

PMSM에 대한 활성화 함수를 가지는 토크 보상기의 속도제어

김흥민, 임근민, 안진우, 이동희
경성대학교

A Speed Control Scheme with The Torque Compensator based on the Activation Function for PMSM

Hong Min Kim, Geun Min Lim, Dong Hee Lee, Jin Woo Ahn
Kyungsoong University

ABSTRACT

This paper presents speed control scheme of the PMSM which has torque compensator to reduce the speed error and ripple. The proposed speed controller is based on the conventional PI control scheme. But the additional torque compensator which is different to the conventional differential controller produces a compensation torque to suppress speed ripple. In order to determine the proper compensation, the activation function which has discrete value is used in the proposed control scheme. With the proposed activation function, the compensation torque acts to suppress the speed error increasing.

The proposed speed control scheme is verified by the computer simulation and experiments of 400[W] PMSM. In the simulation and experiments, the proposed control scheme has better control performance compare than the conventional PI and PID control schemes.

1. 서론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 고효율 특성과 높은 토크 및 제어성이 우수한 반면에, PMSM은 코깅(cogging)현상에 의한 토크 리플 발생과 기계적 부하에 의한 주기적인 속도리플이 발생하는 취약점을 가지고 있다[1, 2]. 제어성을 향상시키기 위한 다양한 연구들이 진행되었으나, 현재 산업용으로 가장 널리 사용되고 있는 제어 방식은 일반적인 PID(Proportional, Integral and Differential) 제어 방식이다. PID 제어기에서 응용 분야의 특성상 높은 제어성을 구현하기 위한 토크 리플을 억제하기 위한 방법으로 퍼지와 결합된 PI 제어기 등이 연구되었다. 이러한 제어방식에도 불구하고, PMSM의 속도 제어 성능은 PID 제어기의 제어 이득에 의존적이다[1, 2].

본 논문에서는 PMSM에 대한 활성화 함수를 가지는 토크 보상기의 속도 제어 방식을 제안한다. 제안하는 속도 제어기는 Anti windup이 적용된 기존의 PID 방식에서 적용하는 PI 제어기를 적용하고 있으나, 미분 제어항에서 제어항이 적용되는 것을 속도오차와 속도오차의 미분항의 상태에 따라 활성화 함수를 이용하여 선택적으로 적용하는 방식이다. 제안된 제어항의 보상토크가 속도제어기에 더해지는 상태는 활성화 함수를 통하여 결정되며, 보상된 토크는 비례 이득과 속도 오차의 곱과 같으며 매우 간단한 수식에 의해 결정될 수 있으며, 전동기 제원의 변경에 따른 고려나 별도의 센서를 필요하지 않는다.

제안된 PID 속도제어기에 의한 PMSM의 속도리플 억제 특성은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. PMSM에 대한 PID 속도 제어기

그림 1은 일반적인 PID 속도 제어기를 나타내고 있다. 그림 1의 Anti windup 제어기는 PID 제어기의 출력인 지령 토크가 전동기와 드라이브의 제한 토크값을 넘어서는 경우에 이를 제한하기 위해 발생하는 오차에 의해 누적되는 오차를 억제하는 역할을 수행한다.

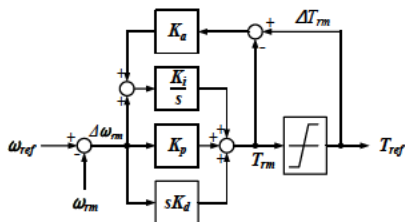


그림 1 PID 속도 제어기
Fig. 1 PID speed controller

각 제어항의 제어이득인 K_p , K_i 및 K_d 가 적절하게 선정되면, 지령토크 T_{ref} 는 속도 오차를 수렴하게 되며, 다음과 같이 결정 될 수 있다.

$$\Delta\omega_{rm} = \omega_{ref} - \omega_{rm} \quad (1)$$

$$T_{rm} = K_p \cdot \Delta\omega_{rm} + \frac{K_i}{s} \cdot (\Delta\omega_{rm} + K_o \cdot \Delta T_{rm}) + sK_d \cdot \Delta\omega_{rm} \quad (2)$$

$$\Delta T_{rm} = T_{ref} - T_{rm} \quad (3)$$

그림 2는 PID 제어기에서 속도 오차 $\Delta\omega_{rm}$ 에 따른 각 제어항의 출력의 상태를 나타내고 있다. 그림 2에서 비례 제어항은 속도오차와 동일한 형태로 속도 오차를 보상하기 위한 출력을 나타내고 있으며, 적분 제어항은 누적 오차에 대한 제어 출력을 나타내고 있다. 미분 제어항은 속도 오차의 변동을 억제하는 방향으로 제어 출력을 발생한다.

