

영구자석 동기 전동기의 강인한 H[∞] 속도 제어기 설계

고다솔*, 장소현*, 장경민*, 장지혜*, 조남훈*
 송실대학교 전기공학과*

Robust H[∞] Speed Controller Design of permanent magnet synchronous motor

Da-Som Ko*, So-Hyun Jang*, Kyung-Min Jang*, Ji-Hye Jang*, Nam-Hoon Jo*
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University*

Abstract - 기존에는 전동기 제어기법으로 PI제어기가 주로 사용되어 왔다. 그러나 실제 시스템의 경우 외란과 센서 잡음에 노출되기 쉽고, 모델의 불확실성에 대한 오차가 발생하기 때문에 보다 강인한 제어기법이 필요한 시점이다. H[∞]제어기법은 명령 추종 성능, 시스템 모델 오차와 외란, 센서 잡음에 대해 강인성을 보장하는 고급제어기법으로서 현재 그 성능을 입증 받아 산업분야에서 다양하게 적용되고 있다. 본 논문은 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 속도제어기에 H[∞]제어기와 PI 제어기를 적용하여 모의실험을 통한 성능비교를 통해 모델오차와 같은 시스템의 불확실성과 외란에 대해 H[∞]제어기의 강인한 제어성능을 검증하였다.

$$\begin{aligned} z &= P_{zw}w + P_{zu}u \\ y &= P_{yw}w + P_{yu}u \\ u &= Ky \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 z와 w에 대한 전달함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= T_{zw}w \\ T_{zw} &= P_{zw} + P_{zu}K(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw} \end{aligned} \quad (2)$$

H[∞]문제는 제어기(K)를 안정화하면서 T_{zw}의 ∞-놈(norm)을 최소화하는 것과 같다.[3]

1. 서 론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 회전자에 여자 권선이 없으므로 이로 인한 손실이 없어 효율이 좋으며, 고출력 밀도를 가지고 있어 전동기 무게에 대한 출력 토크비가 좋다. 그 중에서도 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)는 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 유효 공극을 작게 할 수 있으며, 기계적으로 튼튼하여 고속 운전에 유리하다. 또한, 자기적인 돌극성이 존재하여 릴럭턴스 토크가 추가적으로 발생하기 때문에 동일 전류에 대한 토크비가 큰 장점이 있다. 때문에 산업분야에서 IPMSM에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.[1]

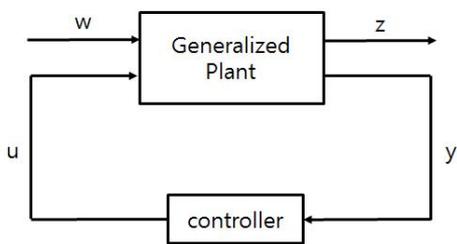
많은 경우 전동기 구동 시 외부에서 인가되는 부하토크를 외란으로 고려하고, 외란이 시스템에 미치는 영향을 제거하기 위해 비례 적분(PI)제어기를 사용한다. 이러한 경우 외란의 영향을 충분히 빠르게 제거할 수 있는 제어기이득을 선정해야 하나 상황에 따라 제어기의 이득을 충분히 크게 선정하지 못할 수가 있다.[2]

따라서 본 논문에서는 IPMSM의 부하토크에 정현파를 인가하여 파라미터 변화, 모델링 오차와 같은 불확실성과 시변 외란에 대해 강인한 제어성능을 유지하기 위해 속도제어기에 H[∞]제어기법을 적용하여 그 성능을 PI제어기와 비교해보았다.

2. 본 론

2.1 H[∞] 제어기

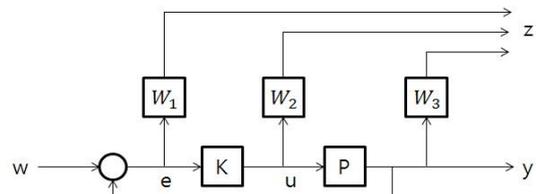
H[∞]제어의 일반적인 블록 다이어그램은 다음과 같다.



