

위치센서가 없는 영구자석형 동기전동기의 파라미터 측정 Parameter Measurement of PMSM without Position Sensors

정영석* †
Young-Seok Jung* †

(Received 25 May 2024, Revision received 21 June 2024, Accepted 21 June 2024)

초록 : 영구자석형 동기전동기의 고효율 운전을 위해서는 전동기 파라미터에 대한 정보가 필수적이다. 복잡한 추정 알고리즘이나 별도의 평가장치 없이 개발 제어보드를 이용할 경우, 전동기 파라미터 측정을 위해 임의의 전압 또는 전류를 권선에 흘려 측정할 수 있으나, 기존에는 회전자의 위치센서가 있는 경우에 대한 연구만 보고되었다. 본 논문에서 회전자 위치 센서가 없는 경우의 전동기 파라미터 측정을 위한 방안을 제시한다. 측정된 파라미터를 이용하여 전류제어기 및 속도제어기를 설계하여 원하는 제어성능을 만족함을 보인다. 제시한 방법의 유용성을 확인하기 위해 실험으로 검증한다.

키워드 : 센서리스 제어, 영구자석형 동기전동기, 파라미터 측정

Abstract : For high-efficiency operation of permanent magnet synchronous motors, information about motor parameters is essential. When using a development control board without a complex algorithm or separate evaluation device, arbitrary voltage or current can be measured by flowing through the windings to measure motor parameters. However, existing studies have only been reported on cases with a rotor position sensor. In this paper, we present a method for measuring motor parameters when there is no rotor position sensor. It is shown that the desired control performance is satisfied by designing a current controller and a speed controller using the measured parameters. To confirm the usefulness of the proposed method, it is verified through experiments.

Key Words : Sensorless Control, Permanent Magnet Synchronous Motor, Parameter Measurement

— 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 [Vsec/rad]
 J : 회전자 관성모멘트 [kgm^2]

B : 점성마찰계수 [Nm/rad/sec]
 λ_m : 쇠교자속 [Wb]

1. 서 론

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 높은 효율성, 고신뢰성 및 제어 편의성으로 다양한 분야에서 많이 활용되고 있다.¹⁾ 모터 파라미터를 구하고 이

* † 정영석(<https://orcid.org/0000-0001-8086-6928>) : 교수,
국립부경대학교 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

를 이용한 제어기 설계를 통하여 고성능 구동 시스템을 구현할 수 있다. 모터의 파라미터를 구하기 위해 관측기를 구성하거나, 모터 설계 프로그램의 해석 결과를 이용할 수 있으나 모터 제어기에 추가적 부하를 주거나 모터해석 데이터를 구하는 등의 부가적 일들이 요구된다.^{2,3)} 또 다른 연구에서는 모터 파라미터 측정을 위해 별도의 평가 장치를 구성하여 각종 전류, 전압, 토크, 속도 센서 및 계측 시스템을 사용하여 정확한 측정을 시행하였으나, 그 구성이 복잡하고 별도의 장치가 필요하다.⁴⁾ 이런 방법과 달리 산업현장에서 개발하려는 제어보드를 그대로 사용하면서 모터 파라미터를 측정할 수 있는 방법에 대한 연구도 진행되었다. 이 방법은 모터에 일정 전압 또는 전류를 인가하여 모터 파라미터를 측정하는 방법으로 제어기가 인가한 전압과 저항센서로 얻은 전류정보를 이용한다.⁵⁻⁸⁾ 그러나 이들 논문에서 제시한 방식은 회전자 위치 센서를 내장한 구동 시스템에 대한 내용이며 회전자 위치 센서가 없는 경우에 대해서는 다루지 않았다. 동기전동기를 응용하는 전기자동차 및 가정용 전기구동 시스템의 경우 회전자 위치센서를 사용하기 어려운 에어컨 공조 시스템 등에서 센서리스 제어의 응용이 증가하고 있다. 센서리스 제어를 적용한 구동시스템에 비교적 간단히 적용 가능한 모터 파라미터 측정 방법을 제시하고자 한다.

