

### PI 속도제어기의 새로운 Anti-windup 기법

윤원일, 최종우, 김흥근  
경북대학교

### A New Anti-windup Strategy for PI Speed Controllers

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

**Abstract** - 본 논문은 산업용 전동기 시스템의 속도제어기에서 계단(Step)입력에 대한 속도의 오버슈트를 억제하는 새로운 방식의 반와인드업(Anti-windup)기법을 소개한다. 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.

에 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 기법(Tracking Anti-windup)[2]

#### 1. 서 론

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. PI제어기는 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[1~3]. 기존의 반와인드업은 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.

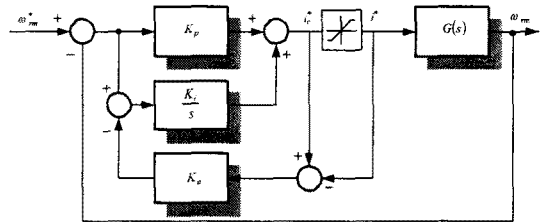


그림 2. 트래킹 반와인드업 기법의 블록도

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 제한적분기법(Limitintegration)[2]

#### 2. 본 론

##### 2.1 기존적분기 반와인드업기법

##### 2.1.1 조건 적분(Conditional Integration)기법[1][3]

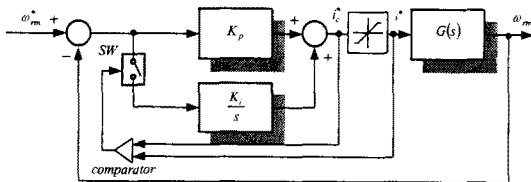


그림 1. 조건 적분 기법의 블록도

조건 적분 기법은 그림 1과 같이 제어 입력이 제한기

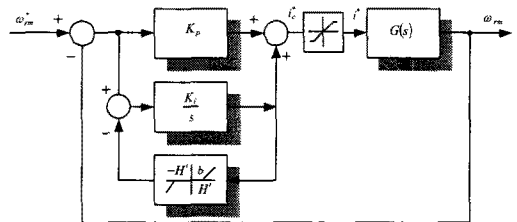


그림 3. 제한적분 방법의 블록도

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

#### 2.2 제안된 반와인드업기법

##### 2.2.1 비례제어기 모드

제안된 반와인드업 기법은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 속도지령  $\omega_m^*$ 에 대해 제한기에 의해 포화(Saturation)가 계속되는 순간까지 SW1이 오프 하여 비례 제어를 하다가 포화가 끝나는 순간 SW1을 온하여 비례적분제어로 전환한다. 비

레제어 모드가 시작되는 시점의 적분 값을  $i_{i\_TL}^*$  이라고 하고 비례 제어모드가 시작하기 전 비례제어모드에서 부하토크가 적절한 적분기에 의해 보상되었다고 하면

$$i_{i\_TL}^* = \frac{T_L}{K_t} \quad (1)$$

이 된다. 식(1)에서 마찰에 의한 영향은 부하토크에 포함하였다. 비례제어 모드에서는 SW2가 온되어 적분기의 출력값을 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 출력값의 변화를 나타내었다.

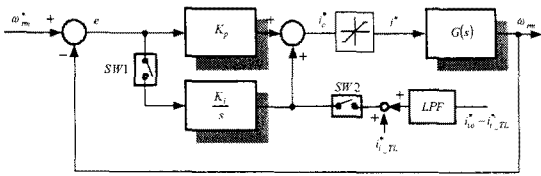


그림 4. 제한된 적분기 반와인드업 블록도

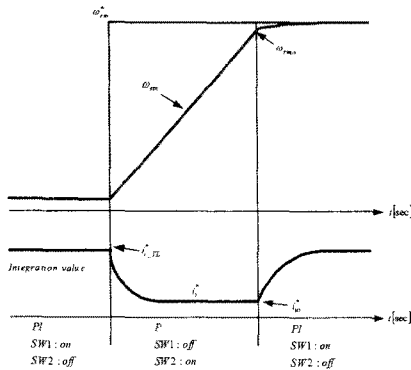


그림 5. 계단 입력에 대한 속도응답 및 적분기 출력값의 변화

## 2.2.2 비례적분제어모드

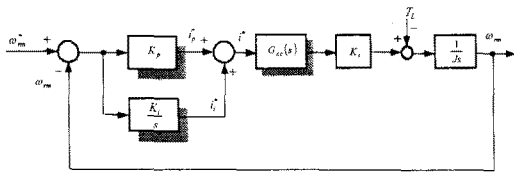


그림 6. 비례적분 제어기로 동작할 때의 블록도

그림6은 비례적분제어 모드로 동작할 때의 제어블록도이다.  $G_{cc}(s)$  는 전류제어기를 표현하며 이상적( $G_{cc}(s)=1$ )으로 가정한다. 비례적분 제어 모드로 전환될 시점에서 속도  $\omega_{rm}$ 의 초기값을  $\omega_{rmo}$ 로, 적분기 출력값  $i_i^*$ 의 초기값을  $i_{io}^*$ 로 표현한다. 비례적분 제어 모드로 전환될 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 페루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

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

여기서 속도지령  $\omega_{rm}^*$ 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 표현할 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 유도할 수 있다.

