

BLDC 모터의 강인한 전류 제어

김도경*, 오승모, 안호균, 박승규
 창원대학교 전기공학과

Robust Current Control of BLDC motor

Do-Kyung Kim *, Seung-Mo Oh, Ho-Kyun Ahn, Seung-Kyu Park
 Department of Electrical Engineering, Changwon University*

Abstract - BLDC 전동기의 제어는 홀소자의 정보를 이용하여 적절한 상전류 전환을 통해서 쉽게 회전시킬 수가 있다. BLDC 전동기는 직류 전동기와 비슷하게 인가된 전압에 따라 간단하게 속도를 제어가 가능하고 BLDC 전동기의 토크를 제어를 위해 내부에 전류 제어기를 갖는다. 하지만 불확실성과 외란의 영향으로 제어 시 어려움을 겪는다. 따라서 본 논문에서는 외란의 영향을 억제하는 방법으로 강인 제어 기법을 제안하여 불확실성과 외란의 영향을 억제하는 강인한 전류제어의 방법을 제시하며, 시뮬레이션을 통해 강인제어의 방법을 증명한다.

1. 서 론

BLDC 전동기는 기존의 DC 모터의 단점을 보완한 것으로 고효율, 고속화, 저소음 및 유지 보수 등의 특성이 우수하며, DC모터와 같이 제어가 용이하고, 효율이 높은 장점을 가지고 있어 널리 사용되어 지고 있다. BLDC는 모터내의 홀소자의 정보를 이용하여 BLDC를 쉽게 회전할 수 있다. BLDC 모터는 DC 모터와 동일하게 회전속도가 인가되는 전압과 비례하므로 입력전압을 제어하면 간단하게 속도제어가 가능하다.[1] 하지만 고성능의 특성을 가지는 제어는 토크를 제어하여 속도를 제어하는 것이다. 현재는 모터의 정밀한 제어의 성능을 필요로 하고 있다. 제어 시 플랜트의 파라미터의 변동으로 인한 오차와 외란에 의한 불확실성에 대한 제어의 연구가 되어 오고 있다.[2] 불확실성에 의한 오차와 외란의 상황을 억제하는 제어의 기법들이 있다.[3] 본 논문에서는 이러한 불확실한 오차와 외란에 대한 강인한 제어의 방법을 제안하며, 외란 억제와 강인한 추종 성능을 만족할 수 있는 제어의 방법을 제시하여, BLDC 모터의 전류제어의 방법을 보여준다. 본 논문에서는 H ∞ 의 강인 제어 이론[4]을 LMI를 이용[5]하여 외란의 영향을 억제하는 강인한 제어 기법을 제안하며, BLDC 모터에 적용하여 외란의 영향에 대한 강인 제어 방법의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전류제어 속도제어

토크를 제어하기 위해서 3상 전류와 위상을 동시에 제어하는 교류 전동기와 다르게 BLDC 전동기는 3상 전류의 크기를 제어하며 된다. BLDC의 출력토크는 상전류의 크기에 비례한다. 상전류의 크기는 입력 전류 Idc에 비례하기 때문에 입력 전류로 상전류의 크기를 제어할 수 있다.

2.2 BLDC model

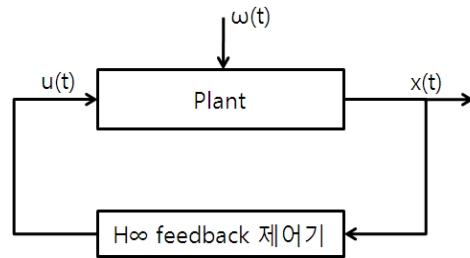
$$\begin{bmatrix} \frac{di(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \\ \frac{dx_3(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Ra}{L} & -\frac{Ke}{L} & 0 \\ \frac{Kt}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_L}{J} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 식(1)은 BLDC 모터의 모델식이다.
 위의 식을 간단하게 표현하면,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (2)$$

위의 식에서 상태변수는 전기자 전류와 모터 각속도이고, 제어입력은 인가되는 전압, 외란을 포함하고 있는 식이고, i_r 은 기준 전류를 나타낸 것이다.

2.3 H ∞ 제어기



<그림 1> H ∞ Feedback 제어 블록도

BLDC 모터에서의 외란은 부하에 영향을 받는다. 외란은 범위가 있고 제어의 성능을 저하시키는 영향이 있으므로 외란의 영향을 억제하는 것이 제어기의 성능에서 중요한 점이다. 그래서 H ∞ 제어기는 외란의 영향을 억제하는 정도의 강인한 제어성능의 정도가 된다.

