

최소자승법을 이용한 영구자석 동기전동기의 파라미터 추정

권기훈, 이교범
아주대학교

Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Motors using a Least Squares Method

Ki-Hoon Kwon, Kyo-Beum Lee
Ajou University

ABSTRACT

This paper presents a method to estimate the parameter of permanent magnet synchronous motor using a least squares method. The approximate solution of the linear simultaneous equations is obtained by the pseudoinverse least squares method of the input current and output voltage data of the current controller. It is possible to obtain the current response of the same bandwidth to the general control target by using the Pole-zero Cancellation technique. This paper verifies the performance of the proposed method by comparing the results of estimation of parameters of different motors by simulation.

1. 서론

본 논문은 최소자승법을 이용한 영구자석 동기전동기의 파라미터 추정에 관한 방법을 제안한다. 전동기의 회전자가 고정되어 있다고 가정하면, 전압방정식의 역기전력 성분이 제거되어 고정자저항과 인덕턴스에 관한 식으로 간소화 할 수 있다^[1]. 입력 전류와 출력 전압의 데이터를 의사역행렬을 이용한 최소자승법으로 선형연립방정식의 근사 해를 구하여 전동기의 파라미터를 추정한다^[2]. 추정된 파라미터를 전류 제어기의 영점이 전동기의 극점을 상쇄하는 극점-영점 상쇄 기법을 사용하면 범용적인 제어 대상에 동일한 대역폭의 전류 응답을 얻는 것이 가능하다^[3]. 본 논문은 시뮬레이션으로 서로 다른 전동기의 파라미터를 추정하여 제안한 방법의 성능을 검증한다.

2. 전동기의 파라미터 추정

2.1 최소자승법^{[2],[3]}

최소자승법은 식 (1)의 수학적 모델로 표현된다.

$$y(i) = \varphi^T(i)\theta^0 \quad (1)$$

의사역행렬을 이용한 선형연립방정식의 근사해는 식 (2)이다.

$$\hat{\theta} = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY \quad (2)$$

2.2 전동기의 파라미터 추정^{[5]-[7]}

전동기의 회전자가 고정되어 있다고 가정하면, 회전자의 속도가 0이 되어 전동기의 수학적 모델은 식 (3)과 같이 고정자 저항과 인덕턴스에 의한 식으로 간소화할 수 있다.

$$u_{dq} = R_s i_{dq} + L_{dq} \frac{di_{dq}}{dt} \quad (3)$$

식 (4)는 식 (3)의 이산시간 모델이다.

$$i_n = \frac{L}{L+R\Delta t} i_{n-1} + \frac{\Delta t}{L+R\Delta t} u_{n-1} \quad (4)$$

식 (4)의 상수 부분을 k_1 과 k_2 로 치환하면, 식 (5)로 표현된다.

$$i_n = k_1 i_{n-1} + k_2 u_{n-1} \quad (5)$$

이 때, 상수 k_1 과 k_2 는 식 (6)과 같다.

$$k_1 = \frac{L}{L+R\Delta t}, \quad k_2 = \frac{\Delta t}{L+R\Delta t} \quad (6)$$

여기서, 식 (6)의 두 식을 연립하면, 식 (7)과 같이 고정자 저항 R과 인덕턴스 L로 정리된다.

$$R = \frac{1-k_1}{k_2}, \quad L = \frac{k_1}{k_2} \Delta t \quad (7)$$

데이터 샘플링을 N번 한다고 가정하면, 2개의 상수 k_1 과 k_2 를 가진 N개의 선형 연립방정식으로 나타낼 수 있고, 식 (8)과 같이 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 & u_0 \\ i_1 & u_1 \\ \vdots & \vdots \\ i_{n-1} & u_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (2)의 방법으로, 식 (8)의 상수 k_1 과 k_2 를 계산 가능하다. 계산된 해를 식 (7)에 대입하여 고정자 저항 R과 인덕턴스 L을 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델링^[4]

제한한 성능을 검증하기 위하여 그림 1과 같이 모델링하고, 서로 다른 파라미터의 전동기 5대의 시뮬레이션을 수행하였다. 각 전동기에 대한 파라미터의 실제 값과 추정 값을 비교하고 오차율을 계산하였다.

