

오버슈트 없는 PI 제어기의 Anti-Windup 기법

윤원일, 최종우, 김흥근
경북대학교

Anti-Windup Strategy of PI Controller without Overshoot

Won-Eel Yun, Jong-Woo Choi, Heung-Geun Kim
Kyungpook National University

ABSTRACT

Most realistic control systems contain nonlinearities of some form. One nonlinearity commonly found in control systems is a saturating element. If integral control is applied to such a system to eliminate steady state error, an undesired side effect known as integrator windup may occur when large setpoint changes are made. This effect leads to a characteristic step response with a large overshoot and a very high settling time. To avoid this situation, many different anti-windup strategies have been suggested. But existing strategies remain over shoot and high settling time. This paper proposes a new anti-windup strategy for PI speed controllers. When the speed control system is changed P controller to PI controller. Integrator has an appropriate initial value. This value restricts over shoot and high settling time.

The SIMULINK/MATLAB-based comparative simulation results and experiment results of speed controller have shown its superior control performance to that of a proposed anti-windup speed controller.

1. 서론

산업의 많은 분야에서 주동력원은 전동기 시스템이다. 근래에는 생산 제품의 품질과 산업 생산성 향상을 위해 급가감속 및 정밀 속도제어가 요구되고 있다. 이러한 속도제어분야의 속도제어기는 현재까지 고전적인 PI형태의 제어기가 많이 사용된다. PI 제어기는 쉬운 구현성에 비해 양호한 성능을 보이지만 적분기 포화에 의한 누적(windup)현상에 의해서 오버슈트 및 느린 응답 시간을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에 반와인드업에 대해 수많은 연구가 이루어 졌다. 기존의 반와인드업

은 제어 입력이 포화되었을 경우 적분기에서 누적된 값을 빼주는 방법과 특정조건이 만족될 경우 적분기 동작을 온 또는 오프 하는 방법으로 나눌 수 있다. 하지만 응답속도가 지연되거나 응답에 오버슈트가 생기는 것은 아직 남아 있다. 본 논문은 산업용 전동기 시스템의 속도제어기에서 계단(Step) 입력에 대한 속도의 오버슈트를 억제하는 새로운 방식의 반와인드업 기법을 제안한다. 비례(P)제어기에서 비례적분(PI)제어기로의 전환 시점에 적분기가 적절한 초기값을 가지게 하여 오버슈트를 상쇄 시키고 빠른 응답 시간을 가지게 하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인하고 기존의 반와인드업 기법과 비교하여 그 우수성을 검증하였다.^[1~3]

2. 본론

2.1 기존의 적분기 반와인드업 기법^{[1][3]}

2.1.1 조건 적분(Conditional Integration)기법

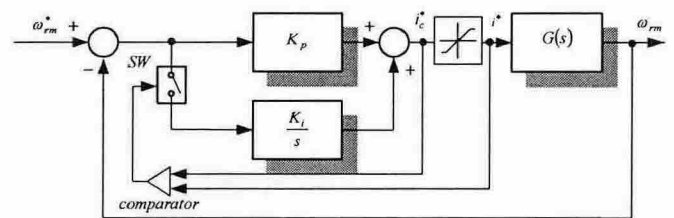


그림 1 조건 적분 기법의 블록도
Fig. 1 Conditional Integration strategy

조건 적분 기법은 그림 1과 같이 제어 입력이 제한기에 의해 제한이 되기 시작하면($i_c^* \neq i^*$) SW가 오프되어 비례제어를 하다가 제한이 끝나면($i_c^* = i^*$)이면 SW가 온 되어 비례 적분제어를 실행하게 된다. 여기서 $G(s)$ 는 전류제어기와 기계시스템의 전달함수이다.

