

반포화 적분-비례제어기를 이용한 유도전동기의 속도제어

박종규, 정재호, 신희범
경상대학교 전기공학과

Speed Control of Induction Motor Using Anti-windup Integral-Proportional Controller

Jong-Gyu Park, Jae-Ho Chung and Hwi-Beom Shin

Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

Abstract

The windup phenomenon appears and degrades control performance when a controller with integrating action is used and the plant input is limited. An anti-windup integral-proportional(IP) controller is proposed for the variable-speed motor drives and it is experimentally applied to the speed control of a vector-controlled induction motor driven by a pulse width modulated (PWM) voltage source inverter (VSI). Although the operating conditions like motor load and speed command is changed under the limited plant input, it is experimentally verified that the speed response has much improved performance, such as no overshoot and fast settling time, and the maximum plant input is also effectively utilized.

1. 서론

대부분의 가변속전동기 구동은 빠른 동특성을 갖는 전류제어기와 전류 제한기를 갖는다. 실제로, 인버터 보호, 자속포화, 모터의 과열 때문에 속도 제어기에서 만들어진 전류명령은 미리 정해진 최대치로 제한하기^[1] 때문에 속도 제어기는 출력제한을 가진다. 일반적으로 속도 제어기 설계는 플랜트의 입력제한을 고려하지 않기 때문에 페루프 제어기 성능은 기대했던 것 보다 많이 저하된다.

적분기가 사용된 제어기에서의 포화현상은 큰 오버슈트와 느린 정착시간(settling time)을 야기 시

키고, 때로는 속도응답을 불안정하게 만들 수도 있다^{[2][3]}. 비례-적분제어기(proportional-integral(PI))에서는 포화현상을 극복하기 위해 많은 반포화 기법들이 제시되어 왔다^[2-8]. Hanus는 비선형 영역에서 조건기법(conditioning technique)을 토대로 한 반포화 제어기를 제안하였고^[6], 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다른 반포화 기법과 비교하여 그 타당성을 보였다^[2]. 제안된 기법은 플랜트 입력이 비례-적분 제어기 출력과 다를 때 적분 상태의 일치성(consistency)을 확보하기 위해 기준 명령을 포화 현상이 없는 실현 가능한 기준명령을 플랜트에 가하는 것이다. 이 명령은 플랜트 입력과 제어기 출력 차이로부터 유도해낸다. 그런데 이 기법은 포화 부분에서 성능저하가 발생한다는 단점을 가지고 있어 Walgama와 Hanus는 이런 문제를 극복하기 위해서 designer-chosen parameter를 제시하여 이 기법을 수정하였다^[7].

비례-적분제어기는 정상상태의 오차가 영(zero)이 되고 구현이 용이하다는 점에서 가변속전동기 제어에 많이 사용되고 있다. 만약 빠른 동특성을 위해 비례적분 이득을 크게 하면 기대하지 않는 오버슈트가 발생하고 느린 정착시간을 갖는다. 따라서 시스템이 오버슈트 없이 설계되었을 때 스텝 명령이나 부하변화에 대한 응답은 아주 느려지게 된다.

반면, 적분-비례제어기(integral-proportional(IP))는 비례-적분제어기의 장점을 가지면서 오버슈트 없이 빠른 응답특성을 가질 수 있어^[9] 근래에는 가변속 전동기구동에도 적용되고 있다. 적분-비례 제어기에서는 비례기와 적분기를 비교할 때 적분기의 역할이 더 지배적이기 때문에, 포화현상이 발생하는 경우에는 비례-적분제어기 보다는 적분-비례제

여기에서 더 심각한 문제가 발생한다. 그러나 아직 까지 이러한 문제를 해결하기 위한 방법들이 제시 되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 빠른 정착시간을 가지면서 오버슈트가 생기지 않도록 하는 반포화 적분-비례 (anti-windup integral-proportional) 제어 기법을 제시하고, 벡터제어 유도전동기의 속도제어에 적용 시켜 속도 응답이 상당히 개선됨을 보인다.