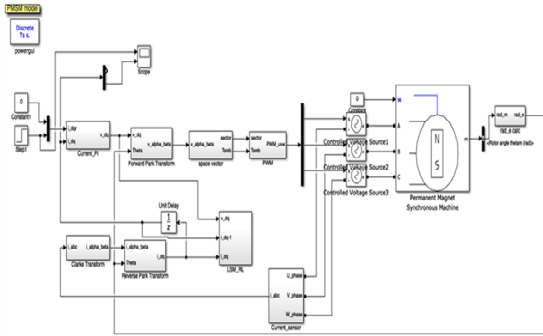


그림 1 파라미터 추정을 위한 벡터제어 모델링
Fig. 1 Vector Control Modeling for Parameter Estimation

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 추정 값의 오차율은 고정자 저항은 0.001% 이하, 인덕턴스는 0.02% 이하이다. 제시한 알고리즘을 실제 실험에 적용하면 제어기의 샘플링 오차, 전류 및 전압 센싱 오차, PWM의 시간지연 등으로 인해 시뮬레이션 결과보다 오차가 더 크게 발생할 것으로 예상된다.

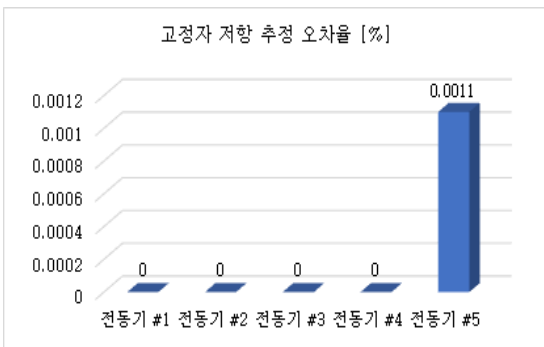


그림 2 고정자 저항 추정 오차율 그래프
Fig. 2 Stator resistance estimation result graph

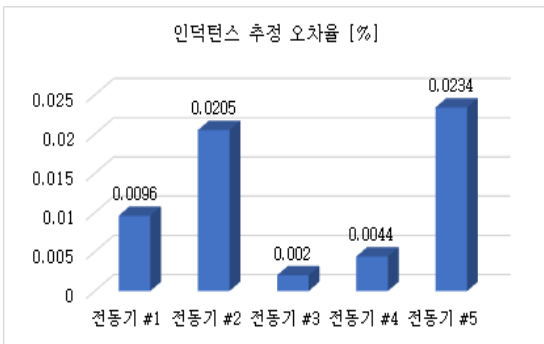


그림 3 인덕턴스 추정 오차율 그래프
Fig. 3 Inductance estimation result graph

표 1 고정자 저항 추정 결과 표

Table 1 Stator resistance estimation result table

항 목	전동기#1	전동기#2	전동기#3	전동기#4	전동기#5
실제 값 [mΩ]	0.62	0.9585	0.4578	0.129	0.0918
추정 값 [mΩ]	0.62	0.9585	0.4578	0.129	0.0917
오차 [mΩ]	0	0	0	0	0.0001
오차율 [%]	0	0	0	0	0.0011

표 2 인덕턴스 추정 결과 표

Table 2 Inductance estimation result table

항 목	전동기#1	전동기#2	전동기#3	전동기#4	전동기#5
실제 값 [mH]	2.179	5.513	3.507	1.607	1.024
추정 값 [mH]	2.2	5.4	3.5	1.6	1
오차 [mH]	0.021	0.113	0.007	0.007	0.024
오차율 [%]	0.0096	0.0205	0.002	0.0044	0.0234

4. 결론

본 논문은 최소자승법을 이용한 영구자석 동기전동기의 파라미터 추정에 관한 방법을 제안하였다. 입력 전류와 출력 전압의 데이터를 의사역행렬을 이용한 최소자승법으로 선형연립방정식의 근사 해를 구하여 전동기의 파라미터를 추정했다. 그리고, 시뮬레이션으로 서로 다른 모터의 파라미터를 추정하여 제안한 방법의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] G. Strang, Linear Algebra and Its Application: Fourth Edition, Thomson Learning Inc., pp. 160-170, 2006.
- [2] K. J. Astrom, and B. Wittenmark, Adaptive Control: Second Edition, Addison-Wesley, pp. 42-46, 1995.
- [3] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-naeini, Feedback Control of Dynamic System: Sixth Edition, Pearson, pp. 147-154, 2009.
- [4] 이교범, 전동기 제어, 한티미디어, pp. 298-353, 2014.
- [5] J. S. Yoon, K. G. Lee, J. S. Lee, and K. B. Lee, "Off-Line Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Using a Goertzel Algorithm", J. Elec. Eng. Tech., vol.10, no.6, pp. 2262-2270, 2015.
- [6] H. I. Omrane, E. Etien, O. Bachelier, and W. Dib, "A simplified least squares identification of permanent magnet synchronous motor parameters at standstill", IEEE Ind. Elec. Soc., pp. 2578-2583, Nov. 2013.
- [7] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Cirrincione, and G. Capolino, "A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the induction motor parameters", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, no.5, Sep. 2003.