $L=0.017[H]$
 관성능률 $J=[N \cdot m \cdot sec^2/rad]$
 마찰계수 $B=0.012[N \cdot m \cdot sec/rad]$

4. 시뮬레이션

안티와인드업의 효과를 관찰하기 위하여 DC 전동기에 순수 PI 제어기(No Anti-windup)와 Tracking 기법 1과 3을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9는 무부하시 $t=5[\text{sec}]$ 에서 속도 지령치를 500[rpm]에서 1000[rpm]으로 스텝 변화 하였을 때의 속도응답을 보여주고 있다. 안티와인드업을 적용하지 않은 PI 제어기의 경우 오버슈트가 발생하지만 Tracking 기법으로 안티와인드업을 적용한 시스템의 경우 상승시간의 지연없이 과도응답의 오버슈트가 제거되었음을 보여준다. 1번 기법은 제어기 출력에 제한치가 존재하므로 제어기출력에 포화가 나타나 3번의 기법보다 상승시간이 크다. 이때의 전류응답을 그림 10으로 나타내었다. 안티와인드업을 적용하지 않은 PI 제어기의 경우 오버슈트와 언더슈트 모두 크게 나타난다. Tracking 3을 적용한 경우 오버슈트가 감소하고 언더슈트는 완전히 제거되었음을 보여 준다. 1번 기법은 제어기 출력에 제한치 인 리미터가 존재하므로 전류가 리미터의 상한치로 유지되는 구간이 존재한다. 그림 11은 1000[rpm]으로 운전되고 있는 시스템에 $t=10[\text{sec}]$ 에서 전부하를 인가했을 때의 속도의 응답특성을 보여준다. 안티와인드업을 적용하지 않은 PI 제어기의 경우 오버슈트와 언더슈트가 크게 발생하지만, Tracking 기법으로 안티와인드업을 적용한 경우 상승시간의 지연없이 과도응답의 오버슈트가 제거되었음을 보여준다. 이때의 전류 응답특성을 그림 12에서 보여준다. 그림 9에서 보여진 것과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

PI 제어기에서의 적분기 와인드업 현상을 해석하고, 이 현상

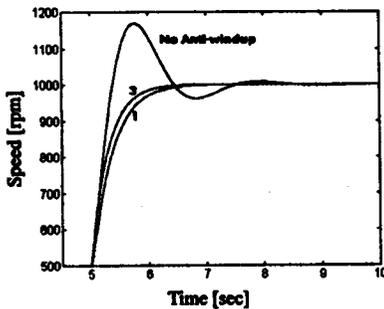


그림 9. 속도응답 특성(500[rpm] → 1000[rpm]).

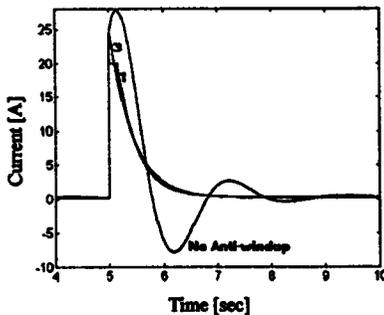


그림 10. 전류응답 특성(500[rpm] → 1000[rpm]).

을 제거하기 위한 안티와인드업의 기법들을 소개하였다. 제시한 방법을 DC 전동기 속도및 전류 PI 제어기에 적용하였을 때 전류 및 속도의 과도응답에서 상승시간의 지연없이 오버슈트가 크게 감소함을 보였다. 또한, Tracking 기법 중에서 제어기 출력에 제한치가 없는 시스템이 더 좋은 응답특성을 나타내었다. 차후에 인버터 구동 유도전동기의 PI 전류제어기에 안티와인드업 제어를 확장할 예정이다.

참고문헌

- [1]K. S. Walgma and J. sternby, "Generalisation of Conditioning Technique for Anti-Windup Compensator," *IEE Proceeding-D*, vol. 139, no. 2, pp. 109~118, March, 1992.
- [2]C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 34~40, 1995.
- [3]A. H. Galtfelder and W. Schaufelberger, "Start-up Performance of Different PI Anti-Windup Regulators," *Int. J. Control*, vol. 44, no. 2, pp. 493~505, 1986.
- [4]杉本英彦, 玉井伸三, 小山正人 著, "ACサ-ボシステムの理論と設計の実際", 綜合電子出版社.

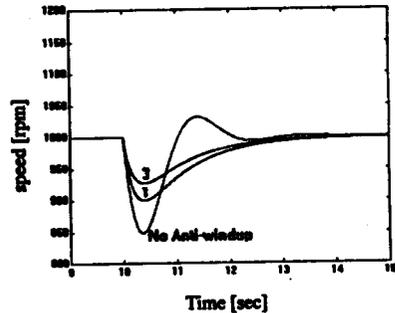


그림 11. 속도응답 특성 (무부하 → 전부하).

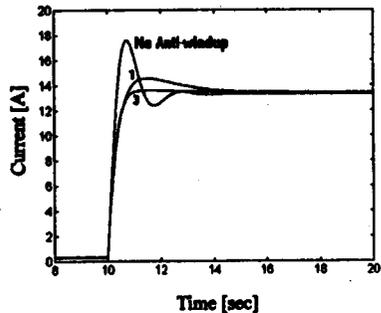


그림 12. 전류응답 특성 (무부하 → 전부하).