본 논문에서는 센서리스 제어를 이용하는 동기전동기를 대상으로 실험적으로 전동기의 파라미터를 구하는 방법을 다룬다. 회전자의 위치를 임의로 고정하여 d축 전압을 인가하면 권선 저항을 구할 수 있으며, 짧은 시간 동안 d축 및 q축 전압 인가를 통하여 d축 및 q축 인덕턴스를 측정한다. 마찰계수, 역기전력상수 및 회전자 관성모멘트는 모터를 구동하면서 측정 가능하므로 이전 단계에서 구한 권선저항 및 인덕턴스를 이용하여 센서리스 구동방식을 적용하여 구동하고 이 과정에서 이들 파라미터를 구할 수 있다. 파라미터 측정을 위해 구동되는 동안은 전류제어를 통해 구동되며 모든 파라미터 측정을 마친 후 속도 제어를 수행할 수 있다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 실험을 통해 확인한다.

2. PMSM 모델링 및 센서리스 알고리즘

2.1 모델링

영구자석형 동기전동기의 회전자 프레임에서의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_d = (r_s + L_d s)i_q - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$v_q = (r_s + L_q s)i_d + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_m \quad (2)$$

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 자속에 의해 형성된 쇄교자속이며, ω_r 은 회전자 전기 각속도, s 는 라플라스 미분 연산자이다. 동기전동기의 토크 식 및 운동방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

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.

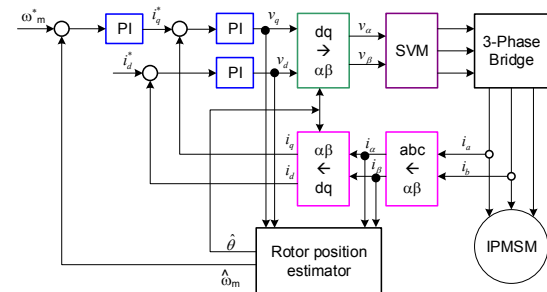


Fig. 1 Motor control system employing sensorless algorithm

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

Fig. 1은 센서리스 알고리즘을 적용한 모터 속도 제어시스템을 나타낸 것이다. 모터의 회전 속도를 제어하기 위해 속도제어기(PI)와 토크제어를 위한 전류제어기(PI)가 있으며 회전자 위치를 추정하기 위한 회전자 위치 추정기가 나타나 있다.

2.2 센서리스 알고리즘

역기전력 추정방식, 자속추정방식, 고주파 주입방식등의 다양한 회전자 위치센서 없는 센서리스 알고리즘이 제시되어 있으나 본 연구에서는 모터 파라미터 측정을 위해 확장된 역기전력(Extended EMF) 추정방식을 적용하며 이를 간단히 소개한다. 확장된 역기전력 추정방식에서는 식 (2)에 주어진 모터 방정식을 다음과 같이 변형한다.

$$v_q = (r_s + L_d s)i_q + \omega_r L_q i_d + E_{cx} \quad (6)$$

단, $E_{cx} = \omega_r [(L_d - L_q)i_d + \lambda_m] - (L_d - L_q)(p i_q)$ 이다. 실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치 사이의 오차를 $\theta_e = \theta - \hat{\theta}$ 로 정의하고 추정된 회전축(γ - δ 축)에서 모터 방정식을 다시 정의하면 다음과 같이 된다.

$$v_\gamma = (r_s + L_d s)i_\gamma - \omega_r L_q i_\delta + e_\gamma \quad (7)$$

$$v_\delta = (r_s + L_q s)i_\delta + \omega_r L_d i_\gamma + e_\delta \quad (8)$$

$$e_\gamma = -E_{cx} \sin \theta_e - (\hat{\omega} - \omega) L_d i_\delta \quad (9)$$

$$e_\delta = E_{cx} \cos \theta_e + (\hat{\omega} - \omega) L_d i_\gamma \quad (10)$$

식 (9)와 (10)으로부터 회전자 위치 오차가 작다고 가정할 경우, 회전자 위치 추정 오차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1}(-e_\gamma/e_\delta) \quad (11)$$

