

유도전동기를 위한 적분상태의 정상상태 값을 이용한 Anti-windup PI 전류 제어기

서은성, 박종규¹, 신희범
경상대학교, 경남도립남해대학¹

Anti-windup PI Current Controller Using Steady-State Value of Integral State for Induction Motor

Eun Sung Seo, Jong Gyu Park¹, Hwi Beom Shin
Gyeongsang National University, Gyeonam Provincial Namhae College¹

ABSTRACT

유도전동기의 전류 제어 시 PWM(Pulse Width Modulation)이 만들어 낼 수 있는 전압 크기의 제한으로 인해 전류 제어기의 출력과 유도전동기에 입력되는 값이 다를 수 있다. 이로 인해 windup현상이 발생하게 되고, 이는 느린 정착 시간 및 큰 오버슈트와 같은 제어기 성능 저하를 야기 시킬 뿐만 아니라 심각한 경우 시스템의 불안정을 초래한다. 따라서 본 논문에서는 유도전동기의 전류 제어 성능을 개선하기 위해 새로운 anti windup PI 전류 제어 방법을 제안하고, 실험을 통해 증명한다.

1. 서 론

전동기 구동에 가장 널리 사용되는 PI(Proportional Integral) 제어는 전류, 토크, 속도 및 위치 제어에 cascade한 형태로 널리 사용된다. 전류 제어 시 입력 전압에 따라 PWM이 만들어 낼 수 있는 전압의 크기가 제한됨에 따라 전류 제어기의 출력과 유도전동기에 입력되는 값이 다를 수 있다. 이럴 경우 제어기가 포화되어 windup현상을 야기시킨다. Windup현상은 큰 오버슈트 및 느린 정착 시간과 같은 제어 성능을 저하시키고, 심각한 경우 시스템의 불안정을 초래한다. 이러한 windup현상을 극복하기 위해 tracking back calculation, limited integrator 등과 같은 다양한 anti windup 기법이 연구되었다[1] [3].

본 논문에서는 유도전동기의 전류제어를 위한 새로운 anti windup PI 전류 제어기를 제안한다. 제어기가 포화영역에서 동작할 경우 적분 상태의 정상상태 값을 이용하여 제어하게 된다. 제안한 anti windup PI 전류 제어기는 유도전동기에 적용하여 실험을 통해 그 성능을 보이고, 오버슈트 및 정착 시간과 같은 제어기 성능이 개선되었음을 보여줄 것이다.

2. Anti-windup PI 전류 제어

유도전동기의 전류 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{i}_{ds} &= -\frac{1}{\sigma\tau_s}i_{ds} + \omega_c i_{qs} + \frac{\omega_b}{\sigma X_s}v_{ds} \\ \dot{i}_{qs} &= -\frac{1}{\sigma\tau_s}i_{qs} - \frac{\omega_c}{\sigma}i_{ds} + \frac{\omega_b}{\sigma X_s}v_{qs} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 i_{ds} 와 i_{qs} 는 d축 및 q축 전류 명령을, v_{ds} 와 v_{qs} 는 d축 및 q축 입력 전압을 나타내고, ω_c 와 ω_b 는 각각 전기 각속도와

기준 각속도를 나타낸다. 또한 $\sigma = 1 - X_m^2/(X_s X_r)$, $\tau_s = X_s/(\omega_b R_s)$ 와 같고, 여기서 X_m , X_s , X_r 그리고 R_s 는 각각 자화 임피던스, 고정자 임피던스, 회전자 임피던스 그리고 고정자 저항을 나타낸다.

