

## 전동기 구동을 위한 반포화 적분-비례 제어기 설계

박종규, 손병성, 유치밍, 이순영, 신휘범  
경상대학교 전기전자공학부

### Anti-windup IP Controller for Motor Drives

Jong-Gyu Park, Byeong-Sung Son, YuChi Ming, Soon-Young Lee, Hwi-Beom Shin  
School of Electrical & Electronic Engineering, Gyeongsang National University

#### Abstract

The windup phenomenon appears and results in performance degradation such as large overshoot, slow settling time when the integral-proportional (IP) controller output is saturated. An anti-windup IP controller is proposed to improve the control performance for the motor drives. The proposed algorithm is applied to the current control of a vector-controlled induction motor driven by a pulse width modulated(PWM) voltage-source inverter. The integral state is separately controlled corresponding to whether the IP controller output is saturated or not. The experimental results show that the current response has much improved performance such as little overshoot and fast settling time.

제어기와 같다는 특징을 갖는다[1].

일반적으로 제어기는 입력제한조건을 고려하지 않고 설계를 한다. 따라서, 과도상태에서 입력이 포화되면 적분기는 비정상적으로 증대하여, 입력이 선형 영역에 도달한 후에도 적분기의 적절한 값을 갖는데 상당한 시간이 필요하다. 이러한 현상을 적분포화(integral-windup)현상이라 한다. 적분포화가 발생하면 큰 overshoot가 발생하고, 정착시간이 매우 길어지고, 또한 시스템이 불안정할 수 있다[2-6]. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 비례-적분 제어기의 경우 여러 방안들이 제시되었으나[2][3][5], 적분-비례 제어기에 대해서는 아직 해결 방안이 제시되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 적분-비례 제어기의 적분포화현상을 극복할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 입력제한 조건을 갖는 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기의 전류제어에 적용하여 타당성을 실험을 통해 검증한다.

#### 1. 서론

전동기의 고성능 구동을 위해서는 정밀한 전류 제어 및 속도 제어가 요구된다. 최근에 예측제어, 슬라이딩모드제어, 퍼지제어 등 많은 전류 제어기가 등장하였으나 산업현장에서는 비례-적분제어기와 적분-비례 제어기가 많이 사용되고 있다. 이는 적분기에 의해 정상상태 오차를 줄일 수 있고, 빠른 응답특성 및 구현이 용이하기 때문이다. 비례-적분 제어기는 빠른 응답을 얻기 위해 이득을 증가시키면 overshoot가 크게되어 미분기를 첨가하여 이를 감소시킬 수 있으나 알고리즘이 복잡해진다. 한편, 적분-비례 제어기는 최소의 overshoot로 빠른 응답특성을 발휘할 수 있고, 정상상태 오차 및 외란의 강인성은 비례-적분

#### 2. 반포화 적분-비례 제어기

적분-비례 제어기는 비례-적분 제어기와는 달리 초기 과도상태에서 적분기의 역할이 비례기에 비해 매우 크고, 정상상태 부근에 도달하면 적분기와 비례기의 역할이 균형을 이룬다. 따라서, 입력제한이 있는 경우 적분포화 현상에 의해 비례-적분 제어기에 비해 성능저하가 더욱 심화된다. 따라서, 적분기 상태를 입력제한 조건에 따라 적절하게 조절해야 한다.

그림 1은 반포화 기능을 갖는 적분-비례 제어기를 나타낸다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u = -k_p y + k_i q \tag{1}$$

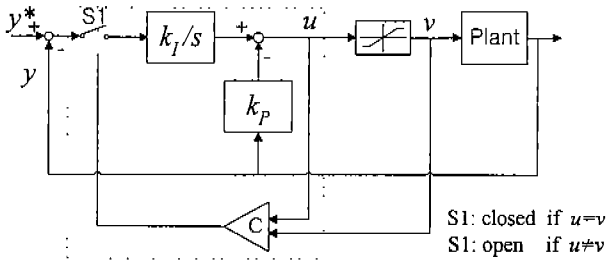


그림 1. 반포화 기능을 갖는 적분-비례 제어기.  
Fig. 1. Anti-windup IP controller.

여기서,  $k_P$  및  $k_I$ 는 각각 비례 및 적분 이득을 나타내며,  $y$  및  $q$ 는 각각 플랜트 출력과 적분기 상태변수를 나타낸다. 적분기 상태변수는 입력 제한조건에 따라 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{q} = \begin{cases} y^* - y & \text{if } u = v \\ 0 & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $y^*$ 는 기준명령을 나타낸다.

