

IPMSM 드라이브에서 전류 제어기의 전류 응답 향상에 관한 연구

노현우*, 안한웅*, 오예준*, 이현기*, 조수연**, 이 주*
한양대*, 자동차부품연구원**

Study on improvement of the current response in IPMSM current controller

Hyun-woo Rho*, Han-woong Ahn*, Ye-Joon Oh*, Hyun-ki Lee*, Su-yeon Cho**, Ju Lee*
Hanyang University*, Korea Automotive Technology Institute**

Abstract - 비례-적분(PD) 제어기 출력이 포화되었을 때, 와인드업(windup) 현상이 나타나게 되는데 이것은 큰 오버슈트 및 느린 응답 특성으로 이어지게 되어 제어기의 성능 저하를 야기한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해서 새로운 방식의 Anti-windup PI제어기를 이용하여 IPMSM 구동에 있어 오버슈트 및 정착 시간 단축과 같은 제어 성능이 개선되었음을 보여준다.

1. 서 론

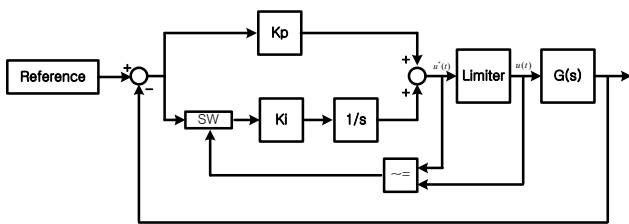
교류 전동기 제어에 있어서 모든 상태변수들이 직류값인 장점을 지닌 동기 좌표계 비례-적분 제어기가 광범위하게 사용되고 있다. 비례-적분 제어기에는 적분기가 들어가게 되는데 이 적분기는 과거의 오차를 계속 적분하여 출력을 만들어내기 때문에 정상상태 오차를 제거하는 장점을 지니고 있다. 하지만 누적된 오차를 계속 적분하는 특성으로 인해 출력이 제한된 시스템에서는 오차 처리가 지연되고 누적된 오차로 인해 포화되는 현상, 즉 적분기의 Wind-up이 나타나게 된다. 이 경우 제어 동특성을 심각히 저하시키는 것뿐만 아니라 폐루프 시스템 자체를 불안정하게 할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에 안티와인드업에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 기존의 안티와인드업은 제어 입력이 포화되었을 때 적분기에서 누적된 값을 빼주는 방법과 특정조건이 만족될 경우 적분기의 온-오프를 조절하는 방법으로 나눌 수 있다. 하지만 응답속도 지연 및 응답에 오버슈트의 발생을 확실하게 해결해 주지 못하고 있다. 본 논문에서는 전류제어기에서 오버슈트를 최소화 하고 빠른 응답시간을 가지게 하는 새로운 안티와인드업 방식을 제안하고 시뮬레이션을 통해 기존의 안티와인드업 기법과 비교하여 그 결과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 기존 적분기 안티와인드업 기법

기존의 안티와인드업 기법은 조건에 따라 적분하는 방법(Conditional Integration), 역계산에 의한 방법(Back Calculation), 적분기의 출력을 제한하는 방법(Limited Integration) 등이 있다.

2.1.1 조건에 따라 적분하는 방법(Conditional Integration)

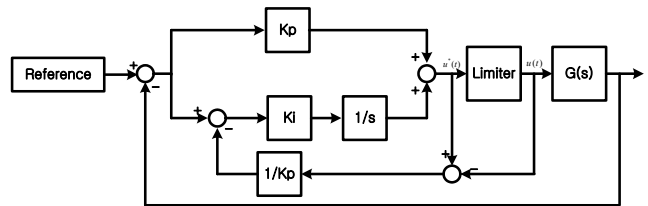


<그림 1> 조건 적분 기법의 블록도

조건에 따라 적분하는 방법은 그림 1에서와 같이 제어 입력이 리미터에 의해 제한이 되기 시작하면 스위치가 오프 되어 비례제어기만 작동하다가 제한이 끝나게 되면 다시 스위치가 온 되어 비례-적분 제어를 실시하게 된다.