H ∞ 제어기의 성능을 고려하면,

$$\frac{\int_0^{t_f} x^T(t) Qx(t) dt}{\int_0^{t_f} w^T(t) w(t) dt} < \rho^2 \quad (2)$$

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Qx(t) dt < \rho^2 \int_0^{t_f} w^T(t) w(t) dt \quad (3)$$

t_f 는 제어기의 최종시간이며, ρ 는 $x(t)$ 에서의 외란의 최대치로 규정된 값이다. Q는 양 한정 행렬이고, 식 (3)의 의미는 $x(t)$ 에서의 $w(t)$ 의 영향을 에너지 관점에서 요구 레벨 ρ 이하로 감쇠시켜야 한다는 것이다. 일반적으로 ρ 는 $w(t)$ 에서 1보다 작은 양의 값으로 선택된다.

만약 초기조건을 고려하여 부등식 (3)을 보게 되면,

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Qx(t) dt < x^T(0) Px(0) + \rho^2 \int_0^{t_f} w^T(t) w(t) dt \quad (4)$$

P는 대칭 양 한정 가중 행렬이다.

H ∞ 제어의 강인 제어의 최적화는 $w(t)$ 의 영향을 최대한 억제하기 위해서 식 (4)의 ρ^2 을 최소화 하여야 된다.

위의 식 (4)의 H ∞ 제어 성능을 만족하는 시스템에 대한 상태 궤환 제어기를 다음과 같이 놓기로 한다.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (5)$$

여기서 K는 구하고자 하는 제어의 이득이다. 위의 식 (5)를 식 (2)에 대입하면, 전체 페루프 선형 제어 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + w(t) \quad (6)$$

그래서 본 논문에서는 식 (4)를 만족하는 H ∞ 상태 궤환 제어기를 구할 수 있다.

2.4 H ∞ 제어기 설계

위의 식(2)에서 Lyapunov 함수를 적용한다.

$$V(t) = x^T(t) Px(t) \quad (7)$$

P는 대칭 양한정 가중행렬이고, V(t)의 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) = \dot{x}^T(t) Px(t) + x^T(t) P \dot{x}(t) \quad (8)$$

다음 식(10)을 만족한다면 식(8)은 식(11)과 같이 된다.

$$A^T P + PA - PBK - K^T B^T P^T + \frac{1}{\rho^2} PP + Q < 0 \quad (10)$$

$$\dot{V}(t) < -x^T(t) Qx(t) + \rho^2 w'^T(t) w'(t) \quad (11)$$

식 (11)을 t=0에서 t=t_f 까지 적분하면 다음 식이 얻어진다.

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Qx(t) dt < x^T(0) Px(0) + \rho^2 \int_0^{t_f} w'^T(t) w'(t) dt \quad (12)$$

따라서 식(12)로부터 식 (13)이 얻어진다.

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Qx(t) dt < x^T(0) Px(0) + \rho^2 \int_0^{t_f} w'^T(t) w'(t) dt \quad (13)$$

식 (13)은 주어진 H[∞] 제어 성능 식 (4)와 일치한다. 그러므로 식 (10)을 만족하는 K를 구하면 제어기 설계가 완성된다.

식 (10)을 LMI(Linear Matrix Inequality)를 적용하여 제어기의 이득 값 K를 구하는 방법이 있다. LMI는 내부의 각각의 점마다 계산을 요하는 형태에서 효과적인 방법이다. 우선 $X < 0, Y > 0 \rightarrow Y^T X Y < 0$ 이 성립하므로, 식 (10)로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$P^{-1} A^T + AP^{-1} - BKP^{-1} - P^{-1} K^T B^T + \frac{1}{\rho^2} I + P^{-1} Q P^{-1} < 0 \quad (14)$$

식 (14)에서 $W = P^{-1} Y = KW$ 로 놓으면 다음 식과 같이 된다.

$$WA^T + AW - BY - Y^T B^T + \frac{1}{\rho^2} I + WQW < 0 \quad (15)$$

따라서 식(15)으로부터 다음의 LMI를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} WA^T + AW - BY - Y^T B^T + \frac{1}{\rho^2} I & W \\ W & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

따라서 식 (16)을 Matlab toolbox를 사용하여 W와 Y를 구할 수 있고, 최종적으로 $K = YW^{-1}$ 에 의하여 제어기 이득 K를 얻을 수 있다.

2.5 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에서 사용한 BLDC 모터의 파라미터는 아래의 표 1과 같다.