즉, 적분-비례 제어기의 출력  $u$ 가 플랜트 입력  $v$ 와 같은 경우는 포화가 일어나지 않으므로 선형영역에서 동작하여 설계자가 선택한 이득에 따라 시스템은 동작한다. 반면,  $u$ 가  $v$ 와 다른 경우는 플랜트 입력에 포화가 발생한 경우이다. 따라서, 이득에 무관하게 시스템은 응답하므로 적분기 상태의 변화를 중지시켜 비정상적으로 증대하는 것을 방지하여 정착시간을 단축하고, 과도한 overshoot를 방지한다.

이러한 반포화 방법은 입력제한조건에 따른 적분 상태의 일치성(consistency)을 확보하기 위해 기준명령  $y^*$ 를 포화현상이 없는 실현 가능한 기준명령(realizable reference)으로 변경하는 Hanus 등[5]의 방식과 유사하다. 즉, 식 (2)는 포화현상이 발생하면 기준명령  $y^*$ 를 플랜트 출력  $y$ 로 바꾸어 항상 실현 가능한 기준명령이 적분-비례제어기에 명령이 되도록 한다. 따라서, 플랜트 입력이 포화상태에 있더라도 과도한 overshoot가 없이 설계자가 선형영역에서 설계한 이득에 따라 시스템이 응답할 것으로 기대된다.

### 3. 유도전동기의 적분-비례 전류제어

동기 dq좌표계에서 유도전동기의 고정자 전류 방정식은 벡터제어가 이루어 졌다는 가정 아래 다음과 같이 표현 할 수 있다[7].

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma\tau_s} & \omega_e \\ -\frac{1}{\sigma} \omega_e & -\frac{1}{\sigma\tau_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$v_{ds}$   $v_{qs}$  : 고정자 전압, [V]

$\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$ ,  $\tau_s = L_s/R_s$

$R_s$  : 고정자 저항, [ $\Omega$ ]

$L_s, L_r$  : 고정자 및 회전자 자기인덕턴스, [H]

$L_m$  : 자화인덕턴스, [H]

$\omega_r, \omega_e$  : 회전자 및 동기 각속도, [rad/sec]

$\omega_{sl}$  : 슬립 각속도 ( $= \omega_r - \omega_e$ ), [rad/sec].

선형 영역에서 적분-비례 제어기를 이용하여 dq축 전류 제어기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{qs} = -k_P i_{qs} + k_I q_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} \quad (4)$$

$$\dot{q} = i_{qs}^* - i_{qs} \quad (5)$$

dq축 간에 간섭을 막기 위해 feedforward항을 식 (4)에 포함시킨다. 식 (3)과 (4)로부터 다음의 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{I_{qs}(s)}{I_{qs}^*(s)} = \frac{\frac{k_I}{\sigma L_s}}{s^2 + \frac{(R_s + k_P)}{\sigma L_s} s + \frac{k_I}{\sigma L_s}} \quad (6)$$

식 (6)은 영점(zero)이 없는 표준 2차 전달함수로서 이득 상수를 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$k_P = 2\zeta\omega_n\sigma L_s - R_s \quad (7)$$

$$k_I = \sigma L_s \omega_n^2 \quad (8)$$

여기서,  $\zeta$  및  $\omega_n$ 은 제동계수와 자연주파수를 나타낸다. d축 전류에 대해서도 유사한 방법으로 적분-비례 제어기를 설계할 수 있다.

### 4. 실험 및 결과

그림 2는 간접 벡터제어방식으로 제어되는 유도전동기의 반포화 적분비례 제어기의 블록 선도를 나타낸다. 전압원 인버터는 상태공간변조(space vector PWM)방식을 채택하고, dq축 최대 인버터 출력전압을 100[V]로 제한한다. 표 1은 실험에 사용된 1[hp]급 유도전동기의 파라메타를 나타내며, PWM주기 및 전류제어 및 벡터제어의 샘플링 주기는 130[ $\mu$ sec]로 설정하여 TMS320C31인 DSP로 구현하였다. 본 논문에서 제안한 반포화 적분-비례 전류제어기의 타당성

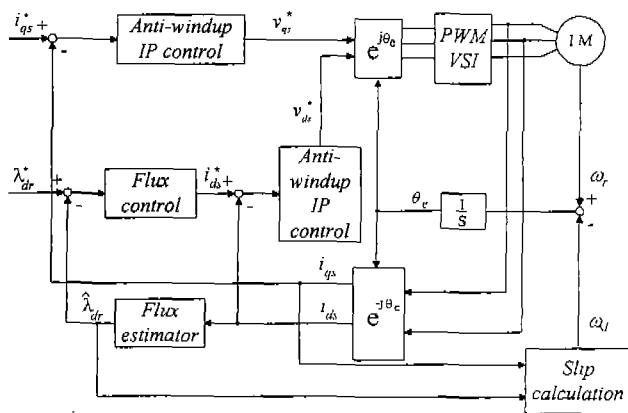


그림 2. 벡터제어로 구동되는 유도전동기 전류제어.  
Fig. 2. Current control of vector controlled-induction motor.