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

식(6)은 비례제어 모드에서 속도지령에 대한 속도의 응답 특성을 표현하는 것으로 이득  $K$ 를 조절하면 전달함수의 영점(Zero)을 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 표현될 수 있다.

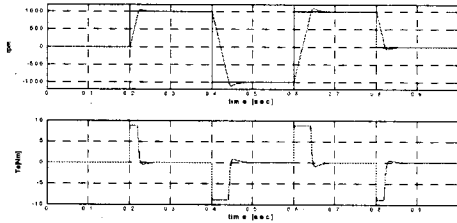
## 2.4 시뮬레이션

표 1. 영구자석 동기전동기의 정격 및 제어 파라미터

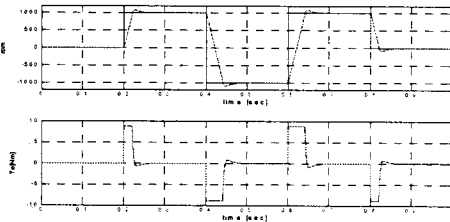
극수(P)	8	전류제어기주기(T)	100[ms]
토크상수( $K_t$ )	1.08 [N·m/A]	전류제어기 제어주파수대역	3.000[rad/s]
관성( $J_m$ )	0.001734 [kg·m <sup>2</sup> ]	속도제어기주기(T)	1[ms]
고정자 저항( $R_s$ )	0.704 [Ω]	속도제어기 제어 주파수대역( $\omega_{sc}$ )	300[rad/s]
고정자 인덕턴스( $L_s$ )	7.996 [mH]	지령전류제한( $I_{max}$ )	8.1742[A]

시뮬레이션은 표 1의 900W 영구자석 전동기를 대상으로 실행하였고 제어 파라미터를 공통으로 이용하였다. 속도제어기 비례이득은  $K_p = (J \cdot \omega_{sc}) / K_t$  이고 적분이득은  $K_i = K_p \cdot \omega_{pi}$ 이다. 여기서  $\omega_{pi}$ 는 PI절점 각주파수로

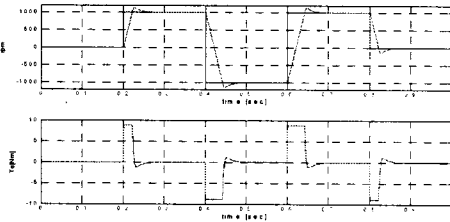
$\left(\frac{\omega_{sc}}{5}\right)$ 로 설정하였다. 트래킹 반와인드업 기법에서  $K_a = 1/K_p$  이고 제한적분 기법에서 데드존  $H$ 는  $I_{max}$  이고 게인  $b = 10 \times K_a$ 로 설정하였다. 제안된 반와인드업 기법에서는  $K = 0.2$ 로 설정하였다.



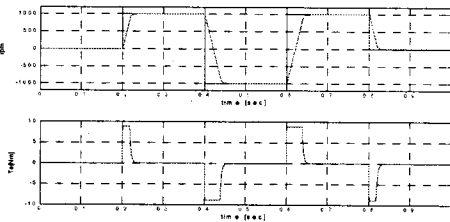
(a) 조건 적분기법



(b) 트래킹 반와인드업 기법

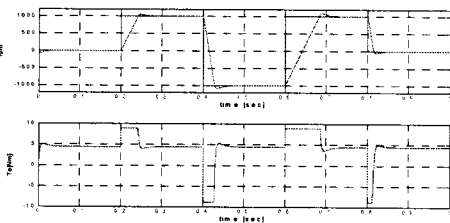


(c) 제한 적분기법

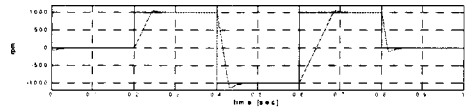


(d) 제안된 반와인드업 기법

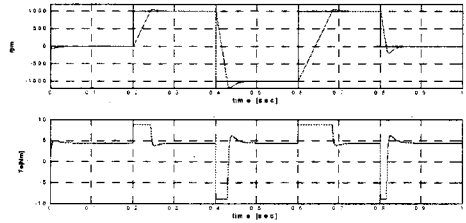
그림 7. 무부하시 PI 속도제어기의 응답



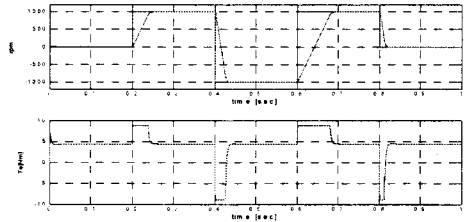
(a) 조건 적분기법



(b) 트래킹 반와인드업 기법



(c) 제한 적분기법



(d) 제안된 반와인드업 기법

그림 8. 1/2부하시 PI 속도제어기의 응답

그림 7은 무부하에서 속도지령이  $\pm 1000[rpm]$ 으로 변화할 경우의 각 PI속도제어기의 응답을 그림 8은 1/2 부하시 PI속도 제어기의 응답을 나타낸다. 무부하시와 부하시 모두 제안된 반와인드업 기법의 경우 오버슈트가 나타나지 않았고 응답성이 가장 우수하였다.

### 3. 결 론

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

"이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"  
(R08-2003-000-10906-0)

### [참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] C. Bohn and D. P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies" IEEE Control Systems Magazine, April, 1995, pp.34-40
- [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