

BLDC 전동기 제어시스템의 안정도 해석

한경희, 백수현, 윤신용, 김철진*
 동국대학교 전기공학과, *한라대학교

Stability Analysis of BLDC Motor Control System

Kyoung-Hee Han, Soo-Hyun Baek, Shin-Yong Yoon, Cherl-Jin Kim*
 Dongguk University, *Halla University

Abstract - In this study, we have estimated the brushless DC motor parameters by means of back-emf measurement and step input test. The validity of proposed parameter estimation method is confirmed by step response experiment. And the reasonable digital controller is designed with the root locus method of motor transfer function and revised Ziegler-Nichols gain determination method. The system stability is experimentally verified by the frequency domain analysis used Bode plot.

1. 서 론

BLDC 서보시스템의 구성은 액츄에이터 부분인 BLDC 전동기와 전동기의 구동과 제어를 위한 구동제어부로 이루어져있다. 제어특성이 좋고 고효율인 BLDC 전동기는 서보용 전동기로서 적합하기 때문에 최근 산업계에서의 수요가 급속히 증가하고 있다. 전동기의 속도제어와 위치제어 시스템은 반도체의 기술발전과 더불어 기존 아날로그 방식으로부터 온도변화나 외부요인에 강한 디지털 회로 채용의 소프트웨어 제어방식으로 전환되고 있는 추세이다.

본 연구에서는, 소형화와 고출력이 가능한 회로계영구자석형 BLDC 전동기를 제어 대상 모델로 사용하였으며, 제어회로부는 칩집(one chip) 마이크로 프로세서를 사용하여 전류 검출 분해능이 우수하고 소형화와 신뢰성 향상 및 저소음 특성을 갖는 제어를 설계하여 안정도를 해석하였다.

디지털 제어기의 정밀도를 높이기 위하여, 50[W]급 BLDC 전동기를 대상으로 실험하여 전동기의 파라미터를 산출하였고 제어대상 전동기가 최소의 오버슈트와 수렴성을 가지며 저평속도에 추종하도록 최적의 페루프 제어회로를 설계하여 해석하였다.

2. BLDC 전동기의 제어 파라미터

2.1 BLDC 전동기의 모델링

일반적으로 BLDC 전동기는 구동전압의 형태에 따라 정현파 구동형과 구형파 구동형으로 분류할 수 있으며, 구형파 구동방식이 정현파 구동형에 비해 비교적 간단하고, 저가의 센서류사 및 센서류를 이용한 경제적인 운영시스템의 구성이 가능한 장점을 갖는다.[1] 그림1은 BLDC 전동기의 등가모델을 나타낸다.

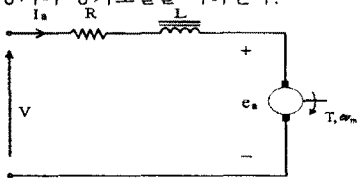


그림1 BLDC 전동기의 등가회로
 Fig.1 Equivalent circuit of BLDC motor

- V : 인가전압 [V], R : 전기자 권선저항 [Ω].
- I_a : 전기자 전류 [A], L : 전기자 인덕턴스 [H].
- e_a : 역기전력 전압 [V], ω_m : 동기 회전속도 [rad/s]

일반적으로, BLDC 전동기의 전압 및 토크 방정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a \tag{1}$$

$$e_a = k_E \omega_m \tag{2}$$

$$T = k_T I_a \tag{3}$$

$$T = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_f + T_L \tag{4}$$

여기서, J_m 은 회전자의 관성모멘트, T_f 는 마찰 토크, T_L 는 부하 토크, D 는 점성마찰계수를, k_E, k_T 는 역기전력상수 및 토크 상수를 각각 나타낸다. 한편, 마찰토크 및 부하토크를 무시하고 전동기의 인가전압에 대한 속도의 전달함수를 다음의 식(5)와 같이 주파수 영역으로 나타낼 수 있다.

$$G_M(s) = \frac{\omega_m(s)}{V(s)} = \frac{k_T}{[(sL+R)(sJ_m+D) + k_Ek_T]} \tag{5}$$

