

BLDC 전동기 파라미터 산정에 관한 연구

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

Study for Calculation of BLDC Motor Parameter

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

Abstract - In this paper, using equivalent circuit of BLDC motor in the 30W class, process of modeling the BLDC motor and calculating the parameter is shown. Through run-down-test and measuring back EMF, torque, speed and ampere, parameter that transfer function requires was gotten. In this result, for step response of BLDC motor, comparing the actual result obtained by circuit experiment with the simulation result obtained by substituting this parameter into the transfer function, it was established that process calculating parameters in this study is proper.

2.1 BLDC 전동기의 등가회로

일반적으로 BLDC 전동기는 구동전압의 형태에 따라 정현파 구동형과 구형파 구동형으로 분류할 수 있으며, 구형파 구동방식이 정현파 구동형에 비해 비교적 간단하고, 저가의 정류소자 및 센서류를 이용한 경제적인 운영 시스템의 구성이 가능한 장점을 갖는다. [1] 그림2은 BLDC 전동기의 등가모델을 나타낸다.

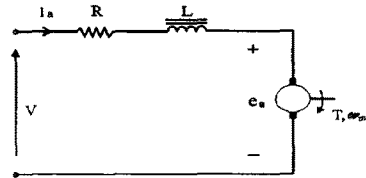


그림2 BLDC 전동기의 등가회로
 Fig.2 Equivalent circuit of BLDC motor

- 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]

1. 서 론

BLDC 전동기는 제어특성이 우수하여 수요가 급속히 증가하고 있으며 안정된 제어를 위한 전체 시스템의 개발기술이 날로 향상되고 있다.

BLDC 서보시스템은 플랜트 부분인 BLDC 전동기와 플랜트의 구동과 제어를 위한 구동 제어부로 이루어져 있다. 시스템 전체의 설계가 정밀하게 이루어지기 위해서는 제어의 대상이 되는 플랜트에 대한 정확한 제어 파라미터의 산출이 필요하다.

본 연구에서는, 30(W)급의 소형화와 고효율이 가능한 회로류계 영구자석형 BLDC 전동기를 대상으로 수학적 고유 등가 모델을 확립하였으며, 실험을 통해 플랜트 전달함수의 파라미터를 구하였다. 산출된 파라미터를 이용하여 응답특성의 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 제시한 파라미터 산출 과정의 타당성을 보였다.

2.2 BLDC 전동기의 Modelling

실험을 통한 파라미터의 산출은 BLDC 전동기 동작을 자체강도와 권선구조로 표현하는 것보다 전기자 전류 I_a와 토크 상수 k_T에 의해 발생하는 토크 T와 및 축의 회전속도 ω_m에 의해 발생하는 기전력 e_a를 역기전력 상수 k_E로 표현하는것이 더욱 용이하다. 전압 및 토크 방정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V = L \frac{dI_a}{dt} + RI_a + e_a \tag{1}$$

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

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

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

- J_m : 회전자의 관성모멘트 T_f : 마찰 토크
- T_L : 부하 토크 D : 점성마찰계수
- k_E : 역기전력상수 k_T : 토크 상수

마찰 토크 및 부하 토크는 전동기의 전달함수에 직접적으로 영향을 미치지 않으므로 이를 무시하고, 식 (1)-(4)를 라플라스 변환하여 전동기의 인가전압에 대한 속도의 전달함수를 다음의 식(5)와 같이 주파수 영역으로 나타내어 구할 수 있다.

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

2. BLDC 전동기 Model의 확립

안정한 시스템을 설계하려면 구동, 제어부와 플랜트의 정확한 해석이 필요하다. 그 중에서도 정확한 플랜트의 모델링은 제어부를 포함한 전체 시스템의 설계 이전에 우선적으로 반드시 수행되어야 과적이다. 그림 1은 대상 플랜트를 포함하는 시스템의 개략적인 구성을 나타낸다.

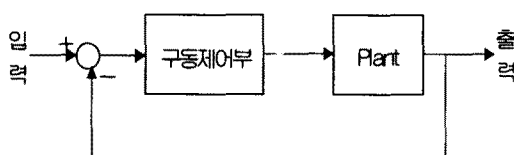


그림 1 플랜트를 포함한 시스템의 구성
 Fig 1 System composition with plant

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

$$p_1 = \frac{-2k_E k_T}{[RJ_m + \sqrt{(RJ_m)^2 - 4k_E k_T L J_m}]} \approx -\frac{k_E k_T}{RJ_m} \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{-[RJ_m + \sqrt{(RJ_m)^2 - 4k_E k_T L J_m}]}{2L J_m} \approx -\frac{R}{L} \quad (7)$$

여기서, $\tau_1 = -\frac{1}{p_1}$, $\tau_2 = -\frac{1}{p_2}$ 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.

