

유도전동기의 적분 상태 예측기를 갖는 Anti-Windup PI 전류제어기

서은성, 정웅도, 이형란, 신휘범
경상대학교 전기공학과

Anti-Windup PI Current Control with Integral State Predictor for Induction Motor

Eun sung Seo, Woong Do Jung, Xin lan Li, Hwi Beom Shin
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

ABSTRACT

비례 적분(PI) 제어기 출력이 포화되었을 때, windup현상이 나타나며 이것은 큰 오버슈트 및 느린 정착 시간과 같은 성능 저하를 야기시킨다. 이 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 적분 상태 예측기를 갖는 Anti windup PI제어기를 이용한 전류제어 방법을 제안한다. PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 성능을 증명하였다. 이 방법은 PI제어기 출력이 포화되었을 경우와 그렇지 않을 경우에 따라 적분 상태가 각각 제어된다. 실험결과는 PI제어 방법과 비교하여 오버슈트 및 정착 시간과 같은 제어 성능이 개선되었음을 보여준다.

1. 서론

전류제어는 빠른 동특성 목적과 피크 전류 보호를 위해 내부 피드백에 적용된다. PI제어기는 일반적으로 제어 입력 제한이 무시되는 선형 영역에서 설계되기 때문에, 페루프 성능은 기대한 성능보다 상당히 저하될 수 있다. 다시 말해, 인버터가 출력할 수 있는 전압 벡터의 크기 제한에 따른 제어기의 출력과 전류 방정식(Plant)의 입력이 다를 경우 windup 현상이 나타날 수 있고, 이는 큰 오버슈트, 느린 정착시간과 같은 성능 저하를 야기시킨다.

이 논문에서는 windup 현상으로 인해 발생할 수 있는 성능 저하를 개선하기 위해 새로운 Anti windup PI 제어 방법을 제시하고, 분석한다. 적분 상태는 PI 제어기 출력이 포화되었을 경우와 그렇지 않을 경우에 따라 각각 따로 제어한다. 시뮬레이션 결과는 일반적인 PI 제어기와 제한한 Anti windup PI 제어기를 비교, 분석하고, 개선된 제어 성능을 보여준다.

2. 제안한 ANTI-WINDUP PI 전류제어 방법

동기좌표계에서의 유도전동기 전류 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 $\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r}$, $\tau_s = \frac{X_s}{\omega_b R_s}$ 이고, v_{ds} 와

v_{qs} 는 Plant 입력을 말한다. Plant 입력 v_{ds} 와 v_{qs} 는 인버터 출력제한으로부터 다음과 같이 제한된다.

$$v = \begin{cases} U_h & \text{if } u > U_h \\ u & \text{if } U_l \leq u \leq U_h \\ U_l & \text{if } u < U_l \end{cases} \quad (2)$$

여기서 u 는 제어기 출력을 의미한다. $u = v$ 일 때를 선형범위, $u \neq v$ 일 때를 포화범위라 할 것이다.

선형범위에서 동작하는 PI 제어기 출력은 다음과 같다.

$$\begin{cases} u_{ds} = k_p e_{ds} + k_i q_{ds} + u_{ffds} \\ u_{qs} = k_p e_{qs} + k_i q_{qs} + u_{ffqs} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 k_p , k_i , u_{ffds} , u_{ffqs} 는 각각 비례이득, 적분이득, Feedforward 항을 나타낸다. u_{ffds} , u_{ffqs} 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} u_{ffds} = -\sigma \frac{\omega_e \cdot X_s}{\omega_b} i_{qs} \\ u_{ffqs} = \frac{\omega_e \cdot X_s}{\omega_b} i_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

오차 e_{ds} , e_{qs} 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} e_{ds} = i_{ds}^* - i_{ds} \\ e_{qs} = i_{qs}^* - i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 i_{ds}^* , i_{qs}^* 는 전류 명령을 나타낸다.

제안한 Anti windup PI 제어기는 적분상태를 선형범위일 때와 포화범위일 때 각각 나누어 다음과 같이 제어한다.

$$q = \begin{cases} e & \text{if } u = v \\ \omega_i (\hat{q}_{ss} - q) & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (6)$$

여기서 ω_i 는 적분기에 초기값을 로딩하기 위한 저역 필터의 양의 파라메타 값이고, \hat{q}_{ss} 는 정상상태의 적분상태를 예측한 값이다. \hat{q}_{ss} 는 식을 통해 구할 수 있다. 식 (1)과 (5)를 이용하여 오차 동특성을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{e}_{ds} = -\frac{1}{\sigma\tau_s}e_{ds} - \frac{\omega_b}{\sigma X_s}u_{ds} + \frac{1}{\sigma\tau_s}i_{ds}^* + \frac{\omega_e}{\sigma}i_{ds} \\ \dot{e}_{qs} = -\frac{1}{\sigma\tau_s}e_{qs} - \frac{\omega_b}{\sigma X_s}u_{qs} + \frac{1}{\sigma\tau_s}i_{qs}^* - \omega_e i_{qs} \end{cases} \quad (7)$$