2. 적분-비례제어기의 속도제어

일반적으로 전류제어의 동특성은 속도제어기보다 빠르게 설계된다. 만약 빠른 전류제어기가 설계되면 전류 동특성은 무시되고 가변속전동기 구동은 식(1)과 같이 1차 시스템으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\omega}_r = -\frac{1}{\tau_m} \omega_r + k_i v - T_l \quad (1)$$

여기서, $k_i = k_T/J$, $T_l = T_L/J$ 이고 v 는 토크를 만드는 전류명령인, 플랜트 입력을 의미한다.

플랜트 입력이 제한되는 경우에 v 는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v = \begin{cases} u & \text{if } |u| \leq U_m \\ U_m \cdot \text{sgn}(u) & \text{if } |u| > U_m \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $\text{sgn}()$ 은 sign 함수, U_m 은 최대 속도제어 출력, u 는 속도제어 출력이고, $u = v$, $u \neq v$ 인 경우를 각각 선형영역, 포화영역이라 한다.

반포화가 없는 적분비례 속도 제어기의 출력 u 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$u = -k_p \omega_r + k_i q \quad (3)$$

플랜트 입력이 정해진 제한치를 가지지 않을 때, 적분 상태 q 는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q} = e \quad (4)$$

여기서 $e = \omega_r^* - \omega_r$ 이다.

식(1)과 식(3)으로부터 IP 속도 제어 시스템의 전달함수는 다음과 같이 표준 2차 시스템으로서 표현된다.

$$\frac{\Omega_r(s)}{\Omega_r^*(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

여기서, 자연 주파수(natural frequency) ω_n 과 제동비(damping ratio) ζ 는 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{k_i k_i}, \quad \zeta = (1/\tau_m + k_i k_p)/2\omega_n \quad (6)$$

만약 플랜트의 입력이 제한되지 않는다면, 적분-

비례 제어 시스템의 전달 함수는 식(6)과 같이 영점이 존재하지 않기 때문에, 설계사양에 따른 오버슈트, 정착시간 등이 스텝속도명령에 잘 응답하게 될 것이다. 그러나 비례-적분제어 시스템의 경우, 전달함수에 영점이 존재하므로 스텝속도명령에 대한 응답은 느린 정착시간과 보다 큰 오버슈트를 가질 수 있다. 이것은 비례-적분제어기의 바람직하지 못한 부분이기 때문에 일반적으로 미분기를 추가하기도 한다. 그리고 비례-적분제어 이득을 결정하기 위한 방법에는 Ziegler-Nichols 방법과 같은 몇 가지 방법이 있다.

적분-비례제어 시스템에서 적분이득과 비례이득은 각각 자연주파수와 제동비에 밀접한 관계를 가지므로, 설계시 자연주파수와 제동비가 주어지면 적분-비례제어 이득은 식(6)에서 쉽게 구해진다. 플랜트 입력이 제한되었을 때 빠른 응답을 얻기 위해 큰 이득을 사용하는 기존의 적분-비례제어기는 큰 오버슈트와 느린 정착시간을 가지며 심지어, 시스템을 불안정하게 만들 수도 있다. 그러나 이러한 문제를 해결하기 위한 방안들이 제시되지 않고 있다. 그래서 플랜트 입력제한을 가지는 시스템에 적용시킬 반포화 적분-비례제어기를 제시하고 발전시키는 것은 중요한 일이다.

