

제어기설계를 위한 영구자석형 동기전동기의 파라미터 측정 Measurement of Parameters of Permanent Magnet Synchronous Motor for Controller Design

정영석*†
Young-Seok Jung*†

(Received 24 May 2022, Revision received 13 June 2022, Accepted 14 June 2022)

Abstract : In order to obtain good driving performance of the electric drive system, it is required to identify the parameters of the electric machine. The design of the control loops is normally conducted based on these machine parameters. To identify the parameters of PMSM, we conduct basic experimental tests on the PMSM. In order to reduce the test time, we omit some unnecessary test procedures used in the previous study without loss of estimation accuracy. The test time of previous 1.4 sec is reduced to 0.325 sec by proposed method. The usefulness of the proposed method is verified by the experimental results.

Key Words : Permanent magnet synchronous motor, Measurement of parameters, Mathematical modeling

— 기 호 설 명 —

- L_d, L_q : d-축, q-축 인덕턴스 [H]
- r_s : 권선 저항 [Ω]
- ω_r : 회전자 전기 각속도 [rad/sec]
- K_e : 역기전력 상수 [$V \cdot sec/rad$]
- J : 회전자 관성모멘트 [$kg \cdot m^2$]

1. 서 론

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 높은 효율성, 신뢰성 및 제어 편의성으로 다양한 분야에서 많이 활용되고 있다.¹⁾ 고성능 구동 시스템을 구성하

기 위해서는 비교적 정확히 모터의 파라미터를 알 필요가 있으며 실제 제어기를 적용할 경우, 모터 설계과정 중 설계 프로그램으로 구한 파라미터에 대한 검증도 필요하다.

모터의 파라미터를 알기 위해 관측기 등을 이용하여 구성하고 이후 제어기의 이득을 결정하여 사용함으로써 원하는 동적 성능을 만들 수 있으나, 관측기를 추가적으로 구현해야 하며, 관측기의 계산 로직으로 인해 제어기로 사용되는 마이크로프로세서에 추가적인 부담이 발생한다.^{2,3)} 특히 이 경우, 저가의 마이크로프로세서 사용은 더욱 어려울 수 있다. 또 다른 방법으로 모터 설계에 사용된 해석프로그램으로부터 얻은 파라미터 값을 사용할 수 있으나, 모터 제작과정에서 설계

*† 정영석(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8086-6928) : 교수, 부경대학교 기계공학부 기계설계공학전공
E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165

*† Young-Seok Jung(https://orcid.org/0000-0001-8086-6928) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pukyong national university.
E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165

와 차이가 발생할 수 있어 다시 한번 파라미터 검증이 필요하다. 실험을 통하여 데이터를 수집하고 얻은 데이터로부터 모터의 파라미터를 구하는 방법을 적용할 수 있으나 실험과 추가적 해석이 별도로 필요하다.⁴⁾

본 논문에서는 실험적으로 전동기의 파라미터를 구하는 방법을 다룬다. 기존 연구에서는 모터 권선 저항을 측정하기 위해 d축에 2개의 다른 전압을 인가할 때 d축 전압을 0으로 하는 구간이 있어 불필요한 시간을 보내고 있으며, 기계적 운동 특성 파악을 위해 모터를 전류제어를 통해 가속하고 속도제어로의 변환을 수행한 후 감속을 통해 관성모멘트 J 를 측정하고 있어 비교적 긴 시간이 소요된다.^{5,6)}

따라서 본 논문에서는 이를 개선하여 기존 방식보다 짧은 시간에 모터 파라미터를 측정할 수 있도록 불필요한 구간의 운전을 회피하여 측정하는 방법을 소개한다. 제안한 방식을 적용하면 기존의 측정시간 1.4초에 비해 보다 짧은 0.325초 이내의 시간에 측정이 이루어짐을 확인할 수 있다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 실험을 통해 확인한다.

2. PMSM 모델링

영구자석형 동기전동기의 회전자 프레임에서의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_q = (r_s + L_q s) i_q + \omega_r L_d I_d + \omega_r \lambda_m \quad (1)$$

$$v_d = (r_s + L_d s) i_d - \omega_r L_q I_q \quad (2)$$

여기서, v_q , v_d , i_q 그리고 i_d 은 q축 및 d축 전압과 전류이며, r_s 은 권선 저항, L_q 와 L_d 는 q축 및 d축 인덕턴스이고 λ_m 은 회전자 자석에 의해 형성된 쇄교자속이며, ω_r 은 회전자 전기 각속도, s 는 라플라스 미분 연산자이다. 동기전동기의 토크 식 및 운동방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (3)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (4)$$