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

$$\tau_1 = \tau_m = \frac{RJ_m}{k_E k_T} \quad (9)$$

$$\tau_2 = \tau_e = \frac{L}{R} \quad (10)$$

3. BLDC 전동기 파라미터의 산출

3.1 k_E, k_T 파라미터

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 를 알 수 있다. 그림3은 840 [rpm]에서의 제어대상 전동기의 역기전력 특성을 실측한 파형이다.

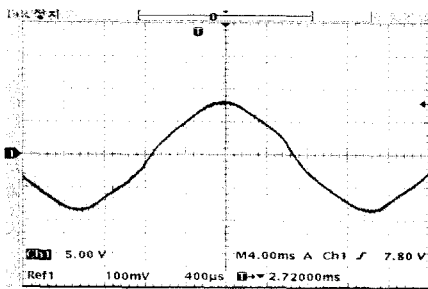


그림3 역기전력파형(840 [rpm])
Fig.3 Back-emf waveform

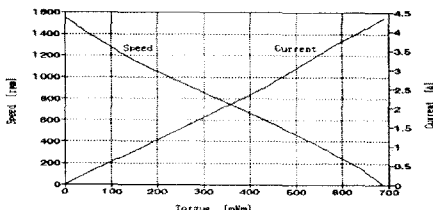


그림4 T-N-I 특성 곡선
Fig.4 The characteristic curve of T-N-I

그림4는 정격전압 20[V]에서의 토오크, 속도 및 전류 특성곡선을 실측한 것으로, 본 연구에서는 제어 파라미터의 선형성과 역기전력 상수와의 상관관계를 고려, 토오크 상수 k_T 를 산출하였다. 일반적으로 역기전력 상수와 토오크 상수는 $k_E \approx k_T$ 의 관계를 갖는다.[1]

3.2 관성 모멘트 J_m

일반적으로 식(4)로 표현되는 기계적인 운동방정식은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

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

식(11)에서 ω_m 을 고려하면 식(12)와 같이 입력전력 P_I 와 부하 토오크를 고려한 부하전력 P_L 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_I = P_L + J_m \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (12)$$

전동기가 일정한 속도로 구동되는 경우, 식(12)에서 우변의 두 번째 항을 무시할 수 있고, 입력전압 P_I 로부터 코일에 의한 동손을 제외하면 정상상태의 유효 부하 토오크를 구할 수 있다. 그림 5는 무부하 상태로 일정속도로 회전하고 있을 때의 손실 토오크를 각각의 속도점에서 실측한 결과이며, 그림 6은 운전중인 전동기의 인가전압을 차단한 후 전동기가 정지할 때까지의 토오크를 실측한 run-down test의 특성곡선을 나타낸 것이다.

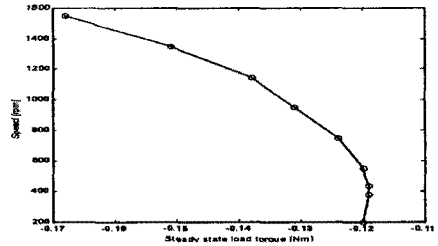


그림 5 정상상태에서의 손실 토오크 곡선
Fig 5 The load curve at steady state

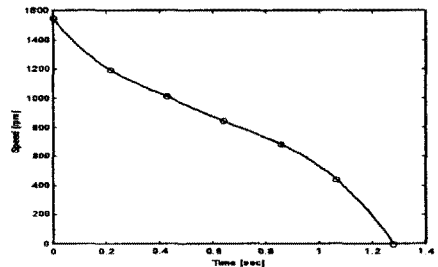


그림 6 Run-down 특성 곡선
Fig 6 Run-down curve

이로부터 관성 모멘트 J_m 은 다음과 같이 얻을 수 있다.[2]

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

표1은 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) | 30 | [W] |
| 정격전압 (V_{DC}) | 20 | [V] |
| 정격 속도 (n_n) | 1000 | [rpm] |
| 선간인덕턴스 (L) | 12 | [mH] |
| 선간저항 (R) | 10 | [Ω] |
| 역기전력상수 (k_E) | 0.088 | [Vs/rad] |
| 토크상수 (k_T) | 0.088 | [Nm/A] |
| 관성모멘트 (J_m) | 2.76×10^{-5} | [kg m ²] |

4. 실험 및 고찰

본 연구에서는 제어의 대상이 되는 플랜트 모델을 확립하였다. 실험을 통해 구한 각각의 파라미터를 플랜트 전달함수에 대입함으로써 시뮬레이션 결과와 실제 BLDC 전동기의 스텝응답 특성을 비교하였다.