3. 파라미터 측정

모터에 회전자 위치 센서가 있는 기존 연구에서는 회전자 위치 센서 정보를 이용하여 테스트 신호를 인가하면 되었으나, 회전자 위치 센서가 없는 경우는 다른 방법을 적용해야 한다. 먼저 회전자를 d-축으로 정렬시켜 테스트 신호를 인가하고 권선저항(r_s), d-q축 인덕턴스(L_d, L_q)를 먼저 추정한다. 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 측정한다. 역기전력 상수(K_e), 마찰계수(B) 및 관성모멘트(J) 측정을 위해서는 모터를 구동하여야 하므로 먼저 가상의 회전속도와 q축 전류제어를 통하여 동기속도를 실시하며 센서리스 구동이 가능할 정도의 속도에 도달하면 센서리스 알고리즘에 의해 천이하여 구동한다. 이 과정에서 인가하는 전압벡터의 크기를 제한하면 모터의 속도가 증가함에 따라 모터 역기전력이 증가하여 명령한 전류를 추종하지 못하는 구간으로 진입하게 되어 전류가 감소하게 된다. 이 시점에 역기전력 상수(K_e)와 마찰계수(B)를 측정할 수 있다. 이후 q축 전류명령을 영으로 유지하여 감속한다. 이때 모터 토크가 영으로 유지되어 관성모멘트(J)를 측정할 수 있다. 이 과정은 Fig. 3에 나타나 있다.

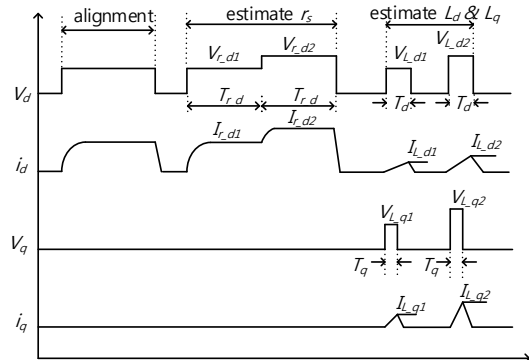
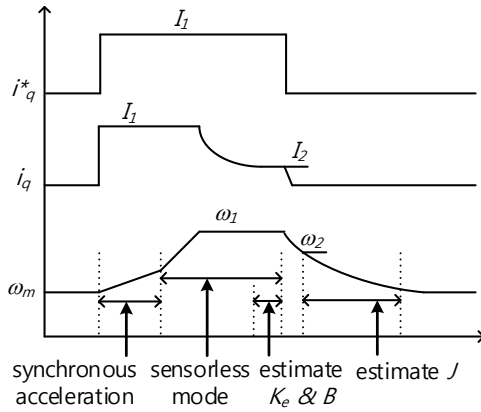


Fig. 2 Test signals(V_d, V_q) to estimate r_s, L_d and L_q


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

3.1 권선 저항 및 인덕턴스

권선저항 및 인덕턴스는 모터가 정지 상태에서 측정하므로 회전자를 d-축에 정렬한 후 측정하면 기존에서 사용하던 방법을 그대로 적용 가능하다. d-축으로 정렬을 위해 모터의 회전자 위치를 0도로 고정하고 d-축 전압을 인가하여 시행한다.

$$r_s = \frac{V_{r_d2} - V_{r_d1}}{I_{r_d2} - I_{r_d1}} \quad (12)$$

$$L_d = \frac{V_{L_d2} - V_{L_d1}}{I_{L_d2} - I_{L_d1}} T_d \quad (13)$$

$$L_q = \frac{V_{L_q2} - V_{L_q1}}{I_{L_q2} - I_{L_q1}} T_q \quad (14)$$

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

3.2 역기전력 상수, 마찰계수 및 관성모멘트

역기전력 상수를 측정하기 위해서는 모터를 기동하여야 하나 회전자 위치 센서가 없으므로 일정 속도에 도달할 때까지는 임의의 회전자 각에 따라 가속하는 동기가속을 시행한다. Fig. 3과 같이 권선저항과 인덕턴스 측정한 값을 이용하여