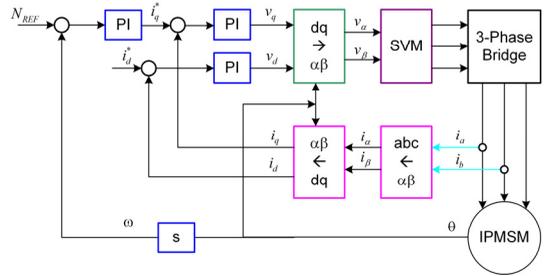


Fig. 1 Motor control system

여기서, P 는 자극의 수이고, J 은 회전자와 부하의 관성모멘트이며, B 은 마찰계수, ω_m 은 기계적 회전자 각속도, T_L 은 부하토크이다. 위 식들로부터 역기전력 상수(K_e), 토크상수(K_t)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_e = \left(\frac{P}{2}\right) \lambda_m, \quad K_t = \left(\frac{3}{2}\right) K_e \quad (5)$$

Fig. 1은 모터 속도 제어시스템을 나타낸 것이다. 모터의 회전 속도를 제어하기 위해 속도제어기(PI)와 토크제어를 위한 전류제어기(PI)가 있으며 회전자 프레임과 고정자 프레임 간의 변환을 위한 변환과정이 나타나 있다.

3. 파라미터 측정

모터의 제어루프를 설계하기 위해 필요한 모터 파라미터는 권선저항(r_s), d-q축 인덕턴스(L_d, L_q), 역기전력 상수(K_e), 마찰계수(B) 및 관성모멘트(J)이다. 이를 위해 테스트 신호를 인가해야 하며, Fig. 2에는 테스트 신호로 d축 전압(V_d)과 q축 전압(V_q)을 인가하여 발생하는 d-q축 전류(I_d, I_q)를 나타내었으며, 이를 이용하여 r_s , L_d 그리고 L_q 를

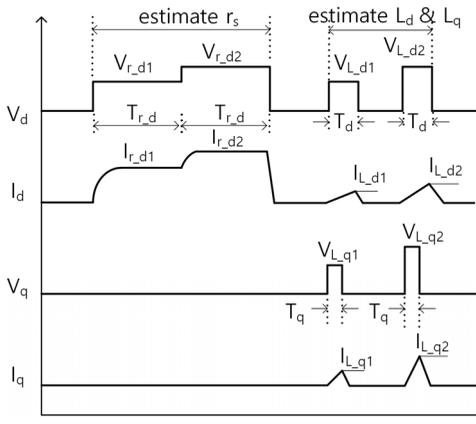


Fig. 2 Test signals (V_d , V_q) to estimate r_s , L_d and L_q

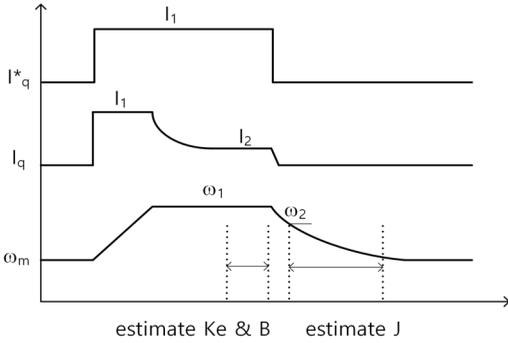


Fig. 3 Test signal (I_q^*) to estimate K_e , B and J

측정한다. Fig. 3에는 K_e , B 그리고 J 를 측정하기 위해 q축 전류명령을 I_1 을 인가한다. 전류제어의 출력으로 모터에 인가할 전압을 만드는 과정에서 전압의 최대값을 제한하면 Fig. 3과 같이 모터의 속도 증가에 따라 전류제어가 불가능해지면서 전류가 감소하는 구간이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 구간에 K_e 와 B 를 측정하고, 이후 인버터의 동작을 정지시켜 모터를 감속시키는 동안 관성모멘트(J)를 측정할 수 있다.

이들 과정은 기존 방식과 달리 권선저항을 측정하는 과정에서 d축 전압을 0으로 하는 과정을 생략하였고, 마찰계수(B)와 관성모멘트(J)를 측정하기 위해 속도제어로 제어기를 변경하여 가속하

는 구간을 생략하여 측정시간을 단축한다.