전달함수의 특성방정식에서 전기자 인덕턴스 L 과 회전자 점성계수 D 가 다른요소에 비하여 상당히 적기 때문에 $L \cdot D \approx 0$ 의 관계를 이용하여 다음의 식(6), (7)과 같은 극점 p_1, p_2 를 구할 수 있다.

$$p_1 = \frac{-2k_Ek_T}{[RJ_m + \sqrt{(RJ_m)^2 - 4k_Ek_TLJ_m}]} \approx -\frac{k_Ek_T}{RJ_m} \tag{6}$$

$$p_2 = \frac{-[RJ_m + \sqrt{(RJ_m)^2 - 4k_Ek_TLJ_m}]}{2LJ_m} \approx -\frac{R}{L} \tag{7}$$

여기서, $r_1 = -\frac{1}{p_1}, r_2 = -\frac{1}{p_2}$ 로 나타내면 일반적으로 식 (5)의 전달함수는 다음의 식으로 나타낼 수 있으며, 또한 시정수 τ_1, τ_2 의 의미로부터 전기적 시정수 τ_e 및 기계적 시정수 τ_m 을 정의 할 수 있다.

$$G_M(s) = \frac{1/k_E}{(s\tau_1 + 1)(s\tau_2 + 1)} \tag{8}$$

$$\tau_1 = \tau_m = \frac{RJ_m}{k_Ek_T} \tag{9}$$

$$\tau_2 = \tau_e = \frac{L}{R} \tag{10}$$

2.2 파라미터 산출

입력 또는 부하의 변동에 대해 양호한 동특성을 갖는 제어시스템의 설계를 위하여 수학적 등가모델이 필요하며 이로부터 오차 및 정상상태에서의 부하변동에 대한 응답특성 등 유용한 정보를 얻을 수 있다.

BLDC 전동기의 안정된 제어기 설계를 위해서는 k_E 및 k_T 등의 정확한 파라미터 산출이 필요하다. 식(2)로부터 $k_E = e_a / \omega_m$ 이므로 속도에 따른 전동기의 역기전력을 실측함으로써 k_E, k_T 를 알 수 있다. 그림2는 840 [rpm]에서의 제어대상 전동기의 역기전력 특성을 실측한 파형이다.

그림3은 정격전압 25[V]에서의 토크, 속도 및 전류 특성곡선을 실측한 것으로, 본 연구에서는 제어 파라미터의 선형성과 역기전력 상수와 상관계수를 고려, 토크 상수 k_T 를 산출하였다. 일반적으로 역기전력 상수와 토크 상수는 $k_E \approx k_T$ 의 관계를 갖는다.[1]

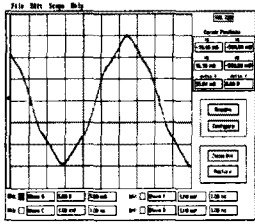


그림2 역기전력파형(840 [rpm])
Fig.2 Back-emf waveform

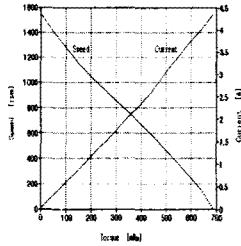


그림3 T-N-I 특성 곡선
Fig.3 The characteristic curve of T-N-I

전동기가 일정한 속도로 구동하고, 입력전압으로부터 코일에 의한 동손을 제외하면 정상상태의 유효부하토크를 구할 수 있다. 이를 이용한 관성모멘트 J_m 는 다음과 같다. [2]

$$J_m \approx \frac{-T_L(\omega_m)}{\frac{d\omega_m}{dt}(\omega_m)} \quad (T=0) \quad (11)$$

표 1은 파라미터를 산출하기 위하여 실험으로부터 구한 BLDC 전동기의 사양을 나타낸다.

표 1 제어대상 전동기의 사양
Table 1 The specification of controlled BLDC motor

항 목	수 치	단 위
출 력 (P)	50	[W]
정격전압 (V_{DC})	25	[V]
정격 속도 (n_p)	1000	[rpm]
선간인덕턴스 (L)	15	[mH]
선간저항 (R)	3.2	[Ω]
역기전력상수 (k_E)	0.17	[Vs/rad]
토크상수 (k_T)	0.17	[Nm/A]
관성모멘트 (J_m)	2.76×10^{-3}	[kg m ²]

다음의 그림4는 표 1에 제시한 전동기의 파라미터를 적용하여 제어대상 전동기의 스텝응답 특성을 시뮬레이션한 결과이다.