〈그림1〉 Generalized plant

기본적으로 플랜트(P)와 제어기(K)로 구성되어 있으며 각각 2개의 입력과 출력을 가지는 시스템으로 간주한다. w는 시스템에 들어오는 외부의 입력 신호, z는 성능과 안정도를 위해 최소화되어야 하는 출력 신호, y는 실제 측정하여 제어기(K)의 입력으로 들어가는 신호, 그리고 u는 제어기에서 플랜트로 보내는 제어 입력 신호이다. 〈그림1〉을 전달함수로 표현하면 식 (1)과 같다.

2.1.1 augmented plant



〈그림2〉 augmented plant

〈그림2〉는 가중함수 W1, W2, W3를 포함하고 있는 augmented plant를 나타내고 있다. 임시목표를 달성하기 위해서 출력은 가중함수가 포함된 형태가 된다.

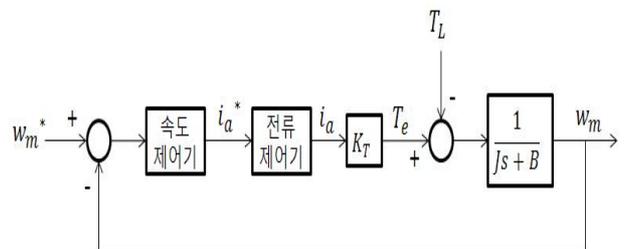
$$z_1 = W_1e, z_2 = W_2u, z_3 = W_3y \quad (3)$$

가중함수가 포함된 플랜트의 제어기는 다음과 같은 Mixed Sensitivity를 이용하여 설계한다.

$$T^+ = \begin{pmatrix} \gamma W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{pmatrix}, \quad S = \frac{1}{1+PC}, \quad R = \frac{C}{1+PC}, \quad T = \frac{PC}{1+PC} \quad (4)$$

제어기는 $\|T^+\|_{\infty} < 1$ 을 만족하도록 설계되며 $\|\gamma W_1 S\|_{\infty} < 1$ 은 정상상태 오차와 외란에 대한 영향을 줄이는 역할을 하며, $\|W_2 R\|_{\infty} < 1$ 은 제어 입력을 제한하는 역할을 한다. 마지막으로 $\|W_3 T\|_{\infty} < 1$ 불확실성에 대한 강인 안정성을 보장한다.[4]

2.2 속도제어기 설계



〈그림3〉 직류 전동기의 속도제어 시스템 구조

전동기의 속도를 제어하는 경우에는 <그림3>과 같이 전류제어기를 내부 루프에 배치하고, 속도제어기를 바깥쪽에 위치시켜 사용한다. 이 경우에 속도 제어기의 대역폭보다 전류 제어기의 대역폭을 충분히 크게 선정하면 전류제어기가 속도 제어에 미치는 영향이 없고, 속도 제어의 응답성이나 안정성이 향상된다. 전류제어기와 마찬가지로 속도제어기에도 비례적분(PI)제어기가 널리 사용된다.[1]

본 논문에서는 IPMSM의 속도제어를 위해 직류 전동기의 속도제어 시스템 구조를 이용하여 H ∞ 제어기와 PI제어기를 설계하였다.

2.3 모의실험

모의실험은 매트랩 시뮬링크를 통해 진행하였고, 사용된 전동기 파라미터들은 <표1>과 같다.