2.1.2 트래킹 반와인드업(Tracking Anti-windup)기법^[2]

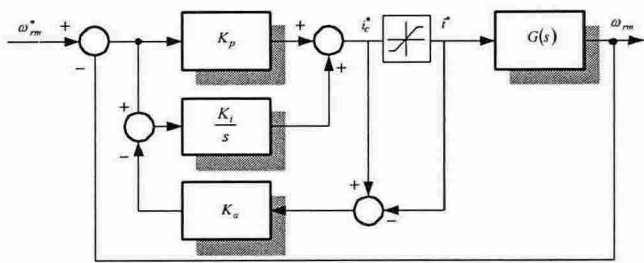


그림 2 트래킹 반와인드업 기법의 블록도
Fig. 2 Tracking Anti-windup strategy

트래킹 반와인드업 기법의 구성은 그림 2와 같이 표현된다. 제어기 출력이 구동기 제한을 초과하면 피드백 신호가 제한된 값과 제한되지 않은 값의 차에 의해 발생되어 적분기 입력을 감소시킨다.

2.1.3 제한적분(Limit integration)기법^[2]

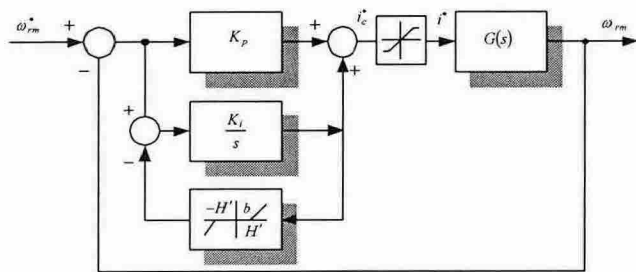


그림 3 제한적분 기법의 블록도
Fig. 3 Limit integration strategy

제한적분 기법의 구성은 그림 3과 같이 표현된다. 데드존(Dead Zone)을 통하여 적분기 피드백 신호가 만들어져 적분기 입력을 감소시킨다.

2.2 제안된 반와인드업 기법

2.2.1 비례제어기 모드

제안된 반와인드업 기법은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 속도지령 ω_{rm}^* 에 대해 제한기에 의해 포화(Saturation)가 계속되는 순간까지 SW1이 오프하여 비례 제어를 하다가 포화가 끝나는 순간 SW1을 온하여 비례적분제어로 전환한다. 비례제어 모드가 시작되는 시점의 적분 값을 $i_{i_TL}^*$ 이라고 하고 비례 제어모드가 시작하기 전 비례제어모드에서 부하토크가 적절히 적분기에 의해 보상되었다고 하면

$$i_{i_TL}^* = \frac{T_L}{K_f} \quad (1)$$

이 된다. 식(1)에서 마찰에 의한 영향은 부하토크에

포함하였다. 비례제어 모드에서는 SW2가 온되어 적분기의 출력 값을 초기값 $i_{i_TL}^*$ 에서 적정값 i_{io}^* 로 변경한다. 적분기출력의 갑작스런 변화를 방지하기 위하여 그림 4와 같이 저역통과 필터(LPF, Low Pass Filter)를 사용하였다. LPF의 시정수가 충분히 크다면 비례적분 제어모드로 전환될 경우 적분기의 초기값은 i_{io}^* 가 된다. 그림 5는 계단입력에 대한 속도응답 및 적분기 출력 값의 변화를 나타내었다.