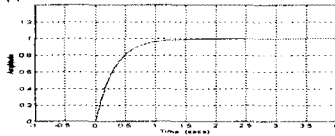


그림 4 스텝응답 특성에 대한 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation result of step response

3. 디지털 제어기 설계

본 연구에서는 제어대상 BLDC 전동기의 최적 모델을 설정하여 개루프의 펄스 전달함수로 부터 근계적을 구하고 이득을 결정하며, 펄스신호의 응답결과로부터 BLDC 서보 전동기의 제어 파라미터를 추정하는 방법을 사용하여 디지털 제어기를 설계 해석한다.

일반적으로 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하기 위한 DAC(Digital to Analog Converter)로서 ZOH를 사용한다. [3][4]

따라서 이산계로 표현한 제어대상 플랜트의 개루프 전달함수 $G_P(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_P(z) = Z[G_{ZOH}(s)G_M(s)] = (1-z^{-1})Z\left[\frac{G_M(s)}{s}\right] \quad (12)$$

한편, 디지털 PID제어기를 표현하는 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_D(z) = K_P + K_I \frac{zT_s}{z-1} + K_D \frac{z-1}{zT_s} \quad (13)$$

여기서, T_s 는 샘플링 주기를 의미한다. 본 연구에서는 미분 제어기의 이득 K_D 로 인한 노이즈의 민감성을 제거하고 외란에 대하여 강인성을 나타내기 위해 식(11)에

서 디지털 PI제어기 $G_D(z)$ 를 적용한다.

다음은 디지털 PI 제어기를 포함한 BLDC 전동기 제어 시스템의 블록선도이다.

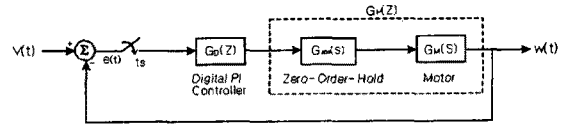


그림 5 디지털 PI 제어 시스템의 블록선도
Fig. 5 Block diagram of digital PI control system

폐루프 전달함수 $G_{CL}(z)$ 를 구하면 다음 식과 같이 된다. [5]-[8].

$$G_{CL}(z) = \frac{G_P(z)G_D(z)}{1 + G_P(z)G_D(z)} = \frac{a_0z^{-3} + a_1z^{-2} + a_2z^{-1}}{1 + (b_0z^{-3} + b_1z^{-2} + b_2z^{-1})} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_0 &= -0.0736K_P & b_1 &= -0.0752K_P + 0.0007K_I + 1.188 \\ b_0 &= -0.0736K_P - 0.1134 & a_2 &= 0.1488K_P + 0.0015K_I \\ a_1 &= -0.0752K_P + 0.0007K_I & b_2 &= 0.1488K_P + 0.0015K_I - 2.0755 \end{aligned}$$

식(14)로 표현되는 이산계 전달함수 $G_{CL}(z)$ 에 대한 근의 궤적으로부터 이득 K 의 증가로 인한 불안정성을 배제하기 위하여 Ziegler-Nichols가 제안한 이득 설정방안을 적용한다. [7][8] 폐루프 시스템의 극의 위치가 단위 원 내의 경계점 ($|z|=1$)으로 되어 시스템이 발진할 때까지 비례이득 K_P 만을 증가하여 가상이득 K_m 을 설정하고 식(15)에 따른 관계식으로부터 각각의 이득을 설정한다. 이때, ω_m 은 시스템 진동 ($K_I = K_D = 0$)시의 주파수이다.

$$K_P = 0.6K_m \quad / \quad K_I = \frac{K_P \omega_m}{\pi} \quad / \quad K_D = \frac{K_P \pi}{4 \omega_m} \quad (15)$$

그러나 Ziegler-Nichols방법을 직접 적용한 경우, $K_m = 16.01$ 으로서 최대오버슈트는 약 220[%] 정도로 매우 과도하며 정정시간이 3[s] 정도 지연되어, 본 연구에 적용된 BLDC 전동기 구성시스템에 대하여 부적합한 결과를 나타내었다.