A. 제안한 Anti-windup PI 전류 제어기

그림 1과 같이 제안한 PI 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{ds} &= K_p e_{ds} + K_i q_{ds} \\ u_{qs} &= K_p e_{qs} + K_i q_{qs} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K_p 및 K_i 는 각각 비례이득 및 적분이득을 나타내고, e_{ds} 와 e_{qs} 는 각각 d축 및 q축 전류 오차를 나타낸다. 제안한 PI 제어기의 적분상태 값은 다음과 같이 분리하여 제어한다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{ds} &= \begin{cases} e_{ds} & \text{if } u_{ds} = v_{ds} \\ \omega_i(q_{dss} - q_{ds}) & \text{if } u_{ds} \neq v_{ds} \end{cases} \\ \dot{q}_{qs} &= \begin{cases} e_{qs} & \text{if } u_{qs} = v_{qs} \\ \omega_i(q_{qss} - q_{qs}) & \text{if } u_{qs} \neq v_{qs} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ω_i 는 적분상태 값의 갑작스러운 변화를 막기 위해 적용된다. q_{ss} 는 적분상태의 정상상태 값을 나타낸다. 또한 $u_{ds} = v_{ds}$ 및 $u_{qs} = v_{qs}$ 일 경우를 선형영역, $u_{ds} \neq v_{ds}$ 및 $u_{qs} \neq v_{qs}$ 일 경우를 포화영역이라 한다.

B. 적분상태의 정상상태 값 구하기

식 (2)에서의 전류 오차는 다음과 같다.

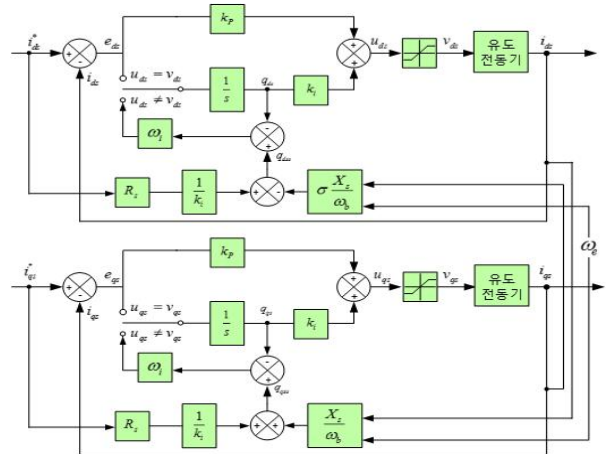


그림 1 제안한 Anti-windup PI 전류 제어기

$$e_{ds} = i_{ds}^* - i_{ds}$$

$$e_{qs} = i_{qs}^* - i_{qs} \quad (4)$$

여기서 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 는 d축 및 q축 전류명령을 나타낸다. 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 오차 방정식을 얻어낼 수 있고, 얻어진 오차 방정식을 선형영역에서 동작하는 PI 제어기의 미분항은 0이라는 특성을 적용하여 정리하게 되면 다음과 같은 정상상태에서 적분상태 값을 얻어낼 수 있다.

$$q_{dss} = \frac{1}{K_i} (R_s i_{ds}^* - \sigma \frac{\omega_c X_s}{\omega_b} i_{qs})$$

$$q_{qss} = \frac{1}{K_i} (R_s i_{qs}^* + \frac{\omega_c X_s}{\omega_b} i_{ds}) \quad (5)$$

제안한 PI 제어기는 식(5)의 값을 적분상태의 제어에 이용한다.