을 검증하기 위해 일반적인 적분-비례 전류제어기와 함께 실험 비교한다.

그림 3은 자속이 정상상태에 도달한 후 크기가  $\pm 13[\text{A}]$ 인 구형파인 토오크 발생 전류 즉, q축 전류명령을 인가한 경우 응답특성을 나타낸다. 여기서, 전류제어기의 자연주파수  $\omega_n$ 과 제동계수  $\zeta$ 를 각각  $1800[\text{rad/s}]$ , 1로 설정하여 적분 및 비례 이득을 설정하였다. 반포화 기능이 없는 적분-비례 제어기의 응답특성을 살펴보면 초기 과도상태에서 인버터의 출력이 포화되어 그림 3(c)에서와 같이 적분기의 상태는 비정상적으로 커진다. 그 결과 과도한 overshoot(약 29[%])가 발생하고, 정착시간(약 6.6[msec])이 매우 길어지는 것을 알 수 있다. 반면, 반포화 적분-비례 제어기는 초기 과도상태에서도 적분기 상태가 적절한 값을 유지하므로 overshoot가 매우 작고, 정착시간(약 4.6[msec])이 상당히 단축됨을 알 수 있다.

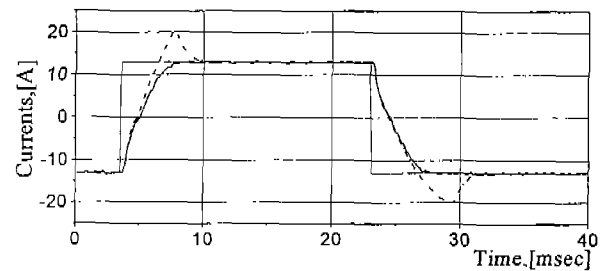
그림 4는 그림 3과 같은 조건하에 전류제어기의 자연주파수를  $3100[\text{rad/s}]$ , 제동계수를 1로 설정하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 반포화 기능이 없는 적분-비례 제어기의 경우 제어기 이득이 매우 커서 초기 상태에 인버터의 출력이 포화되어 그 결과 과도한

표 1. 유도전동기의 정격 및 파라미터

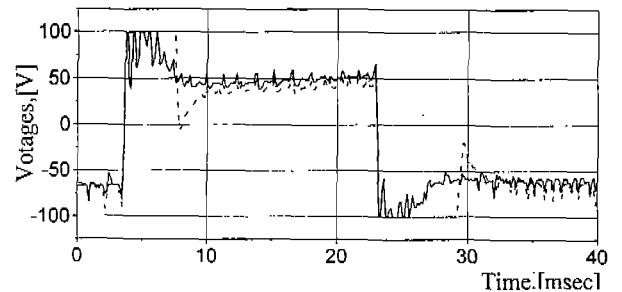
Table 1. Rating and parameters of considered induction motor.

Voltage	220[V]	R <sub>s</sub>	1.65 [ $\Omega$ ]
Current	3.2[A]	R <sub>r</sub>	2.05 [ $\Omega$ ]
		L <sub>s</sub>	0.1134 [H]
Frequency	60[Hz]	L <sub>r</sub>	0.1144 [H]
Pole number	4 [poles]	L <sub>m</sub>	0.1083 [H]

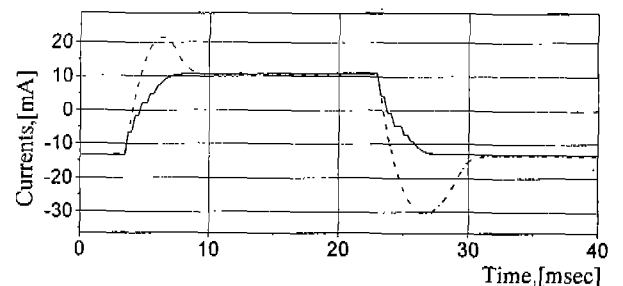
overshoot(약 30[%])가 발생한다. 또한, 이를 감소시키기 위해 적분-비례 제어기의 출력은 음의 인버터 제한 값에 걸려 다시 포화 영역에 진입하여 전류 응답에 undershoot가 발생하여 정착시간(약 8.6[msec])이 매우 길어지는 것을 알 수 있다. 반면, 반포화 적분-비례 제어기는 그림 4(c)에 볼 수 있듯이 초기 과도상태에서도 적분기 상태가 적절한 값을 유지하여 overshoot가 매우 작고 정착시간(약 3.5[msec])이 단축되어 제어성능이 상당히 향상됨을 알 수 있다.