$$\begin{cases} 0 & u^*(t) \neq u(t) \\ e(t) & u^*(t) = u(t) \end{cases} \quad (1)$$

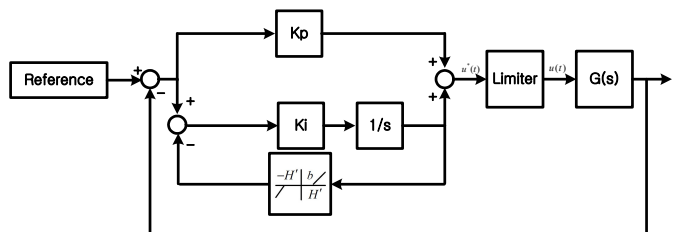
2.1.2 역계산에 의한 방법(Back Calculation)



<그림 2> 역계산에 의한 기법의 블록도

역계산에 의한 방법은 트래킹 안티와인드업이라고도 불리며 그림 2와 같이 표현된다. 제어기 출력이 리미터에 의해 제한되기 시작하면 리미터 입력값과 출력값의 차이를 적분기에 피드백하여 적분기의 입력을 감소시키는 방법이다.

2.1.3 적분기의 출력을 제한하는 방법(Limited Integration)



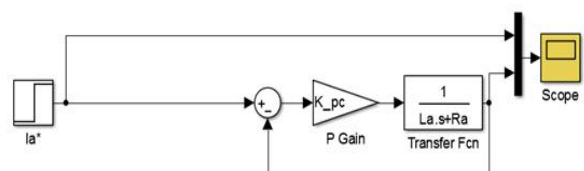
<그림 3> 제한 적분 기법의 블록도

제한 적분 기법은 그림 3과 같은 블록도 구성을 하고 있다. 하단의 리미터의 데드존을 통하여 적분기의 피드백 신호가 만들어져 적분기의 입력을 감소시키는 역할을 하게 된다.

2.2 제한한 안티와인드업 전류제어 방법

기존의 조건부 안티와인드업은 미리 설정된 조건에 따라 적분기가 적분을 수행하거나 수행하지 않는 방식으로 적분기가 포화되었을 때 적분기의 작동이 멈추고 비례제어기만을 이용하여 출력을 내는 방식이다. 적분기가 포화되어 비례제어만을 하는 경우에 정상상태가 오차가 0이 되지 않는 비례제어기의 단점이 나타나게 된다. 본 논문에서는 비례제어기의 정상상태 오차를 미리 보상하는 방식으로 정상상태 오차 및 오버슈트가 개선된 조건부 안티와인드업을 제안한다.

2.2.1 비례전류 제어기 보상 방법



<그림 4> 비례전류 제어기 기본 블록도

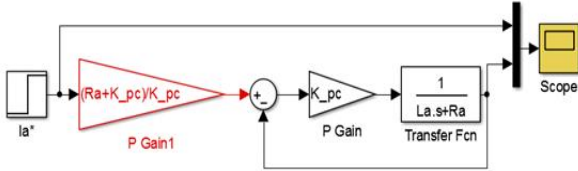
그림 4는 비례제어만 하는 시스템을 나타낸 것으로 시스템의 폐루프 전달함수를 구하면 아래 식(2)와 같다.

$$G_c^0(s) = \frac{K_{pc}}{R_a + K_{pc}} \quad (2)$$

$$G_c^c(s) = \frac{G_c^0(s)}{1 + G_c^0(s)} = \frac{K_{pc}}{L_a s + R_a + K_{pc}}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_c^c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{K_{pc}}{L_a s + R_a + K_{pc}} \cdot \frac{I_a}{s}$$