3. 제안된 반포화 적분-비례제어기 속도제어

반포화 현상을 극복하기 위해서 적분상태(integral state)의 궤적을 일치성 범위 안에 유지시켜야하므로 적분상태는 적분-비례제어기 출력이 제한될 경우와 그렇지 않는 경우를 분리하여 제어한다. 만약 제어기 출력이 제한된다면 적분상태는 플랜트 에러에 상응하는 일치성 범위의 경계값으로 설정하고 제한이 되지 않을 경우에는 기존의 제어기와 같이 동작하게 한다. 제안된 반포화 적분제어기는 식(7)과 식(8) 나타낸다.

$$u = -k_p \omega_r + k_i q \quad (7)$$

여기서, 적분 상태 q 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} \dot{q} = e & \text{if } u = v \\ \dot{q} = \frac{1}{k_i} (v + k_p \omega_r) & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (8)$$

제안된 반포화 적분-비례제어기는 플랜트 입력 제한에 상관없이 식(6)에서 제어 이득을 쉽게 계산할 수 있으며 적분상태가 일치성 범위 안에 동작하기 때문에 오버슈트를 가지지 않고 설계된 자연주파수에 따라 빠른 정착시간을 가져 기존의 제어기보다 빠른 속도 응답을 가진다. 또 제안된 제어기는 높은 이득으로 설계할 수 있어 속도응답은 부하

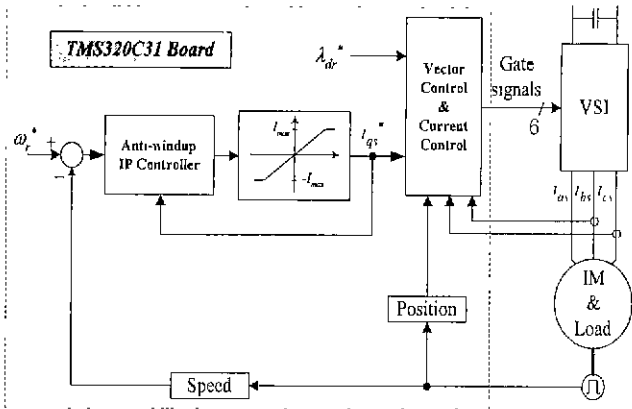


그림 1. 반포화적분-비례 속도제어기를 사용한 벡터제어 유도전동기 구동의 블록선도.
Fig. 1. Block diagram of vector-controlled induction motor drive using anti-windup IP speed control.

토크외란에 강인함을 보일 것이다.

4. 실험 및 결과

제안된 반포화 비례-적분제어기는 PWM-VSI에 구동되는 유도전동기의 속도제어에 적용하였으며 반포화 기능이 없는 기존의 적분-비례제어기와 비교하였다. 유도전동기의 파라미터는 표1과 같고 부하는 파우더 브레이크(powder brake)를 사용하였다.

표 1.유도전동기의 파라미터
Table 1. Parameters of induction motor.

1[hp], 220[V], 4[pole], 60[Hz], 1730[rpm]
$R_s = 1.98[\Omega]$, $R_r = 1.730[\Omega]$, $X_m = 38.43[\Omega]$
$X_s = 40.38[\Omega]$, $X_r = 41.35[\Omega]$, $V_{dc} = 310[V]$
$J = 7.1 \times 10^{-3}[\text{kgm}^2]$, $B = 5.04 \times 10^{-3}[\text{kgm}^2/\text{s}]$

그림 3은 실험 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것이고 제어 알고리즘은 TMS320C31 DSP 보드를 이용하여 구현하였다. 전류제어는 1.5[ms]의 정착시간을 가지는 비례-적분제어기를 사용하였고 자속의 정착시간은 0.04초가 되도록 제어하였다. PWM 주파수는 10[kHz]로 하였고 전류와 속도제어의 샘플링 시간은 각각 0.1과 1[ms]로 하였다. 엔코드는 1회전당 1000펄스인 것을 사용하였다. 그림 2는 무부하시 0.04초에 속도명령 0.96[pu] (1730 r/min)를, 2.04초에 속도명령 -0.96[pu]를 주었을 때 기존의 적분-비례제어와 반포화 적분-비례제어기의 속도제어에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 제어기의 이득은 $\zeta=1$, $\omega_n=10\pi$ 를 가지도록 하여 식