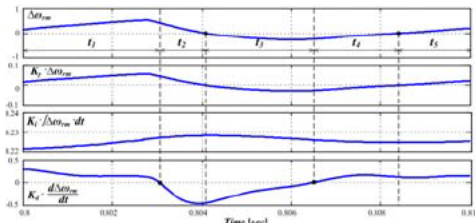


그림 2 PID 속도 제어기에서 각 제어 구간의 속도 오차
Fig. 2 Speed error and each control terms in PID speed controller

그림 2에서 구간 t_1 과 t_3 에서 속도오차와 동일한 방향으로 미분 제어항이 작용되고 있으므로, 이 미분 제어의 출력은 속도의 오차를 감소시키면서 속도의 변동을 억제하는 방향으로 작용하게 된다. 하지만, 구간 t_2 와 구간 t_4 에서 미분 제어항은 속도 오차의 변동을 억제하도록 하지만, 실제 속도 오차가 감소하는 방향에서 오히려 속도 오차를 증가시키는 방향으로 작용하게 된다. 따라서, 미분 제어이득이 높게 설정되는 응용에서 이 구간에서는 속도의 진동을 크게 하는 원인이 되며, 적절한 제어 이득의 선정을 어렵게 하게 된다.

3. 제안된 속도 리플 보상기

본 논문에서는 속도 오차와 속도오차의 미분항과 크기와 방향을 분석하여, 간단하게 보상토크의 크기와 출력을 결정하는 방식으로 그 구현이 매우 간단하고, 실시간 보상이 가능하다.

제안된 방식은 그림 2의 PID 속도 제어기의 제어 출력에서 미분 제어항의 제어항이 실제 제어기에 적용되는 상태를 검토하여 선택적으로 속도 오차를 적용하는 방식이다.

그림 3은 제안된 토크 보상기의 활성화 함수를 나타내고 있다.

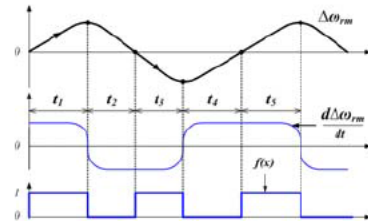


그림 3 제안된 토크 보상기의 활성화 함수
Fig. 3 The activation function of the proposed torque compensator

그림 3에서 구간 t_1 과 t_3 와 같이 속도 오차와 속도오차의 미분항과

부호가 같은 구간에서 활성화 함수 $f(x)$ 는 1로 되고, 구간 t_2 와 t_4 와 같이 속도 오차와 속도오차의 미분항이 서로 부호가 다른 구간에서 활성화 함수 $f(x)$ 는 0이 되며, 활성화 함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{when } ((\Delta\omega_{rm} \cdot \Delta\omega_{rm}) < 0) \\ 1 & \text{when } ((\Delta\omega_{rm} \cdot \Delta\omega_{rm}) > 0) \end{cases} \quad (4)$$

그림 4는 속도 오차에 따른 보상토크를 나타낸다. 그림 4(a)에서 보상토크 T_{com} 는 비례이득 K_c 를 가지는 비례 제어 구간과 유사하고 크기는 속도 오차와 비례한다. 보상토크 T_{com} 는 활성화 함수에 따라 출력이 결정되며 다음과 같이 계산된다.

$$T_{com} = f(x) \cdot K_c \cdot \Delta\omega_{rm} \quad (5)$$

그림 4(b)에서 활성화 함수는 속도오차의 미분항에 따라서 변하며, 보상토크의 출력은 활성화 함수에 따라 효율적으로 발생시킴으로써 토크의 리플을 억제할 수 있다.

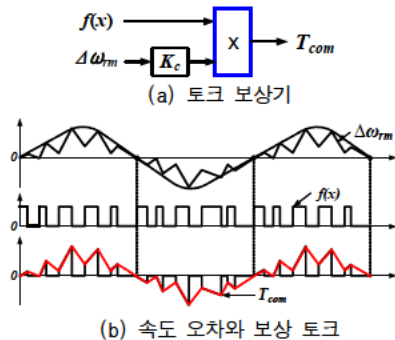


그림 4 속도 오차에 따른 보상 토크
Fig. 4 Block diagram and compensated torque according to the speed error

그림 5는 제안된 토크 보상기를 가지는 속도 제어기를 나타낸다. 그림 5에서 제안된 속도 제어기는 PI 속도 제어기를 기초로 하며, 속도 오차와 리플을 미분 제어기 대신 토크 보상기를 추가하여 속도 리플과 속도 오차를 감소시킬 수 있다. 제어 블록도에서 LPF(Low Pass Filter)는 속도 오차의 고주파 노이즈 성분을 억제하기 위한 필터함수이며, 차단 주파수는 500[Hz]로 설계 되었다.