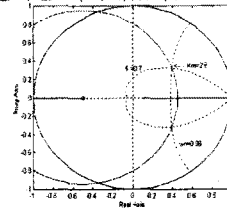


그림 6 제어대상 플랜트의 근계적도
($K_m = 2.6$)
Fig. 6 The root-locus for the controlled plant

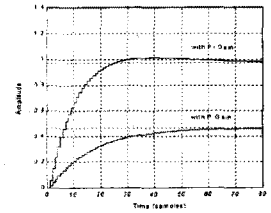


그림 7 스텝응답특성
($K_P = 1.6, K_I = 33$)
Fig. 7 The step response of the Ziegler-Nichols design

따라서 본 연구에서는 2차 시스템의 경우, 제동비 $\xi \approx 0.7$ 에서 시간응답특성이 양호한 시간영역해석의 결과로부터 근계적상 이득을 결정한다. [2][6]

그림6은 ω_m 은 0.96, 가상이득 K_m 은 약 2.6인 근계적으로 식(15)으로부터 PI제어기의 이득을 결정할 수 있다. 그림7은 이때의 단위응답 특성이다.

4. 실험 및 고찰

본 연구에서는, 전동기의 출력속도 검출은 마이크로프로세서의 인터럽트(interrupt)를 이용하고 가변속 제어를 위해서는 펄스폭 변조(PWM)방식을 사용하며 MOSFET을 이용하였다.

그림8은 120°구형과 전압 구동방식의 BLDC 전동기 제어시스템 구성을 나타내며 홀 소자로부터 출력되는 위치검출신호의 펄스 주기를 측정하여 회전수를 계산한다.

그림9는 그림5의 디지털 제어기를 포함한 제어시스템의 구성 및 그림8의 회로구성을 기준으로 설계한 디지털 제어기에 대한 단위 스텝응답 특성을 F/V 컨버터를

이용하여 실험한 특성 파형을 나타낸 결과로서 정정시간 (settling time)은 약 0.8[s]이다.

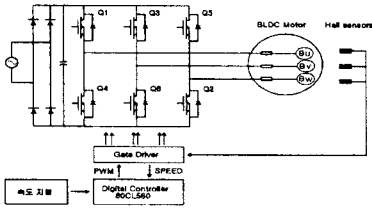


그림 8 BLDC 전동기 제어시스템의 구성
Fig.8 Configuration of BLDC motor control system

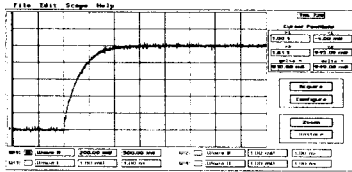


그림 9 PI 제어에 의한 페루프 스텝응답 특성
Fig. 9 Closed-loop step response of BLDC motor control system with PI

그림10은 설계한 BLDC전동기 제어 시스템의 부하변동에 대한 과도 응답특성을 측정 한 결과이다. 800 (rpm)으로 운전시, 0.5 [kgcm]의 부하를 순간적으로 인가하였을 경우의 속도 응답특성을 F/V변환기를 사용하여 계측한 것으로 지령속도에 대하여 추종특성이 양호하며, 과도상태가 1[s]이하로 양호한 동특성을 보인다.

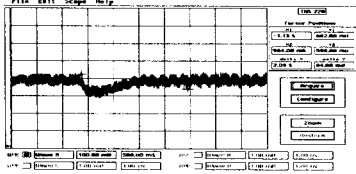


그림 10 부하 변동시 응답특성 실험결과
Fig. 10 Experimental results of the load torque

디지털 제어시스템의 상대적 안정도를 파악하기 위하여 Bilinear변환을 이용함으로써 Bode선도에 의한 주파수 영역 해석방법을 적용할 수 있으며 z평면을 w 평면으로 변환하기 위한 이분적 배경으로 다음 식의 근사법을 적용한다. (6)-(8)

$$w = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (16)$$

여기서, w평면의 주파수 성분을 jν로 하여 가상주파수 ν와 실제 주파수 ω 사이를 나타내면 다음과 같아진다.

$$\nu = \frac{2}{T_s} \tan \frac{\omega T_s}{2} \quad (17)$$

샘플링주기 T_s와 ζ=0.7에서의 근궤적 및 단위응답 특성을 고려하여 w평면에서의 루프전달함수에 대한 Bode 선도를 나타내면 그림11과 같이 위상교차주파수가 이득교차주파수보다 높고 약 55° 정도의 위상여유를 가지므로 페루프 시스템이 안정성하게 된다.