다음은 표1에 제시한 전동기의 파라미터를 적용하여 제어대상 전동기의 스텝응답 특성을 시뮬레이션 한 결과이다.(그림7)

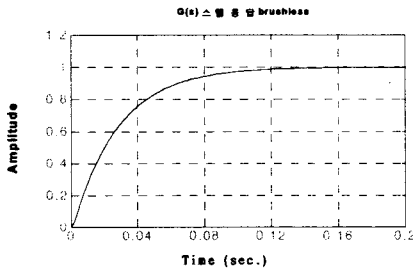


그림 7 스텝응답 특성에 대한 시뮬레이션
Fig. 7 Simulation result of step response

그림 8은 BLDC 전동기의 step 응답에 대해 시뮬레이션 된 결과와 실험결과를 비교하기 위해서 실제 BLDC 전동기를 구동시킬 구동회로를 나타낸다.

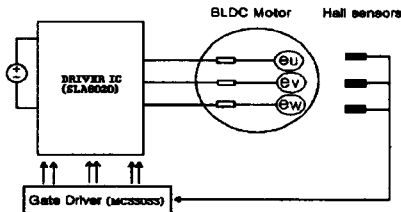


그림 8 BLDC 전동기 구동회로
Fig 8 Drive circuit of BLDC motor

그림 9는 그림 8에 제작된 구동회로를 이용하여 BLDC 전동기를 800[rpm]으로 회전시켰을 경우 속도의 응답특성을 본 결과이다. 출력속도는 f/v 컨버터를 이용하여 나타내었다.

그 결과 settling time이 0.15[sec]로 나타났으며 그림 7에서의 시뮬레이션 결과와 동일하게 나타났다.

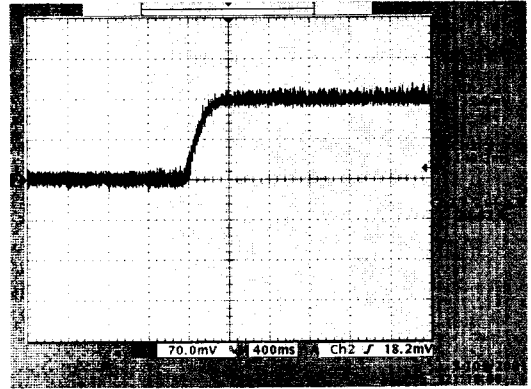


그림 9 스텝응답 특성에 대한 실험결과
Fig 9 Experiment response of step response characteristic

5. 결 론

본 연구에서는 최적의 구동 제어 시스템을 설계할 경우 요구되어지는 제어 파라미터를 산출하기 위하여 30W급 BLDC 전동기를 대상으로 플랜트의 파라미터를 구하는 과정을 보였다.

BLDC 전동기의 등가회로를 이용하여 model을 확립하였으며 실험을 통하여 플랜트인 BLDC 전동기의 전달함수에서 요구하는 파라미터 값을 구했다. 일정속도 하에서 출력되는 역기전력을 측정하여 전동기의 역기전력 상수 k_E 를 구했으며 속도-토크-전류(T-N-I)의 선형성을 고려하여 $k_E \approx k_T$ 이므로 k_T 를 구할 수 있었다. run-down test로 BLDC 전동기의 관성 모멘트 J_m 를 구했으며 선간저항과 선간인덕턴스를 측정하였다. 구해진 각 파라미터 값을 전달함수에 대입함으로써 BLDC 전동기의 입력전압에 대한 출력속도의 Step 응답 특성을 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 하였다. Feedback 경로가 없는 구동회로와 F/V컨버터를 이용하여 Open Loop 상에서 BLDC 전동기의 속도 출력 응답 특성이 상승시간 0.15[sec]를 가지고 일정속도로 추정하여 시뮬레이션 결과와 일치하였다. 본 연구에서 제시한 파라미터 산출방안이 BLDC를 제어대상으로 하는 각종 구동제어시스템의 설계과정에서 효과적으로 응용 가능할 것으로 기대된다.

[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, 2nd ed. Addison Wesley, 1990.
- [4]G.F. Franklin, et al., Feedback control of Dynamic Systems, 3rd ed. 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, 3rd ed. Prentice Hall, pp. 281-327, 1994.
- [8]Bahram Shaian, Michael Hassul, Control System Design using Matlab, Prentice Hall, pp. 284-287, 1993.