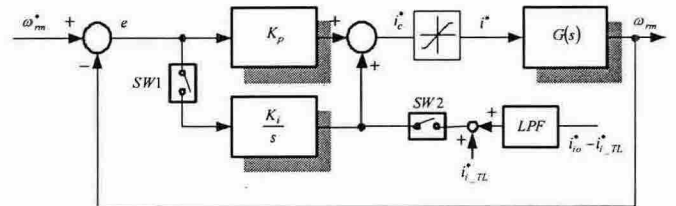


그림 4 제안된 적분기 반와인드업 블록도
Fig. 4 Proposed Anti-windup strategy

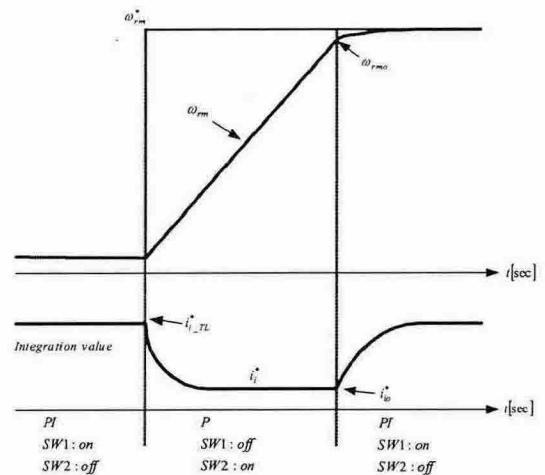


그림 5 계단입력에 대한 속도응답 및 적분기 출력값의 변화
Fig. 5 Speed response and integration value

2.2.2 비례적분제어모드

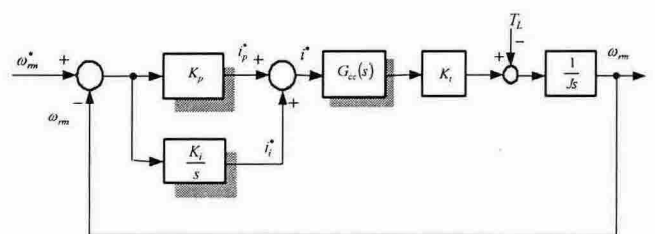


그림 6 비례적분 제어기로 동작할 때의 블록도
Fig. 6 Proposed Anti-windup strategy with PI controller

그림 6은 비례적분제어 모드로 동작할 때의 제어블록도이다. $G_{cc}(s)$ 는 전류제어기를 표현하며 이상적($G_{cc}(s)=1$)으로 가정한다. 비례적분 제어 모드로 전환된

시점에서 속도 ω_{rm} 의 초기값을 ω_{rmo} 로, 적분기 출력값 i_i^* 의 초기값을 i_{io}^* 로 표현한다. 비례적분 제어 모드로 전환 될 때의 속도 초기값은

$$K_p \cdot (\omega_{rm}^* - \omega_{rmo}) + i_{io}^* = \pm(I_{max}) \quad (2)$$

의 관계를 가진다. 여기서 양의 방향으로 포화될 경우, 부호는 '+'를, 음의 방향으로 포화될 경우 부호는 '-'를 취한다. 상태의 초기값을 고려하여 폐루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\omega_{rm}(s) = \frac{K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t}{Js^2 + K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t} \cdot \omega_{rm}^*(s) + \frac{K_i \cdot i_{io}^*}{Js^2 + K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t} + \frac{Js}{Js^2 + K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t} \cdot \omega_{rmo} - \frac{s}{Js^2 + K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t} \cdot T_L(s) \quad (3)$$

여기서 속도지령 ω_{rm}^* 와 부하토크 T_L 이 충분히 느리게 변화한다고 가정하면

$$\omega_{rm}^*(s) = \frac{\omega_{rm}^*}{s} \quad (4)$$

$$T_L(s) = \frac{T_L}{s} \quad (5)$$

로 표현 할 수 있다.

비례적분제어 모드에서의 적분기 초기값 i_{io}^* 를

$$i_{io}^* = -K \cdot (\omega_{rm}^* - \omega_{rmo}) + i_{i_TL}^* \quad (6)$$

로 설정한다면 식(5)를 식(3)에 대입하고 식(1)을 이용하면 다음 식을 유도 할 수 있다.

$$\omega_{rm}(s) - \frac{\omega_{rmo}}{s} = \frac{(K_p \cdot K_t - K \cdot K_t)s + K_i \cdot K_t}{Js^2 + K_p \cdot K_t s + K_i \cdot K_t} \cdot \left(\omega_{rm}^*(s) - \frac{\omega_{rmo}}{s} \right) \quad (7)$$

식(6)은 비례제어 모드에서 속도지령에 대한 속도의 응답 특성을 표현하는 것으로 이득 K 를 조절하면 전달함수의 영점(Zero)를 조정하여 응답성을 바꿀 수 있다는 것을 의미한다. 여기서 적분기 출력의 초기값은 식(2)와 식(6)을 이용하면

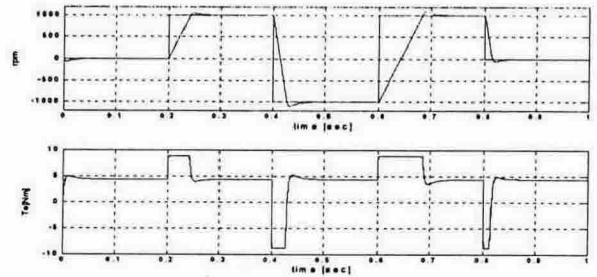
$$i_{io}^* = \frac{K \cdot (\pm I_{max} - i_{i_TL}^*)}{K - K_p} + i_{i_TL}^* \quad (8)$$

식(8)과 같이 표현 될 수 있다.

