

PI, P_LPF 절환 제어기를 이용한 고성능 전동기 구동 시스템 설계

김정남^{*}, 조내수^{*}, 권우현^{*}, 최연호^{**}, 박철우^{***}
 경북대^{*}, 경일대^{**}, 영진전문대^{***}

Design of High Performance Motor Driving System by using PI, P_LPF switching controller

Jung-Nam Kim^{*}, Nae-Soo Cho^{*}, Woo-Hyen Kwon^{*}, Youn-Ho Choi^{**}, Chul-Woo Park^{***}
 Kyungbuk National University^{*}, Kyungil University^{**}, Yeungjin College^{***}

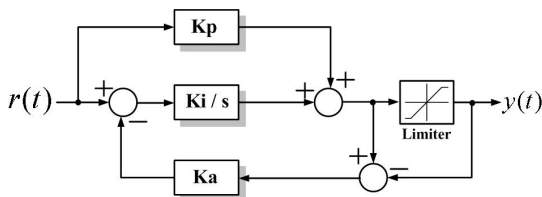
Abstract - This paper presents a switching system of speed controller between PI (Proportional Integrator) and P_LPF (Proportional_Low pass filter) to improve overshoot and slow settling time in DC motor. When the integrator is saturated in the PI controller, the error signal is integrated continuously. For preventing the state, the Anti-windup scheme is proposed. But the Anti-windup scheme dose not show stable characteristics in the whole speed command section after tuned a gain. By using P_LPF switching system these problems are improved and there is no need to tune of user hereafter, when the integrator is saturated. The proposed method is verified by the simulation results using MATLAB SIMULINK.

1. 서 론

현재 산업의 발달과 산업체의 기술향상으로 인하여 고성능 전동기 구동 시스템의 응용분야가 넓어지고 전동기의 위치 및 속도를 제어하기 위한 알고리즘이 무수히 많이 연구되고 있다. 고성능 전동기 구동 시스템에서 사용되어지는 제어기들의 종류로는 퍼지제어, 신경망제어, PID 제어기가 있다. 이 중 비교적 성능이 우수한 PI 제어기가 많이 사용된다. PI 제어기는 경제적이며 모델링 오차에 강한 장점이 있지만, 적분 제어기의 포화에 의한 누적 현상에 의해서 응답의 오버슈트 및 느린 정착 시간을 초래한다^[1]. 이러한 PI 제어기에서 오차 신호가 계속 적분되면서 포화상태에 머물러 있는 제어기의 단점을 보완하기 위해 Anti-windup 기법이 제시되었지만 속도가 변화되는 전 구간에서 안정된 응답 특성을 보이지는 않는 문제점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결 하기위해서 직류 전동기의 수학적 등가 모델을 바탕으로 PI, P_LPF 절환 제어기를 제안 한다. 제안된 제어기의 타당성을 확인 하기위해서 MATLAB SIMULINK를 이용한 모의 실험수행 하였으며, 이 결과로부터 제안된 제어기의 성능을 확인하였다

2. Anti-windup을 이용한 PI 속도 제어기

그림 1은 Anti-windup을 이용한 PI 속도 제어기 블록도를 나타낸다.