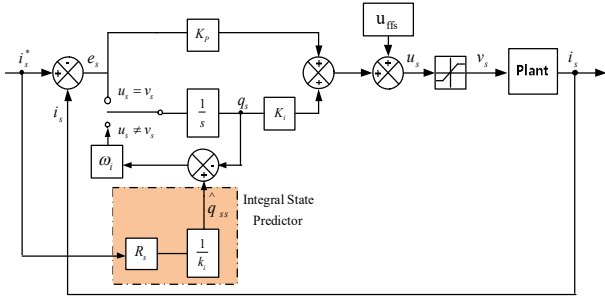


그림 1 제안한 Anti-Windup PI 제어 블록 다이어그램

식(7)에 식(3)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ds} &= -\frac{1}{\sigma\tau_s} e_{ds} - \frac{\omega_b}{\sigma X_s} (k_p e_{ds} + k_i q_{ds}) + \frac{1}{\sigma\tau_s} i_{ds}^* \\ \dot{e}_{qs} &= -\frac{1}{\sigma\tau_s} e_{qs} - \frac{\omega_b}{\sigma X_s} (k_p e_{qs} + k_i q_{qs}) + \frac{1}{\sigma\tau_s} i_{qs}^* \end{aligned} \quad (8)$$

정상상태에서의 오차는 0이므로 이를 적용하여 정리하면 다음과 같은 예측한 정상상태에서의 적분상태 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{q}_{dss} &= \frac{R_s}{k_i} i_{ds}^* \\ \hat{q}_{qss} &= \frac{R_s}{k_i} i_{qs}^* \end{aligned} \quad (9)$$

그림 1은 제안한 적분 상태 예측기를 갖는 Anti windup PI 제어기의 블록 다이어그램이다. PI 제어기가 선형범위에서 동작할 때의 적분기 입력은 출력 오차와 연결되고, 포화범위에서 동작할 때의 적분기 입력은 예측된 정상상태의 적분상태 값과 연결된다. 이때 갑작스러운 적분상태 변화를 막기 위해 저역 필터를 통해 값이 로딩된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 Anti windup PI 제어기의 성능을 증명하기 위해 PSIM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 비교 대상은 일반적인 PI 제어기이다. 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도전동기 파라메타

746[W], 220[V], 4[pole], 60[Hz], 1730[rpm]
$R_s=1.985[\Omega]$, $R_r=1.73[\Omega]$, $X_m=57.65[\Omega]$
$X_s=59.6[\Omega]$, $X_r=60.57[\Omega]$, $V_{dc}=45[V]$

전압제한은 SVPWM VSI의 최대 출력값인 $(1/\sqrt{3})V_{dc}$ 이다. 그림 2는 일반적인 PI 제어기의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 PI 이득은 $k_p=0.348$, $k_i=198$ 이다. 전류 명령은 d축의 경우에서 $t=0s$ 에서 $i_{ds}=1pu$ 이고 q축의 경우 $t=0.05s$ 에서 $i_{qs}=1pu$, $t=0.1s$ 에서 $i_{qs}=2pu$ 이다. 그림 2에서 보이는 것과 같이 전압이 포화되었을 경우 큰 오버슈트 및 느린 정착시간을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 인버터의 전압 제한으로 인해 발생할 수 있는 제어 성능 저하를 잘 보여주고 있다.

그림 3은 제안한 Anti windup PI 제어기의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 조건은 일반적인 PI 제어기의 경우와 동일하다. 그림 3에서 보이는 것과 같이 전압이 포화되었을 경우 일반적인 PI 제어기와는 달리 오버슈트 및 정착시간과 같은 제어 성능이 개선된 것을 볼 수 있다.

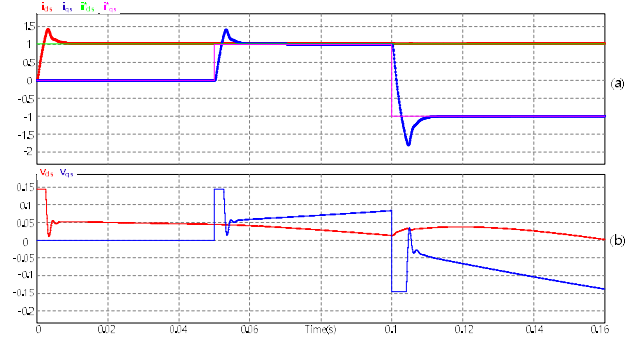


그림 2 PI 제어기 시뮬레이션 결과 (a) 전류, (b) Plant 입력 전압

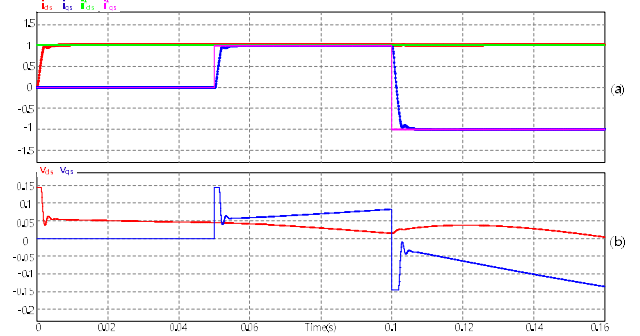


그림 3 Anti-Windup PI 제어기 시뮬레이션 결과 (a) 전류, (b) Plant 입력 전압

4. 결론

인버터 출력전압의 제한에 따른 windup 현상을 개선하기 위해 Anti windup PI 제어기를 제안했다. 이는 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 일반적인 PI 제어기와 비교하였고, windup 현상으로 인해 나타나는 큰 오버슈트 및 느린 정착시간과 같은 제어 성능이 개선되었음을 보여주었다.

본 연구는 한국서부발전(주)의 지원에 의하여 기초전력연구원(11103)주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] Hwi Beom Shin, and Jong Gyu Pack, "Anti Windup PID Controller With Integral State Predictor for Variable Speed Motor Drives", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.59, no.3, March 2012
- [2] Xin lan Li, Jong Gyu Park, and Hwi Beom Shin, "Comparison and Evaluation of Anti Windup PI Controller", Journal of Power Electronics, vol.11, no.1, pp.45-50, January 2011