3.1 권선 저항

식 (1)과 (2)로부터 권선 저항을 구하기 위해 정지 상태 모터로부터 d축 전압을 인가하여 d축 전류를 측정하고 그 비로부터 권선저항 값을 구한다. 인가 전압에는 데드타임 등에 의해 오차가 발생할 수 있으므로 2개의 전압을 인가하고 각각의 전류를 측정 후 그 차이로부터 다음과 같이 구한다.

$$r_s = \frac{V_{r,d2} - V_{r,d1}}{I_{r,d2} - I_{r,d1}} \quad (6)$$

3.2 인덕턴스

권선 저항 측정과 같은 방식으로 멈춘 상태 모터로부터 d축 전압 및 q축 전압을 인가하여 d축 및 q축 전류를 측정하여 인덕턴스를 구한다.

$$L_d = \frac{V_{L,d2} - V_{L,d1}}{I_{L,d2} - I_{L,d1}} T_d \quad (7)$$

$$L_q = \frac{V_{L,q2} - V_{L,q1}}{I_{L,q2} - I_{L,q1}} T_q \quad (8)$$

여기서, T_d 와 T_q 은 d축 및 q축 전압 인가시간이며, 모터의 회전이 발생하지 않을 정도의 비교적 짧은 시간이다.

3.3 역기전력 상수, 마찰계수 및 관성모멘트

역기전력 상수를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 전류제어에 의해 모터의 가속을 시행한다. 전류제어의 출력이 일정 전압으로 제한되어 모터의 속도는 ω_1 이상으로 증가하지 못하고, q축 전류는 감소하여 I_2 에 수렴한다. d축 전류는 0으로 유지하고 있으므로 식 (1)로부터 다음과 같이 역기전력 상수를 구할 수 있으며, 마찰계수는 식 (3)과 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$K_e = \frac{P}{2} \lambda_m = \frac{v_q - r_s i_2}{\omega_1} \quad (9)$$

$$B = \frac{3}{2} \frac{K_e \cdot i_2}{\omega_1} \quad (10)$$

관성모멘트는 식 (4)에서 부하토크와 모터토크가 없는 상태에서 자연 감소하는 다음의 속도식으로부터 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\omega_m = \omega_2 \cdot e^{-\frac{B}{J}t} \quad (11)$$

Table 1 Parameter of IPMSM

Parameter	Value	Unit
phase resistance(r_s)	0.035	Ω
q-axis inductance(L_q)	143.0	μH
d-axis inductance(L_d)	87.33	μH
Moment of Inertia(J)	$1.641e^{-5}$	$kg.m^2$
Viscous frictional coefficient(B)	$1.260e^{-4}$	Nm/rad/s
Back EMF constant(K_e)	0.0116	V/rad/s

4. 실험 결과

Fig. 4는 권선 저항을 측정하기 위해 d축에 각 0.37 V와 0.43 V 전압을 인가하여 전류를 측정한 파형이며, Fig. 5는 인덕턴스 측정을 위해 d축에 각 1.48 V와 2.11 V를 100 μ sec 동안 인가하고, q 축에 3.17 V와 4.23 V 전압을 50 μ sec 동안 인가한 후 측정된 전류파형이다. 실험으로부터 구한 권선 저항은 0.035옴이며, d축 인덕턴스는 87.33 uH, q축 인덕턴스는 143.0 uH이다.

Fig. 6은 권선저항, d-q축 인덕턴스, 역기전력상수, 마찰계수 그리고 관성모멘트를 측정하는 전 과정의 d-q축 전류와 모터 회전 속도를 나타낸 실험 파형이다. 모터가 정지 상태에 있을 때 권선저항, d-q축 인덕턴스를 측정한 후 전류제어를 통해 모터를 가속하여 역기전력상수 및 마찰계수를 측정하고 자연 감속을 통해 관성모멘트를 측정하고 있으며, 전 과정이 0.325초 내로 이루어짐을 확인할 수 있다. Fig. 7에는 역기전력상수, 마찰계수

및 관성모멘트가 측정되는 순간을 모터 회전속도와 같이 나타내었다.

Table 1에는 측정된 모터의 파라미터를 나타내었다. 측정된 모터 파라미터를 이용하여 전류제어 루프의 차단주파수가 1 kHz가 되도록 전류제어기 이득을 설정하여 측정된 q축 전류응답을 Fig. 8에 나타내었다. 속도제어기 이득은 속도제어 루프의 차단주파수가 50 Hz가 되도록 설정하였으며, Fig. 9에 그 응답을 나타내었다. 전류응답은 1 msec 이내, 속도응답은 10 msec 이내에 응답이 이루어짐을 확인할 수 있다.