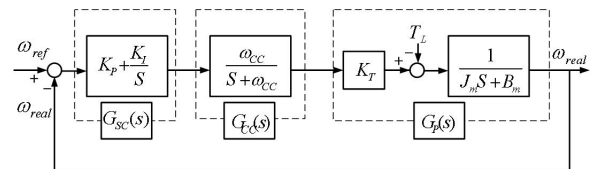
〈그림 1〉 Anti-Windup을 이용한 속도 PI 제어기

적분 제어기는 입력된 속도의 오차신호를 계속 적분하여 정상상태 오차를 제거할 수 있다. 그러나 과거의 오차를 계속 적분하여 출력을 만들기 때문에 제어기의 출력이 제한된 경우 오차가 적분기에 계속 누적되면서 적분기 내부에 쌓인 적분 값으로 인하여 제어기의 출력은 피드백 값에 관계없이 최대값 또는 최소값에 머물러있게 되어 실질적으로 페루프 제어의 의미를 잃어버리게 된다. 이 결과로 제어기의 출력은 오차에 대해 적절히 반응되지 않아 응답에 큰 오버슈트가 발생하고 정착시간이 느려지게 된다. 이를 방지하기 위해 출력의 제한에 따라 적분기 내부 값을 제한하는 Anti-windup 방식이 제안되었다^{[2][3]}. 그러나 속도 영역에 따라 Anti-windup 이득 K_w 를 변화시켜야 좋은 응답특성을 얻을 수 있다.

3. PI, P_LPF 절환 시스템 제어기 설계

3.1 PI 속도 제어기

그림 2는 일반적인 PI 속도 제어기의 구조를 나타내고 있다. 여기서, $G_{sc}(s)$, $G_{cc}(s)$, $G_p(s)$ 는 각각 속도 제어기와 전류 제어기 및 기계적 시스템을 나타내고 있다. K_p, K_i 는 PI 속도 제어기 이득을, ω_{cc} 는 전류 제어기의 대역폭을, K_T, J_m, B_m 은 각각 토크 상수와 관성 계수 및 마찰계수를 나타낸다.



〈그림 2〉일반 PI 속도 제어기 구조

그림 2에서 전류 제어기 대역폭을 이상적으로 가정할 경우 전류 제어기의 전달 특성은 $G_{cc}(s) = 1$ 로 주어지며 전달함수는

$$G_s^o(s) = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}) \cdot \frac{K_T}{J_m s + B_m} \quad (1)$$

$$G_s^e(s) = \frac{(\frac{K_p K_T}{J_m}) \cdot (s + \frac{K_i}{K_p})}{s^2 + (\frac{B_m + K_p K_T}{J_m})s + \frac{K_i K_T}{J_m}} \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 마찰계수 B_m 에 의한 토크는 부하에 포함된 것으로 가정하면 식 (2)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$G_s^e(s) = \frac{(\frac{K_p K_T}{J_m}) \cdot (s + \frac{K_i}{K_p})}{s^2 + \frac{K_p K_T}{J_m} s + \frac{K_i K_T}{J_m}} \quad (3)$$

일반적으로 속도제어기 이득은 전류제어기의 대역폭이 속도제어기 대역폭보다 충분히 크다^[4]. 전류제어기의 대역폭이 속도제어기 대역폭보다 약 5배 이상 ($\omega_{cc} \gg 5\omega_{cs}$)으로 선정하면 전류제어기가 속도제어기에 미치는 영향이 없고, 속도 제어의 응답 특성이나 안정성이 향상된다. 또한 PI 절점 주파수 ω_{pi} 를 ω_{cs} 보다 충분히 작도록 ($\omega_{pi} \ll 1/5\omega_{cs}$) 선정하면, ω_{cs} 부근의 각 주파수에서 PI 제어기의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$G_{pi}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \approx K_{ps} \quad (4)$$

속도제어기의 교차각 주파수 ω_{cs} 부근에서 PI 속도제어기의 Openloop 전달함수는 다음과 같이 간략화 된다.

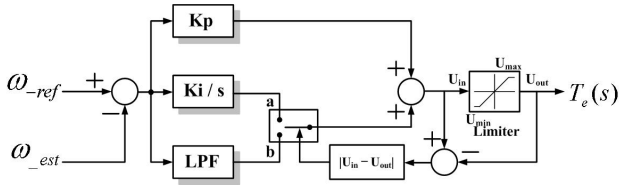
$$G_s^o(s) \approx K_{ps} \frac{K_T}{J_m s} \quad (5)$$

이로부터 비례 이득 K_{ps} 과 적분 이득 K_{is} 는 다음과 같이 구해진다.