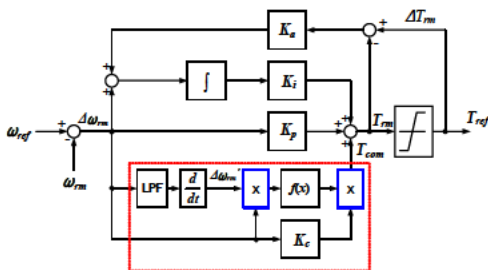


그림 5 제안된 속도 제어기
Fig. 5 The proposed speed control scheme

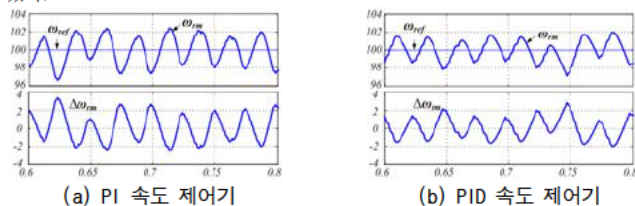
제안된 속도 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$T_{ref} = K_p \cdot \Delta\omega_{rm} + \int K_i \cdot (\Delta\omega_{rm} + K_a \cdot \Delta T_{rm}) \cdot dt + T_{com} \quad (6)$$

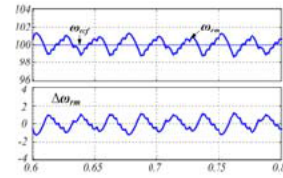
when, $\Delta T_{rm} = T_{ref} - T_{rm}$

4. 시뮬레이션 결과

제안된 테드타임 보상 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 그림 4의 시뮬레이션 결과에서 PI 제어기의 경우에는 토크 리플의 영향에 따라 비교적 높은 속도의 리플을 나타내고 있으며, PID 제어기는 이보다 조금 낮은 속도 리플을 나타내고 있다. 그림 4(b)에서 제안된 방식에서는 PID 제어기보다 우수한 제어 성능을 보이고 있다.

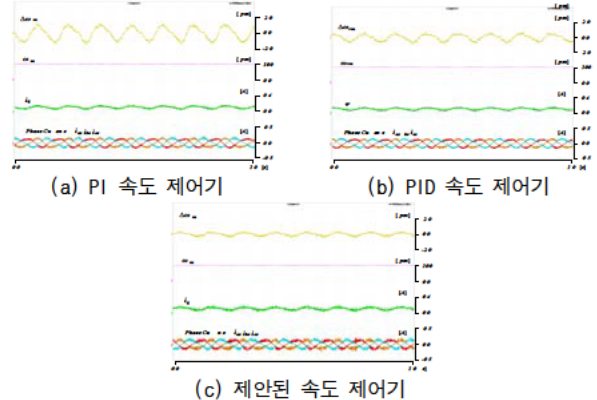


(a) PI 속도 제어기 (b) PID 속도 제어기

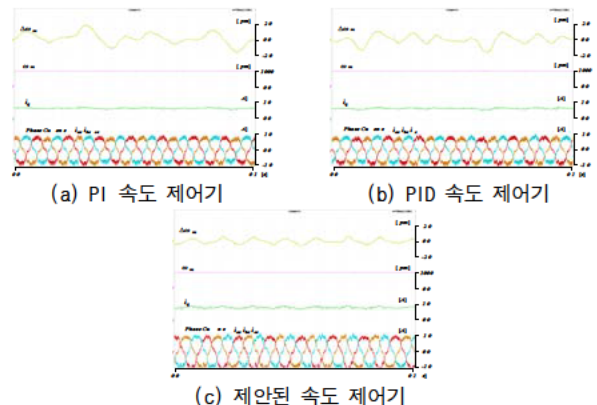


(c) 제안된 속도 제어기
그림 6 100[rpm]에서의 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 6 Compared simulation results at 100[rpm]

그림 7(c)와 그림 9(c)의 실험 결과에서 제안된 방식이 안정적으로 속도의 오차를 감소시키며, PI 및 PID 제어기에 비하여 우수한 제어 특성을 보이고 있다.



(a) PI 속도 제어기 (b) PID 속도 제어기
(c) 제안된 속도 제어기
그림 7 100[rpm]에서의 실험 결과
Fig. 7 Experimental results at 100[rpm]



(a) PI 속도 제어기 (b) PID 속도 제어기
(c) 제안된 속도 제어기
그림 7 1000[rpm]에서의 실험 결과
Fig. 7 Experimental results at 1000[rpm]

5. 결론

본 논문에서는 PMSM에 대한 활성화 함수를 가지는 토크 보상기의 속도 제어기를 제안하였다. 제안된 속도 제어기는 속도 오차와 리플을 미분 제어기 대신 토크 보상기를 추가하여 속도 리플과 속도 오차를 감소시킬 수 있다. 보상토크는 속도오차와 속도오차의 미분항의 부호에 의해 결정되는 출력상태 함수와 속도오차 그리고 비례항의 곱의 형태로 간단히 결정될 수 있으며, 간단한 구현으로 개선된 속도 제어 특성을 구현하는 장점을 가진다. 제안된 속도 제어기는 시뮬레이션과 실제 400W 전동기의 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

[참고 문헌]

- [2] S. Carriere, S. Caux, M. Fadel, "Optimised Speed Control in State Space for PMSM Direct Drives", IET Electric Power Applications, Vol. 4, No. 3, pp. 158-168, 2010.
- [4] M. L. Corradini, G. Ippoliti, S. Longhi, G. Orlando, "A Quasi Sliding Mode Approach for Robust Control and Speed Estimation of PM Synchronous Motors", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 2, pp. 1096-1104, 2012.