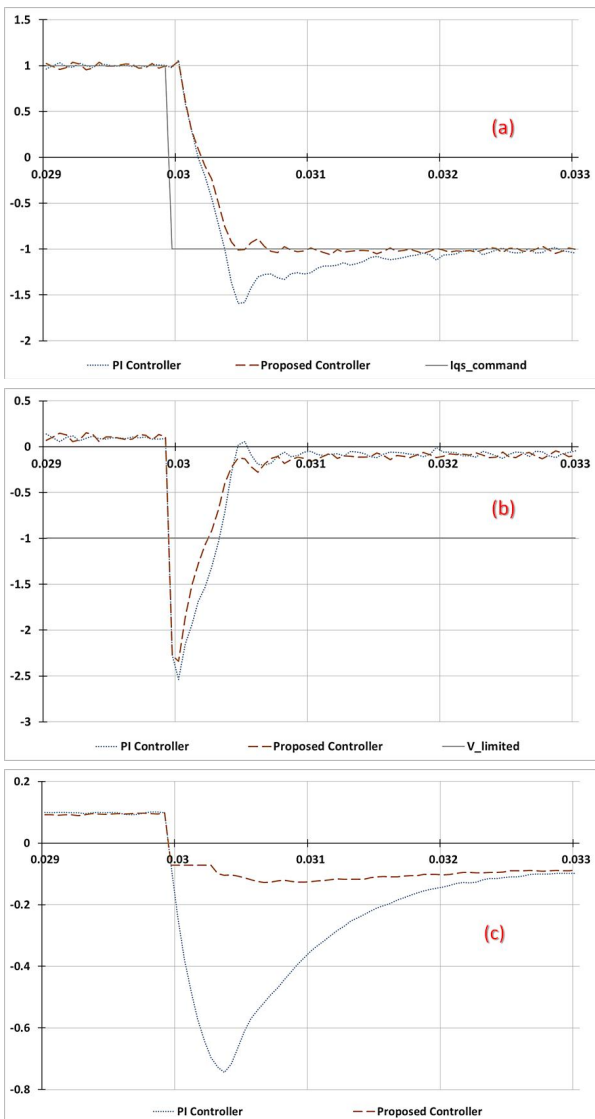


그림 2 (a)q-축 전류 응답(: 전류명령, ···: PI controller without anti-windup, - -: proposed anti-windup PI control), (b)q-축 전압(: 전압제한, ···: PI controller without anti-windup, - -: proposed anti-windup PI control), (c)q-축 적분상태(···: PI controller without anti-windup, - -: proposed anti-windup PI control)

3. 실험 결과

제안한 anti windup PI 전류 제어기를 SVPWM VSI(Space Vector PWM Voltage Source Inverter)를 적용한 유도전동기에 적용하였다. 실험에 적용된 유도전동기의 파라메타는 Table 1에 표시했다. 제어 대상은 q축 전류이다.

Table 1 Proposed anti-windup PI current control

746[W], 220[V], 4[pole], 60[Hz], 1730[rpm]
$R_s=1.985[\Omega]$, $R_r=1.73[\Omega]$, $X_m=57.65[\Omega]$
$X_s=59.6[\Omega]$, $X_r=60.57[\Omega]$, $V_{dc}=310[V]$

전류 명령은 $t=0.02s$ 에서 $i_{qsc}=1[pu]$, $t=0.03s$ 에서 $i_{qsc}=-1[pu]$ 의 값을 갖는 사각파 명령이다. 정착시간은 2.1[ms], PWM주파수는 20[kHz]로 설정하였다. PI 제어기의 이득은 $K_p=1.126$, $K_i=1731$ 이다. $\omega_i=0.275$ 이며, 적분이득과 설정한 정착시간의 곱을 역을 취하여 얻어낼 수 있다.

그림 2는 사각파 전류 명령에서 역방향 전류 명령에 따른 (a)q 축 전류 응답 특성, (b)q 축 전압 및 (c)적분상태를 실험을 통해 얻은 그래프이다. (a)에서 보이는 것과 같이 종래의 PI 제어기와 달리 제안한 anti windup PI 제어기의 경우 오버슈트가 거의 없으며 또한 빠르게 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. (b)는 전류 명령에 따라 요구되는 전압의 크기와 제한을 나타낸 그래프이다. (c)는 전압제한에 발생한 경우의 적분상태를 나타낸 그래프이며, 보이는 것과 같이 전압제한이 있을 경우 정상상태에서의 적분 상태 값을 이용하여 적분상태 값을 적절하게 조절함으로써 전류 응답 특성을 개선시켰음을 알 수 있다.

4. 결 론

유도전동기의 전류 제어 시 입력제한에 의해 발생하는 windup현상을 개선하기 위해 적분상태의 정상상태 값을 이용한 anti windup PI 전류 제어기를 제안하였다. 제안한 anti windup PI 전류 제어기는 유도전동기의 전류제어에 적용하여 오버슈트 및 정착시간과 같은 제어 성능이 개선되었음을 보였다.

이 논문은 (주)삼현의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] H. B. Shin and J. G. Park, "Anti Windup PID Controller with Integral State Predictor for Variable Speed Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.59, no.3, pp. 1509 1516, March 2012.
- [2] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current Control Techniques for Three Phase Voltage Source PWM Converters: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691 703, Oct. 1998.
- [3] H. B. Shin, "New antiwindup PI controller for variable speed motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 3, pp. 445 450, Jun. 1998.