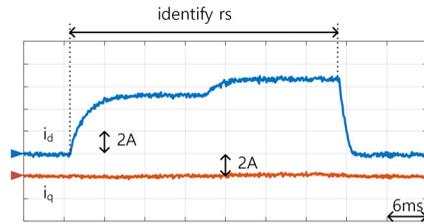


Fig. 4 q & d-axis currents for r_s measurement

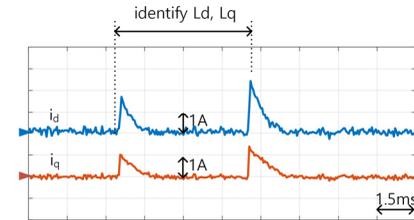


Fig. 5 q & d-axis currents for L_d and L_q measurement

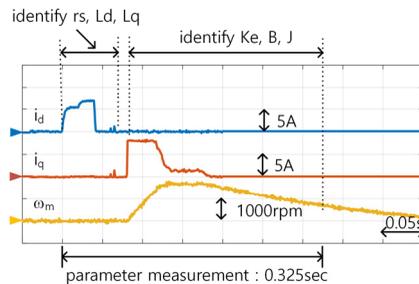


Fig. 6 q & d-axis currents and speed waveforms to identify the motor parameters

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2021년)에 의하여 연구되었음.

References

1. T. Higashiyama et al., 2000, "Auto-tuning of motor drive system by simple adaptive control approach", Proc. IEEE Control Appl. Int. Conf, pp. 868-873. (<https://doi.org/10.1109/cca.2000.897551>)
2. K. H. Kim, 2005, "Nonlinear speed control for a PM synchronous motor with a sequential parameter auto-tuning algorithm", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 152, No. 5, pp. 1253-1262. (<https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050037>)
3. S. M. Yang and Y. J. Deng, 2005, "Observer-based inertial identification for auto-tuning servo motor drives", in Conf. Rec. 40th IEEE IAS Annu. Meeting, Oct. 2-6, pp. 968-972. (<https://doi.org/10.1109/ias.2005.1518467>)
4. S. S. Park and S. K. Jeong, 2017, "Performance Analysis and Automatic Configuration of Threshold on Anti-Pinch System Based on Current Information for Power Windows", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 63-70.
5. S. M. Yang, and K. W. Lin, 2016, "Automatic Control Loop Tuning for Permanent-Magnet AC Servo Motor Drives", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 3, pp. 1499-1506. (<https://doi.org/10.1109/tie.2015.2495300>)
6. Y. S. Jung and M. G. Kim, 2021, "Measurement of Parameters of Permanent Magnet Synchronous Machine", Proceedings of the 2021 KSPSE Spring Conference, pp. 113-114.

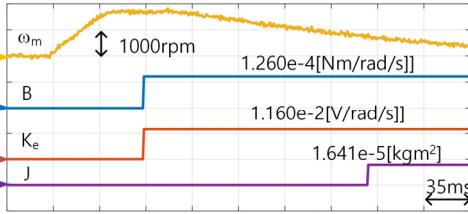


Fig. 7 Speed waveform and identified B, K_e and J

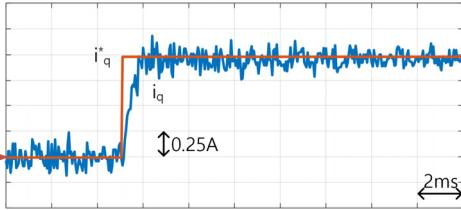


Fig. 8 q-axis current with q-axis current command

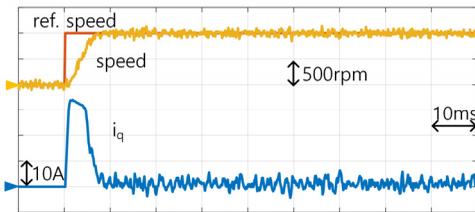


Fig. 9 Speed response with reference speed and q-axis current

5. 결 론

고성능 구동시스템 설계를 위한 영구자석형 동기전동기의 파라미터를 실험적으로 측정하였으며, 기존 연구에서 제시한 측정시간인 1.4초보다 짧은 시간인 0.325초 이내에 이루어짐을 확인하였다. 권선저항을 측정하기 위해 연속적으로 d-축 전압을 인가하였으며, 전류제어 이후 속도 제어 천이 없이도 비교적 정확히 관성모멘트의 측정이 가능함을 확인하였다. 측정된 파라미터의 정확성은 전류제어기 및 속도제어기의 이득설정 에 사용하여 전류 및 속도응답으로 실험적으로 확인하였다.