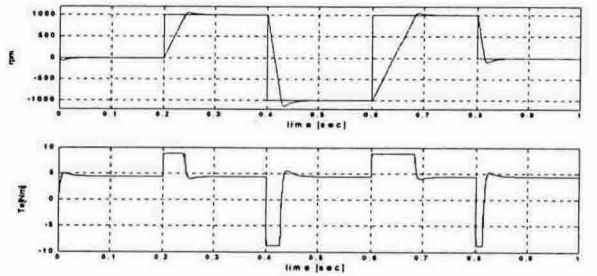
2.3 시뮬레이션

시뮬레이션은 표 1의 900W 영구자석 전동기를 대상으로 실행하였고 제어 파라메타를 공통으로 이용하였다. 속도제어기 비례이득은 $K_p = (J \cdot \omega_{sc}) / K_t$ 이고 적분이득은 $K_i = K_p \cdot \omega_{pi}$ 이다. 여기서 ω_{pi} 는 PI절점 각주파수로 $\left(\frac{\omega_{sc}}{5}\right)$ 로 설정하였다. 트래킹 반

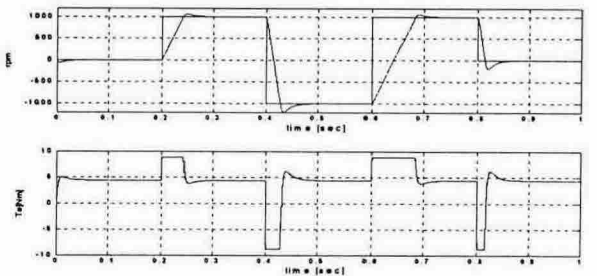
와인드업 기법에서 $K_a = 1/K_p$ 이고 제한적분 기법에서 데드존 H 는 I_{max} 이고 게인 $b = 10 \times K_a$ 로 설정하였다. 제안된 반와인드업 기법에서는 $K = 0.2$ 로 설정하였다.



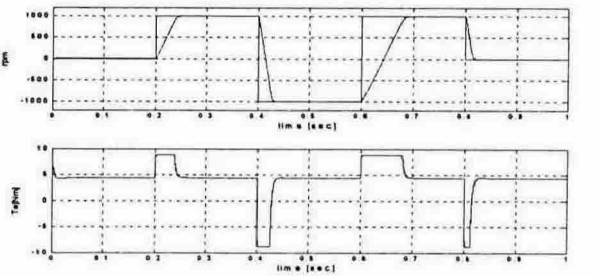
(a) 조건 적분기법



(b) 트래킹 반와인드업 기법



(c) 제한 적분기법



(d) 제안된 반와인드업 기법

그림 7 1/2부하시 PI 속도제어기 응답
Fig. 7 Speed response of PI controllers (1/2 load)

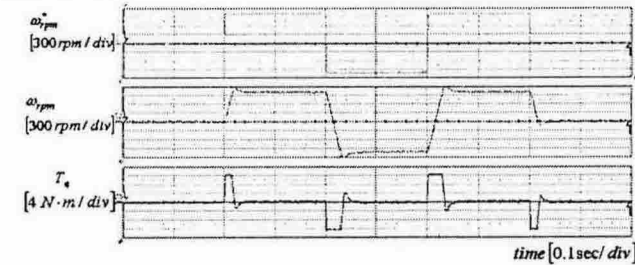
그림 7은 반부하에서 속도지령이 $\pm 1000[rpm]$ 으로 변화할 경우의 각 PI속도제어기의 응답을 보여주고 제안된 반와인드업 기법의 경우 오버슈트가

나타나지 않았고 응답성이 가장 우수하였다.