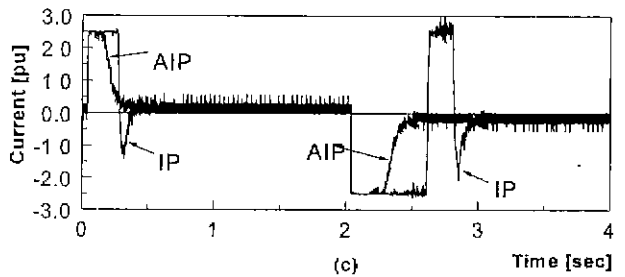
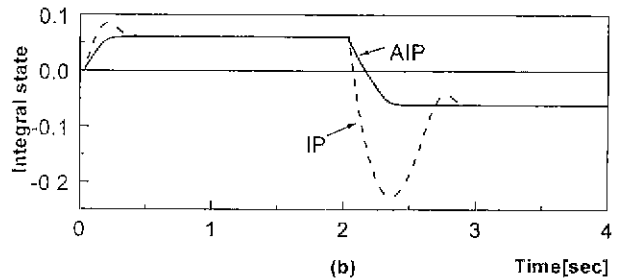
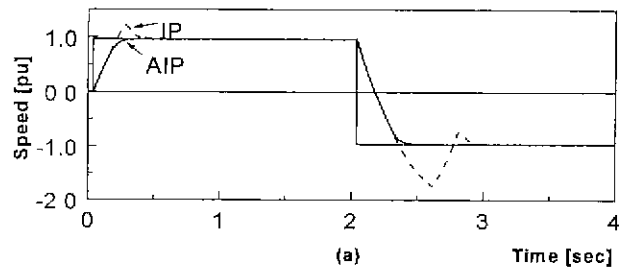


그림 2. $\zeta=1$, $\omega_n=10\pi$ rad/s 일 때 무부하 조건에서 적분-비례제어기와 반포화 적분-비례제어기의 속도 응답
Fig. 2. Experimental responses of IP and AIP speed controllers at no load condition when $\zeta=1$, $\omega_n=10\pi$ rad/s

(6)으로부터 구하였고 토크를 만드는 전류명령은 2.5 pu로 제한하였다.

그림 2(c)에서 속도제어기의 전류명령은 전동기가 구동되기 시작할 때와 방향이 반대로 바뀔 때 포화현상을 볼 수 있다. 이런 포화현상이 생길 때 기존의 제어기를 사용한 경우, 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 이런 과도기 동안 제어기의 출력과 플랜트의 입력은 일치하지 않아 적분상태는 커지게 된다. 적분상태가 커지면 큰 오버슈트가 발생할 뿐만 아니라, 포화기간이 길어져, 그림 2(a)에서 나타나듯이 아주 느린 정착시간을 가져온다. 이런 현상은 전동기의 속도명령이 바뀔 때 더욱 심각하게 나타남을 알 수 있다. 반면 제안된 제어기를 적용시킨 경우, 적분-비례제어기의 적분상태는 일치성 범위에서 동작하도록 조절되기 때문에 오버슈트가 전혀 생기지 않음을 볼 수 있다. 그림 3은 전부하인 경우, 기존의 제어기와 제안된 제어기를 적용시킨 실험