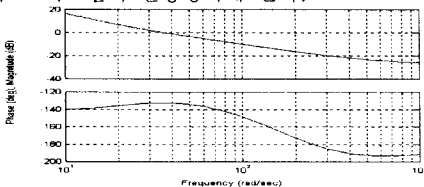


그림 11 루프의 이득-위상 곡선
Fig. 11 The gain-phase curve for control loop

그림12은 실험에 의한 제어루프의 이득-위상특성을 나타낸 것으로, 실측한 결과로부터 약55° 정도의 위상여유를 나타내므로 제어시스템이 안정됨을 알 수 있으며, 그

림11에서 제시한 PI제어에 의한 페루프 스텝응답특성 및 부하변동시 응답특성실험 결과로부터 정상상태오차를 최소화하고 최소의 오버슈트를 가지며, 정정시간 2[s]이하로 안정적인 구동이 가능한 BLDC전동기 제어시스템임을 알 수 있다.

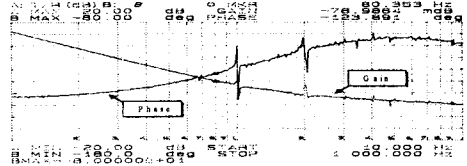


그림12 제어 시스템의 주파수영역 실험 결과
Fig.12 Experimental result of frequency domain for proposed control system

5. 결 론

본 연구에서는 BLDC 전동기에 대하여 높은 신뢰성을 갖는 디지털 제어기 구현을 위하여 실제로 제작한 50 (W)급 BLDC전동기를 대상으로 실험을 통하여 전동기의 제어 파라미터를 산출하고, 전동기가 최소의 오버슈트로 지령속도에 추종하기 위한 최적의 페루프 제어회로를 설계하였다.

BLDC 전동기에 대하여 실험을 통하여 파라미터를 산출하고, 근궤적도에서 제동비를 ζ≈0.7로 선정 한 후 Ziegler-Nichols방법을 응용하여 제어기의 이득을 결정함으로써 안정된 제어기를 설계 할 수 있었다.

BLDC 전동기의 스텝응답의 시뮬레이션 결과와 전압에 대한 단위 속도응답 특성을 F/V 변환기를 이용하여 실측한 실험결과가 상호 일치하였으며, 이로써 본 연구에서의 파라미터 추정치의 타당성을 확인할 수 있었다.

실험결과로부터, 약 20(dB)의 이득여유와 55° 정도의 위상여유를 나타내므로 정상상태 오차를 최소화하고, 단위속도의 정정시간 0.8[s]이내인 안정적인 구동이 가능한 BLDC전동기의 디지털 제어시스템을 실현할 수 있었으며, 향후 본 연구에서 제안한 파라미터 추정 및 제어방안이 BLDC전동기를 제어대상으로하는 각종 산업 분야에 보다 효과적으로 응용 가능할 것으로 기대할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1]J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publication, 1994.
- [2]W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer Verlag, 1990.
- [3]Franklin,G.F.J.D.Powell,and M.L.Workman, Digital Control of Dynamic Systems, 2nded.Addison Wesley, 1990.
- [4]G.F.Franklin,etal., Feedback control of Dynamic Systems, 3rded, Addison-Wesley, 1994.
- [5]Evans,W.R."Graphical Analysis of Control Systems",Trans Am. Inst. Electr. Eng., Vol.67,pp. 547-551, 1948.
- [6]Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, 1997.
- [7]Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, Digital Control System Analysis and Design, 3rded, Prentice Hall, pp. 281-327, 1994.
- [8]Bahram Shaian, Michael Hassul, Control System Design using Matlab, Prentice Hall, pp. 284-287,1993.