<표1> 모의실험 파라미터

Number of Pole[P]	8
Phase Resistance[Ra]	0.4[Ohm]
d-axis Inductance[Ld]	0.0027[mH]
q-axis Inductance[Lq]	0.007[mH]
Torque constant[Kt]	0.085[Nm/A]
Inertia Moment[Jm]	0.05[kgm ²]
Coefficient of Viscous Fiction[B]	0
Load Torque[TL]	3[Nm]

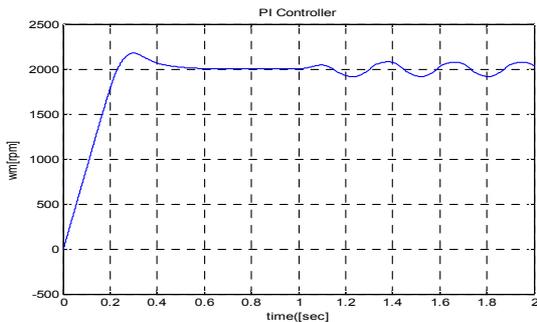
각각 PI제어기에 Anti-Windup과 saturation을 달아주었고, H ∞ 제어기에 saturation을 달아주었다. 또한, 외란으로써 부하토크에 사인파를 인가하여 1초부터 외란이 섞이도록 시뮬레이션 하였다. 모의실험에 사용된 PI계수와 H ∞ 제어기의 가중함수는 다음과 같다.

-PI계수

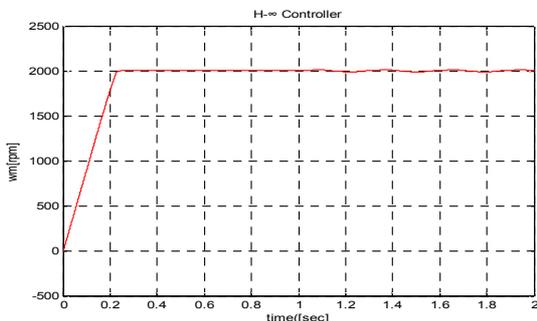
$$K_{ps} = 0.05, K_{is} = 0.5 \quad (5)$$

-가중함수

$$W1 = \frac{10s + 10}{10^6 s^3 + 0.02s^2 + 100s + 0.01}, W2 = 0, W3 = \frac{10S^2}{4} \quad (6)$$



<그림4> PI Controller



<그림5> H ∞ Controller

<그림4>와 <그림5>는 기준입력이 2000[rpm]일 때 IPMSM의 속도제어기에 PI제어기와 H ∞ 제어기를 적용한 결과이다. PI제어기는 기준입력에 대한 오차는 없지만 초반부에 오버슈트(overshoot)가 매우 크며, 외란의 영향을 잘 제거하지 못하는 것을 알 수 있다. 반면에 H ∞ 제어기는 기준입력을 잘 추종하며 시스템의 불확실성에도 불구하고 외란에 대한 영향을 잘 제거해 주고 있다.

3. 결 론

매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 속도제어기에 H ∞ 제어기법을 적용하여 기존의 속도제어 사용하던 PI제어기보다 시스템의 불확실성과 외란에 대해 강인한 제어를 제안하였다. 설계된 제어기의 성능과 강인성은 시뮬레이션을 통해 기준입력을 잘 따라가고, 외란으로써 부하토크에 인가한 정현파를 잘 제거해 주는 것으로 검증하였다. 본 논문에서 설계한 제어기는 외란에 대한 영향을 완전히 제거해주지는 못하고 있지만 이는 무시할 수 있는 정도이며 추후 연구를 통해 더 개선된 제어기를 제안할 수 있다고 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20134010200570)

[참 고 문 헌]

- [1] 김상훈, "DC, AC, BLDC 모터제어," 북두출판사, 2011.
- [2] 이형민, "불확실한 시변 부하를 갖는 PMSM을 위한외란 관측기 기반 속도 제어기 설계", 한국추진공학학회, 2014.
- [3] 강태삼, 윤광준, 하태현, 이기건, "쿼드러터의 H-infinity 제어 시스템 설계", 제어로봇시스템학회, 2015.
- [4] Ximena Celia Mendez Cubillos and Luiz Carlos Fadelha de Souza, "Using of H-infinity control method in attitude control system of rigid-flexible satellite", Mathematical Problems in Engineering, 2010.