$$K_{ps} = \frac{J_m \omega_{cs}}{K_T} \quad (6)$$

$$K_{is} = K_{ps} \omega_{pi} = K_{ps} \frac{\omega_{cs}}{5} = \frac{J_m \omega_{cs}^2}{5 K_T} \quad (7)$$

3.2 제안된 PI, P_LPF 절환 시스템 속도 제어기



〈그림 3〉 제안된 PI, P_LPF 속도 절환 제어기 블록도

그림 3은 PI, P_LPF 속도 절환 제어기의 구조를 나타내고 있다. ω_{ref} , ω_{est} 는 속도 지령치와 실제 속도를 나타내고 있으며, $T_e(s)$ 는 실제 토크 출력이다. 적분기의 포화를 방지하기 위해선 제한기(Limiter)의 입력값과 출력값, U_{in} 과 U_{out} 을 가지고 판단하게 된다.

$$\begin{cases} a, |U_{in} - U_{out}| = 0 \\ b, |U_{in} - U_{out}| \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

식 8과 같이 U_{in} 과 U_{out} 의 값이 같을 때는 PI 제어기로 동작하고, U_{in} 과 U_{out} 이 다를 때는 제안된 P_LPF 제어기로 동작한다. 이때 LPF는 속도에 포함된 오차를 제거한다^[5]. LPF로 절환되었을 때 전달함수는

$$G_s^o(s) = \left(K_{ps} + \frac{K_{LPF}}{s + K_{LPF}} \right) \cdot \frac{K_T}{J_m s + B_m} \quad (9)$$

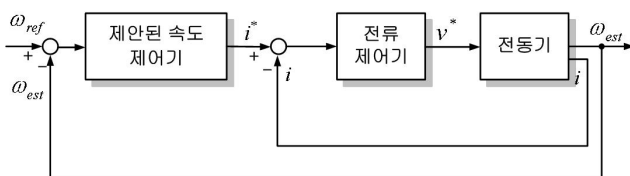
$$G_s^c(s) = \frac{\frac{K_{ps} K_T}{J_m} s + \frac{K_{LPF} K_T}{J_m} (K_{ps} + 1)}{s^2 + \left(K_{LPF} + \frac{K_{ps} K_T}{J_m} \right) s + \frac{K_{LPF} K_T}{J_m} (K_{ps} + 1)} \quad (10)$$

로 주어진다. 식 (9)은 LPF로 절환된 제어기의 개루프 전달 함수이고, 식(10)은 설계를 간단히 하기 위해서 마찰 계수를 부하에 포함 시킨 것으로 가장한 페루프 전달 함수이다. LPF의 절점 주파수는 두 제어기의 성능을 유사하게 만들기 위해서 식 (3)과 식(10)을 비교하구하면 식 (11)으로 주어진다.