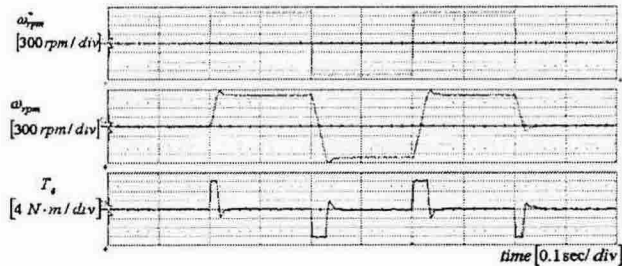
표 1 영구자석 동기전동기의 정격 및 제어파라미터
Table 1 Ratings and parameters of PMSM

극수(P)	8	전류제어기주기(T)	100[ms]
토크상수(K_t)	1.08 [$N \cdot m / A$]	전류제어기 제어주파수대역	3,000[rad/s]
관성(J_m)	0.001734 [$kg \cdot m^2$]	속도제어기주기(T)	1[ms]
고정자 저항(R_s)	0.704 [Ω]	속도제어기 제어 주파수대역(ω_{sc})	300[rad/s]
고정자 인덕턴스(L_s)	7.996 [mH]	지령전류제한(I_{max})	8.1742[A]

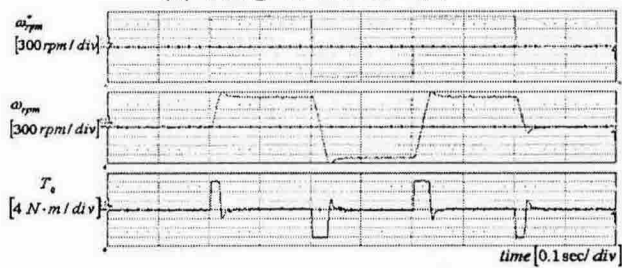
2.4 실험



(a) 조건 적분기법



(b) 트래킹 반와인드업 기법



(c) 제한 적분기법



(d) 제안된 반와인드업 기법

그림 8 무부하시 PI 속도제어기 응답

실험은 시뮬레이션과 동일한 상태에서 실행하였다. 그림 8은 무부하에서 속도지령이 $\pm 1000[rpm]$ 으로 변화할 경우의 각 PI속도제어기의 응답을 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 기존의 반와인드업 기법에 비하여 제안된 반와인드업 기법이 시뮬레이션과 마찬가지로 실험에서도 가장 우수한 결과를 나타내었다. 반와인드업 기법의 경우 오버슈트가 나타나지 않았고 응답성이 가장 우수하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호: R-2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임

3. 결론

본 논문에서는 계단(Step)입력에 대한 오버슈트를 억제하는 새로운 방식의 반와인드업(Anti-windup)기법을 제안하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인하고 기존의 반와인드업 기법과 비교하여 그 우수성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] C. Bohn and D. P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies" IEEE Control Systems Magazine, April, 1995, pp.34~40
- [2] K. S. Walgama, S. Ronnback, and J. Sternby, "Generalisation of conditioning technique for anti-windup compensators", IEEE Proc. Control Theory Appl., vol. 139, no.2, 1991, pp.109-118
- [3] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers", IEEE Control Systems Magazine, Aug., 1996, pp.48~57
- [4] A. S. Hodel and E. C. E. Hall, "Variable-structure PID Control to prevent integrator windup", IEEE Industrial Electronics, vol.45,no3,June, 1998, pp445-450
- [5] H. B. Shin, "New anti-windup PI controller for Electronics, vol.48,no.2, April, 1995, pp.442-451
- [6] L. Rundqwist, "Anti-Reset Windup for PID Controllers," Ph. D. Thesis TRFT-1033. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1991
- [7] M. Zhuang and D.P. Atherton, "Automatic Tuning of Optimum PID Controllers," Proc. IEEE, part D, vol.140, no. 3, pp216-224, 1993
- [8] R. Hanus, "Anti-Windup and Bumpless Transfer: A Survey," Computing and Computers for Control Systems, P. Borne et al., eds., IMACS, vol. 4, pp.3-9, 1989.
- [9] R. Hanus, M. Kinnaert, and J. L. Henrotte, "Conditioning Technique, A General Anti-Windup and Bumpless Transfer Method," Automatica, vol. 23(6), pp.729-739, 1987.