(a) 전류응답

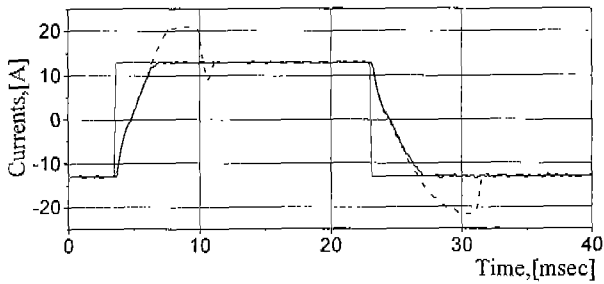


(b) 전압 명령

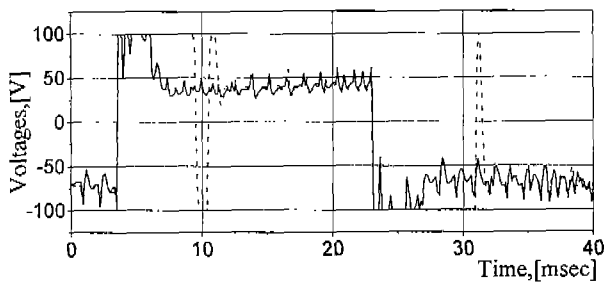


(c) 적분기 상태변수 q

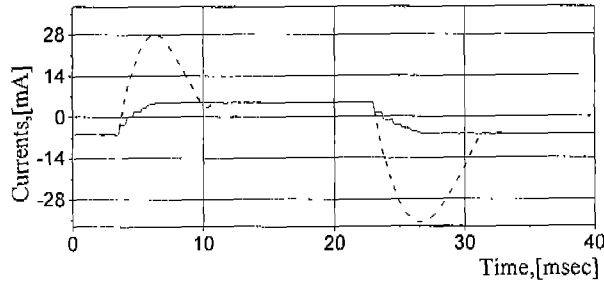
그림 3. 구형파 명령의 전류응답 ( $\omega_n=1800[\text{rad/s}]$ );  
실선: 반포화 적분비례, 일점쇄선: 적분비례.  
Fig. 3. Current responses of step reference current ( $\omega_n=1800[\text{rad/s}]$ ); solid line: anti-windup IP, dash dot line: IP.



(a) 전류응답



(b) 전압명령



(c) 적분기 상태변수 q

그림 4. 구형과 명령의 전류응답 ( $\omega_n=3100[\text{rad/s}]$ );  
 실선: 반포화 적분비례, 일점쇄선: 적분비례.  
 Fig. 4. Current responses for step reference current  
 ( $\omega_n=3100[\text{rad/s}]$ ); solid line: anti-windup IP  
 , dash dot line: IP.

## 5. 결론

본 논문에서는 적분-비례 제어기의 적분포화현상을 방지하기 위한 새로운 기법을 제시하여, 벡터제어로 구동되는 PWM 인버터-유도전동기시스템의 전류제어에 적용하여 그 타당성을 입증하였다. 포화상태에서 기준명령을 실제 출력으로 전환하는 방법으로 적분기의 상태를 조절하여 입력제한조건에 따른 적분

기의 일치성을 확보하였다.

제시한 반포화 적분-비례제어기의 특징은 첫째, 플랜트 입력의 포화영역을 고려하지 않고 선형영역에서 제어기의 이득을 구하여 실적용이 가능하다. 둘째, 입력이 포화 영역에 진입하더라도 overshoot를 감소시킬 수 있고, 정착시간을 단축할 수 있다. 셋째, 적분-비례 제어기의 이득을 크게 할 수 있어 외란에 둔감한 시스템을 구현할 수 있다. 또한, 알고리즘이 간단하여 커다란 비용이 없이 기존의 제어기를 수정할 수 있어 많은 산업분야에 적용이 가능하리라 기대된다.

## 참고문헌

- [1] P. K. Nandam and P. C. Sen, "A comparative study of proportional-integral(P-I) and integral-proportional(I-P) controllers for dc motor drives," *Int. J. Control*, vol. 44, no. 1, pp. 283-297, 1986
- [2] H. B. Shin, "New antiwindup PI controller for variable-speed motor drives", *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 45, no. 3, pp. 445-450, June 1998.
- [3] K. J. Astrom and T. Haggund, *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, 1988
- [4] N. J. Krikelis and S. K. Barkas, "Design of tracking system subject to actuator saturation and integral wind-up." *Int. J. Control*, vol. 39, no. 4, pp. 667-682, 1984.
- [5] Y. Ping, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 16, pp. 48-57, July 1996
- [6] 이지명, 이동춘, 이현동, "인버터의 포화를 고려한 전류제어기의 anti-windup," *전기학회 논문지*, vol. 47, pp. 1399-1405, 1998
- [7] A. M. Trzynadlowski, *The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors*, Kluwer Academic Publishers, 1994