$$K_{LPF} = \frac{K_{is}}{K_{ps} + 1} \quad (11)$$

3. 모의실험 및 결과

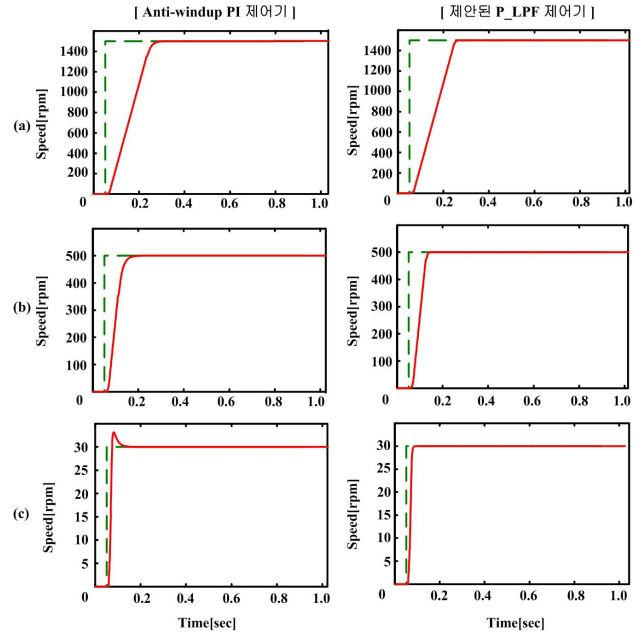
제안된 제어기의 응답 특성을 알아보기 위해서 MATLAB SIMULINK를 이용한 모의실험을 수행 하였다. 모의실험을 위한 전체 시스템 구조는 그림 4와 같이 안정성 향상을 위해 속도제어기와 전류제어기는 직렬 구조로^[6] 구성 하였다. 모의실험에 사용된 직류 전동기 상수는 <표 1>에 나타내었다. PI제어기와 Anti-windup으로 구성된 제어기와 제안된 제어기의 성능은 그림 5와 같이 Anti-windup PI 제어기와, 제안된 P_LPF 제어기에서 0.05초에 속도지령을 주었다. 고속, 중속, 저속 영역에 대해 각각에 대하여 속도 응답 특성으로 확인 하였다. 그림 5의 (a)는 속도 지령을 1500[rpm], (b)는 500[rpm]의 경우에 대해 두 제어기 모두 비슷한 특성을 보이나, 응답 속도에서는 제안된 제어기가 조금 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있고, (c)는 속도 지령 30[rpm]에서의 응답 특성으로 Anti-windup PI 제어기의 경우 오버슈트가 발생하나 제안된 제어기는 오버슈트가 발생되지 않았다. 따라서 제안된 PI, P_LPF 절환 제어기의 경우 속도 영역에 관계없이 좋은 응답 특성을 가짐을 확인 하였다.



〈그림 4〉 제안된 PI, P_LPF 전체 구조

〈표 1〉 전동기 파라미터

| 파라미터 | 크기 | 단위 |
|---------------------------|------|---------------------|
| 정격전력(P) | 10.0 | [kW] |
| 정격전압(V _a) | 260 | [V] |
| 정격회전수(ω _{rpm}) | 1850 | [rpm] |
| 전기자 인덕턴스(L _a) | 6.5 | [mH] |
| 전기자 저항(R _a) | 0.35 | [Ω] |
| 점성 마찰 계수(B) | 0 | [Nm/sec/rad] |
| 토크 상수(K _T) | 1.14 | [Nm/A] |
| 관성 계수(J _m) | 1.14 | [Kgm ²] |
| 역기전력 상수(K _e) | 0.12 | [Nm/A] |



〈그림 5〉 Anti-windup PI 제어기와 제안된 제어기 속도 응답 특성 비교

4. 결 론

Anti-windup PI 제어기는 속도 영역에 따라 windup 이득을 수정하여야 하는 문제점을 가진다. 본 논문에서는 이런 문제점을 해결 하기위해서 PI_LPF 절환 시스템 제어기를 제안 하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 제어기는 속도가 변화되는 전 구간에서 안정된 응답특성을 보임으로써 추가적인 제어기 이득 수정 없이 사용 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 석출기, 배상춘, 이동춘, “고성능 유도전동기 구동을 위한 자동 튜닝 Anti-windup 기법”, 전력전자학회 논문지, 제10권 1호, pp.29-37, 2005.
- [2] C. Bhon and D. P.Atheton, "Ananalysis package comparing PID anti-windup strategies" IEEE Control System Magazine, April, pp.34~40, 1995.
- [3] Y. Peng, D. Vrancic, and R.Hanus, "Anti-windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID controllers", IEEE Control Systems Magazine, aug, pp.48~57, 1996.
- [4] 석출기, 이동춘, “전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동시스템의 속도제어기 설계”, 전력전자학회 논문지, 제7권 5호, pp.465-471, 2002.
- [5] L. Ben-Brahim, and A. Kawamura, "A Fully Digiized Field-Oriented Controlled Induction Motro Drive Using Only Current Sensors", IEEE Trams Ind Electron, vol 39, no 3, pp.241-249, 1992
- [6] 小山正人, 玉井伸三, “산업용 서보모터의 제어시스템 설계”, 대영사, pp.1-12, 2000.