전류제어에 의해 모터의 가속을 시행한다. 이때 인가하는 전압을 일정 전압으로 제한하여 모터의 속도는 ω_1 이상으로 증가하지 못하고 q축 전류는 감소하여 I_2 에 수렴하게 한다. d축 전류는 0으로 유지하고 있으므로 식 (2)로부터 다음과 같이 역기전력 상수를 구할 수 있으며, 마찰계수는 식 (3)과 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$K_e = \frac{P}{2} \lambda_m = \frac{v_q - r_s i_2}{\omega_1} \quad (15)$$

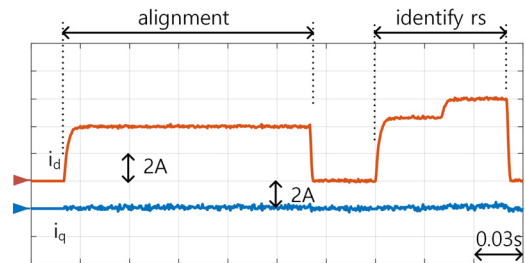
$$B = \frac{3}{2} \frac{K_e \cdot i_2}{\omega_1} \quad (16)$$

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

$$\omega_m = \omega_2 \cdot e^{-\frac{B}{J}t} \quad (17)$$

4. 실험 결과

Fig. 4는 회전자의 위치를 d축에 고정시키기 위해 정렬하는 과정과 권선 저항을 측정하기 위해 d축에 각 0.35 V, 0.37 V, 0.43 V 전압을 인가하여 전류를 측정한 파형이며, Fig. 5는 인덕턴스 측정을 위해 d축 및 q축에 각 1.48 V와 2.11 V를 100 μ sec 동안 인가한 후 측정한 전류파형이다.


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

실험으로부터 구한 권선 저항은 0.039Ω 이며, d 축 인덕턴스는 $88.30 \mu H$, q축 인덕턴스는 $153.7 \mu H$ 이다.

Fig. 6은 권선저항, d-q축 인덕턴스, 역기전력상수, 마찰계수 그리고 관성모멘트를 측정하는 전 과정의 d-q축 전류와 모터 회전 속도를 나타낸 실험 파형이다. 모터를 d축으로 정렬한 후 권선저항, d-q축 인덕턴스를 측정한 후 전류제어를 통해 모터를 동기 가속으로 일정속도(500 rpm)로 가속한 후 센서리스 알고리즘으로 추정된 회전자 위치를 이용하여 구동 천이 후 지속 가속하여 역기전력상수 및 마찰계수를 측정하고 자연 감속을 통해 관성모멘트를 측정하고 있으며, 이 과정은 대략 0.99초 정도로 이루어진다.

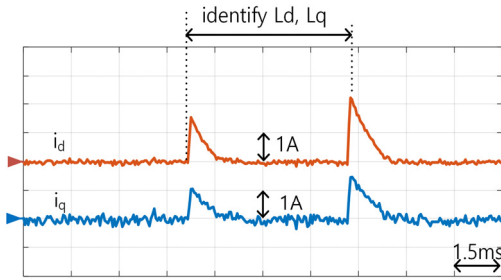


Fig. 5 q & d-axis currents for L_d and L_q measurement

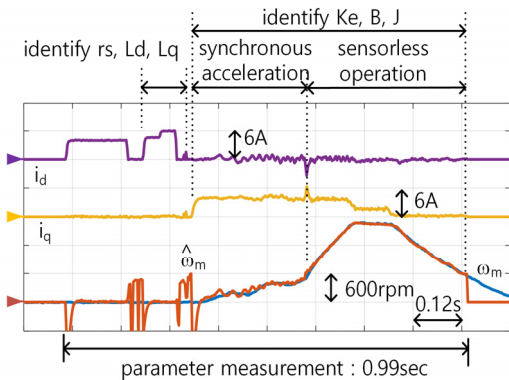


Fig. 6 q & d-axis currents and speed waveforms to identify the motor parameters

Table 1 Parameter of PMSM

Parameter	Value	Unit
phase resistance: r_s	0.039	Ω
q-axis inductance: L_q	153.7	μH
d-axis inductance: L_d	88.30	μH
Moment of Inertia: J	$2.539e^{-5}$	$kg \cdot m^2$
Viscous frictional coefficient: B	$1.419e^{-4}$	$Nm/rad/s$
Back EMF constant: K_e	0.011	$V/rad/s$