〈표 1〉 BLDC 모터의 파라미터

파라미터(parameter)	값(value)
Rotor Inertia(J)	0.000018(kg · m ²)
Inductance(L)	0.45(mH)
Torque constance	0.0213(Nm/A)
Rate Voltage/Current	12(V)/1(A)
Resistance	1.6(Ω)

위의 파라미터를 적용하여 Matlab 시뮬레이션을 하였고 BLDC 모터의 값으로 사용하였다.

〈표 2〉 BLDC 모터의 외란 $\omega(t)$

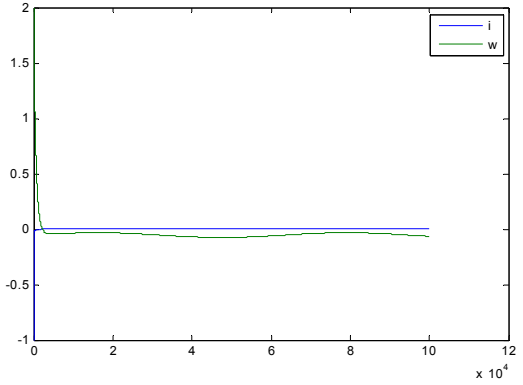
T_L 부하 토크	0.00015 Nm
Sine Wave	amplitude : 1 frequency : 1 (rad/sec)

위의 표2는 BLDC 모터에서 외란으로 사용한 값을 나타내었다.

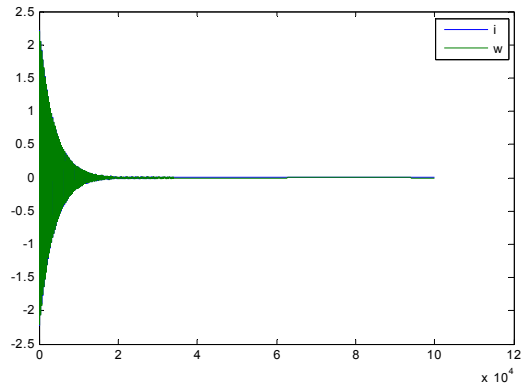
시뮬레이션으로 BLDC 모터의 외란은 정현파의 사인파와 부하토크를 적용하여 시뮬레이션을 한 결과이다. 그림 2는 H[∞] 강인 전류 제어기를 적용하지 않은 것과 적용한 것을 보여주는 그림이다.

그림 2와 그림3을 비교하게 되면 강인제어기를 적용하지 않은 그림 2는 i 값은 0으로 수렴하지만, w 값은 0으로 수렴하지 않는 것을 볼 수 있다, 반면에 그림3의 H[∞] 강인 전류 제어기를 적용한 시뮬레이션을 보게 되면 i, w 값이 0으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다.

따라서 불확실성과 외란에 대한 영향을 억제하는 제어성을 보여준다.



〈그림 3〉 H[∞] 강인 전류제어기 미적용 i, w



〈그림 4〉 H[∞] 강인 전류제어기 적용 i, w

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터 전류제어를 위하여 강인한 전류 제어기인 H[∞]제어기를 적용하여 전류제어를 하였다. 모터 구동시의 외란의 영향을 억제하는 강인 제어 기법을 제안하였다. BLDC 모터의 구동시의 외란에 대한 제어 문제를 시뮬레이션을 수행한 결과로서 외란이 억제됨을 알 수 있었고, 결과적으로 본 논문에서 제안한 방법인 외란에 의해 제어시 안정하지 않은 시스템에 대해 강인한 제어를 적용하여 외란의 영향을 억제하는 강인한 전류 제어를 실현 하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 창원대학교 연구비와 지방기술혁신사업(RT004-10-03)지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1]P. Pillay, R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part II : The brushless DC motor drive," IEEE trans, on Industry Applications, Vol. 25, no. 2, pp.274~279, Marth/April, 1989.
- [2]Bor-sen Chen, Chung-shi Tseng, and Huey-Jian Uang, "Robust Design of Nonlinear Dynamic Systems via Fuzzy Linear Control", IEEE Transactions On Fuzzy System, vol. 7, no. 5, October 1999
- [3]BHATTACHARYYA, S.P. CHARELLAT, H. and KEEL, L.H. "Robust control" (Prentice Hall, 1995)
- [4]A.L.D. Franco, H.Bourles, E.R.D. Pieri, and H.Guillard, "Robust nonlinear control associating robust feedback linearization and H[∞] control" IEEE Trans. Autom. Control., vol. 51, no. 7, pp.1200-1207, Jul. 2006.
- [5]최환호, "LMI 기반 제어기 설계를 위한 간단한 지침서," 제어 · 자동화 · 시스템공학학회지, 제11권,제2호,pp. 55-66, Jun.2005.