$$= \frac{K_{pc}}{R_a + K_{pc}} I_a \quad (3)$$

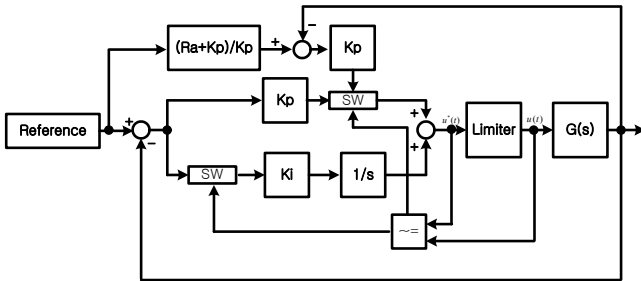


〈그림 5〉 정상상태 오차를 보정한 비례전류 제어기 블록도

최종값 정리를 사용하여 정상출력값을 나타내면 식(3)이 되고 여기서 구한 값을 정상상태 오차를 없애기 위해 제어기 앞단에 보상하게 된다. 이 방식을 조건부 안티와인드업의 비례제어기 앞단에 적용시켜 정상상태 오차를 줄이게 된다.

2.3 시뮬레이션

위에서 구현한 개선된 조건부 안티와인드업은 Matlab/Simulink로 구현하였고 모델링은 그림 6과 같다. 시뮬레이션은 q축 전류에 10A를 인가하여 출력의 응답특성을 파악하는 방식으로 진행하였다. IPMSM의 스펙은 표 1은 시뮬레이션에 적용시킨 IPMSM 모델의 파라미터 값을 기술하였다.



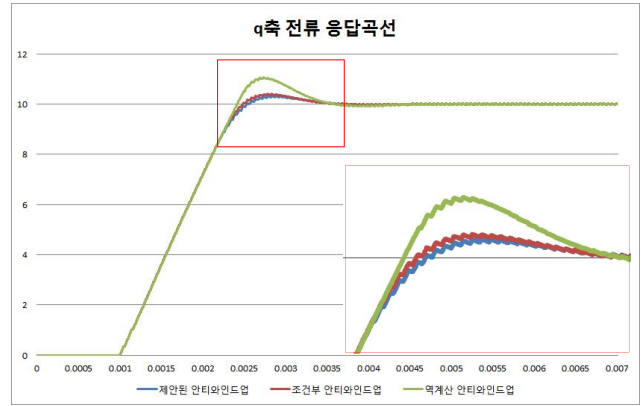
〈그림 6〉 개선된 조건부 안티와인드업 시뮬링크 블록도

〈표 1〉 IPMSM 기본 모델의 세부사항

Vdc	310 [V]	Is_max	3.167 [A]
P	9	Ra	2.85 [Ω]
Ld	20.268*10 ⁻³ [H]	Lq	22.675*10 ⁻³ [H]
Phi_a	0.087061 [Wb]	Jm	5.7*10 ⁻⁵ [kg·m ²]
B	0	TL	1 [Nm]

〈표 2〉 시뮬레이션 결과

	피크값	정상상태 도달시간
제한한 기법	10.32557	4.6*10 ⁻³
조건부 기법	10.40889	4.6*10 ⁻³
역계산 기법	11.06096	4.65*10 ⁻³



〈그림 7〉 시뮬레이션을 통한 전류 응답곡선

표 2는 시뮬레이션을 통해 얻은 결과값으로 제한한 조건부 안티와인드업이 기존의 조건부 안티와인드업 대비 오버슈트가 0.8%, 역계산 안티와인드업 대비 6.64% 개선된 것을 알 수 있다. 정상상태는 세 가지 방식 모두 거의 동일한 시간에 도달한 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 계단(step)입력에 대한 오버슈트 억제 및 정상상태 오차 개선을 하는 개선된 조건부 안티와인드업 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다. 미소한 차이지만 비례제어기의 정상상태 오차를 보상하는 방법으로 오버슈트 및 응답 특성이 개선되었음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] Xinlan Li, "Comparison and Evaluation of Anti-windup PI Controllers"목, 전력전자학술대회 논문집, 602-603, 2010
- [2] MIAO Jing-Li, "A New Anti-Windup PI Controller for Direct Torque Control System", TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol 12, No. 7, 5268-5274, 2014
- [3] 윤원일, "오버슈트 없는 PI제어기의 Anti-Windup 기법", 전력전자학술대회논문집, 538-541, 2005
- [4] 설승기, "전기기기 제어론", 홍릉과학출판사, 2012