Table 1에는 측정한 모터의 파라미터를 나타내었다. 측정한 모터 파라미터를 이용하여 전류제어 루프의 차단주파수가 200 Hz가 되도록 전류제어기 이득을 설정하여 측정한 q축 전류응답과 속도응답을 Fig. 7에 나타내었다. 속도제어기 이득은 속도제어 루프의 차단주파수가 5 Hz가 되도록 설정하였으며, Fig. 8에 그 응답을 나타내었다. 전류응답은 4 m/sec 이내, 속도응답은 80 m/sec 이내에 응답이 이루어짐을 확인할 수 있다.

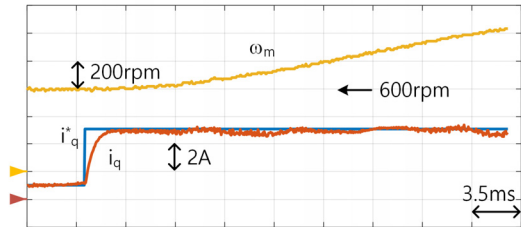


Fig. 7 Speed, q-axis current and q-axis current command

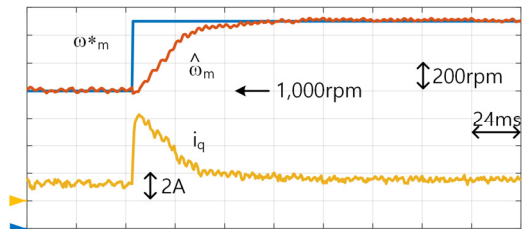


Fig. 8 Speed response with reference speed and q-axis current

5. 결 론

센서리스 제어를 사용하는 동기전동기 구동 시스템 제어를 위해 전동기의 파라미터를 실험적으로 측정하였다. 회전자를 d축으로 정렬한 후 권선저항과 d-q축 인덕턴스를 측정하고, 전류 제어를 사용하여 동기가속 및 센서리스 제어로의 천이를 수행하여 나머지 파라미터도 측정할 수 있음을 보였다. 개발용 제어보드만을 사용하여 기존에 제시되지 않은 센서리스 제어에서의 파라미터 측정을 수행하였으며, 측정한 파라미터로 제어기를 구성하여 원활한 센서리스 제어가 수행됨을 확인하였다. 측정한 파라미터를 전류제어기 및 속도제어기의 이득설정에 사용하여 전류 및 속도응답을 실험적으로 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2023년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

Y. S. Jung; Conceptualization, Investigation, Validation, Supervision.

References

1. T. Higashiyama, M. Mine, H. Ohmori, A. Sano and Y. Todaka, 2000, "Auto-tuning of motor drive system by simple adaptive control approach", Proc. IEEE Control Appl. Int. Conf, 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., 152(5), 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, 968-972.
(<https://doi.org/10.1109/ias.2005.1518467>)
4. C. Candelo-Zuluaga, J-R Riba and A. Garcia, 2021, "PMSM Parameter Estimation for Sensorless FOC Based on Differential Power Factor", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70.
(<https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3096861>)
5. 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, 21(5), 63-70.
6. S. M. Yang and Ku. W. Lin, 2016, "Automatic Control Loop Tuning for Permanent-Magnet AC Servo Motor Drives", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 63(3), 1499-1506.
(<https://doi.org/10.1109/tie.2015.2495300>)
7. Y. S. Jung and M. G. Kim, 2021, "Measurement of Parameters of Permanent Magnet Synchronous Machine", Proceedings of the 2021 Korean Society for Power System Engineering Spring Conference, 113-114.
8. Y. S. Jung, 2022, "Measurement of Parameters of Permanent Magnet Synchronous Motor for Controller Design", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 26(3), 55-59.