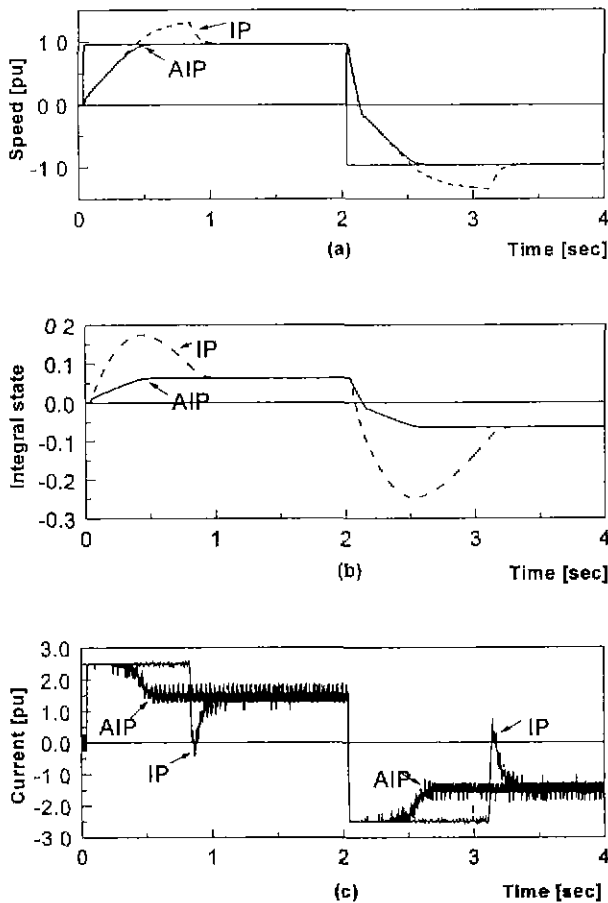


그림 3. $\zeta=1$, $\omega_n=10\pi$ rad/s 일 때 전부하 조건에서 적분-비례제어기와 반포화 적분-비례제어기의 속도 응답
 Fig. 3. Experimental responses of IP and AIP speed controllers at full load condition when $\zeta=1$, $\omega_n=10\pi$ rad/s.

험 결과이다. 기존의 제어기를 적용시킨 경우, 포화 현상이 일어나면 그림 3(b)에서와 같이 적분상태가 크게 증가한다. 그 결과 속도 응답은 그림 3(a)와 같이 큰 오버슈트와 느린 정전시간을 가졌다. 반면, 제안된 제어기를 적용 시킨 경우, 기존의 방법보다 정착시간이 빨라질 뿐만 아니라 오버슈트도 전혀 발생시키지 않았다. 그림 3(a)에서 정방향에서 역방향으로 속도명령을 변화시킬 때 속도가 증가하는 기울기가 다른데, 그 이유는 파우더 브레이크를 부하로 사용했기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 플랜트의 입력제한을 가진 비례-적분제어기에서 발생하는 포화현상을 극복하기 위해서 가변속 전동기구동을 위한 반포화 적분-비례제어기를 제안하여, 벡터제어로 구동되는 PWM 인

버터 유도전동기시스템의 속도제어에 적용시켜 그 타당성을 입증하였다. 실험결과, 제안된 제어기는 플랜트의 입력제한이 존재하는 경우, 기존의 적분-비례제어기보다 빠른 정착시간을 가지며, 오버슈트가 전혀 생기지 않는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 제어 이득을 플랜트의 입력제한에 관계없이 쉽게 구할 수 있음 보였다.

참고문헌

- [1] I. Boldea and S. A. Nasar, Vector Control of AC Drives. Boca Raton, FL: CRC Press, 1992.
- [2] Y. Ping, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers," IEEE Control Systems, vol. 16, no. 4, pp. 48-57, 1996.
- [3] K. J. Astrom, and T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 1988.
- [4] N. J. Krikelis and S. K. Barkas, "Design of tracking systems subject to actuator saturation and integral wind-up," Int. J. Control, vol. 39, no. 4, pp. 667-682, 1984.
- [5] I. H. Suh, S. H. Hwang, and Z. Bien, "A design and experimental of speed controller with PI-plus bang-bang action for a DC servomotor with transistorized PWM drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 31, no. 4, pp. 338-345, 1984.
- [6] R. Hanus, M. Kinnaert, and J. L. Henrotte, "Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method," Automatica, vol. 23, no. 6, pp. 729-739, 1987.
- [7] K. S. Walgama, S. Ronnback, and J. Sternby, "Generalization of conditioning technique for anti-windup compensators," IEE Proceedings part D, vol. 139, no. 2, 1992, pp. 109-118.
- [8] H. B. Shin, "New antiwindup PI controller for variable-speed motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, no. 3, pp. 445-450, June 1998.
- [9] P. K. Nandam and P. C. Sen, "Analog and digital speed control of DC drives using proportional-integral and integral-proportional control techniques," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 34, no. 2, pp. 227-233, May 1987.