

교차 결합 현상에 의한 영구자석 동기전동기의 제정수 추정 오차 분석

정의훈, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Analysis on Parameter Estimation Error of Permanent Magnet Synchronous Machine(PMSM) Considering Cross Coupling Effect

Euihoon Chung and Jung Ik Ha

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

영구자석 동기전동기(PMSM)의 효율적인 구동을 위해 전동기의 제정수를 실시간으로 정확하게 추정하는 것이 매우 중요하다. 대부분의 전동기 제정수 추정 기법은 전동기의 교차 결합 현상(Cross coupling effect)을 고려하지 않은 전동기 모델을 이용한다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기에서 기존의 제정수 추정 기법을 적용할 경우 교차 결합 현상에 의해 발생하는 제정수의 추정 오차를 수학적으로 분석하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 고효율 및 고전력밀도 등의 장점에 의해 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 영구자석 전동기의 제어 성능을 개선하기 위하여 전동기의 제정수를 정확하게 측정 또는 추정하는 것이 중요하다. 제정수는 구동 조건에 따라 크게 달라지므로 구동 중에 제정수를 실시간으로 추정하는 다양한 기법이 제안되어 왔다.^[1-4] 이러한 추정 기법들은 주로 전동기의 d, q축 전압 모델에 기반 하므로 철손 또는 포화현상 등으로 인한 전동기 특성 변화를 모델에 제대로 반영하지 않을 경우 제정수의 추정 오차가 발생한다. [1]과 [2]는 제정수 추정을 위해 d축에 전류를 주입하는 방식을 사용했는데, 주입하는 전류가 매우 작다는 가정을 통해 포화에 의한 제정수의 변동을 무시하였다. [3]은 작은 주입 전류에 의한 자기 인덕턴스(Self inductances)의 변화가 선형적으로 일어난다는 가정을 통해 포화 현상을 고려하였다. [4]는 포화 현상을 고려하여 d, q축 자기 인덕턴스를 전 운전 영역에서 미리 측정하고 저항 및 역기전력 상수 추정에 이를 참조표 형태로 활용하였다. 이처럼 자기 포화 현상에 대한 고려는 기존 논문에서도 어느 정도 이루어졌지만 교차 결합 인덕턴스(Cross coupling inductances)에 의한 영향은 주로 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 교차 결합 인덕턴스 성분을 전동기 모델에 제대로 반영하지 않을 경우 발생하는 제정수 추정 오차를 수학적으로 분석하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 본론

2.1 기존 제정수 추정 기법

영구자석 동기전동기의 d, q축 전압 모델은 그림 1과 같이

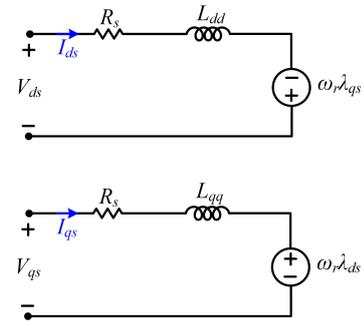


그림 1 영구자석 동기전동기의 d, q축 모델
Fig. 1 D- and q-axis model of IPMSM

표현할 수 있다. 이때 교차 결합 인덕턴스를 무시하면 d, q축 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + L_{dd} \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_r L_{qq} I_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + L_{qq} \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_r L_{dd} I_{ds} + \omega_r \lambda_f \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 R_s 은 상저항, L_{dd} 는 d축 자기 인덕턴스, L_{qq} 는 q축 자기 인덕턴스, λ_f 는 역기전력 상수, ω_r 은 전동기 구동 속도이다. 기존 연구에서는 4개의 제정수를 동시에 추정하기 위해 주로 신호 주입을 통해 충분한 식의 개수를 확보하는 방식을 사용하였다. 이때, 전류 주입에 의한 토크 맥동을 최소화하기 위하여 주로 d축에 DC 또는 AC 전류를 주입한다.^[1,2] 여기서, 주입된 전류에 의한 제정수의 변동이 없다고 가정하면 DC 전류 주입의 경우 다음과 같이 전동기 제정수를 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_s \\ L_{ds} \\ L_{qs} \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ds}[k_0] & 0 & -\omega_r I_{qs}[k_0] & 0 \\ I_{qs}[k_0] & \omega_r I_{ds}[k_0] & 0 & \omega_r \\ I_{ds}[k_1] & 0 & -\omega_r I_{qs}[k_1] & 0 \\ I_{qs}[k_1] & \omega_r I_{ds}[k_1] & 0 & \omega_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds}[k_0] \\ V_{qs}[k_0] \\ V_{ds}[k_1] \\ V_{qs}[k_1] \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 교차 결합 현상 고려 시 제정수 오차 분석

전동기 구조에 따라 또는 포화 정도에 따라 교차 결합 인덕턴스를 무시할 수 없는 경우 d, q축 자속은 각각 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_{dd} I_{ds} + L_{dq} I_{qs} + \lambda_f \\ \lambda_{qs} &= L_{qq} I_{qs} + L_{qd} I_{ds} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 L_{dq} 와 L_{qd} 는 교차 결합 인덕턴스를 의미한다.

따라서 정상 상태에서 d, q축 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} - \omega_r L_{qq} I_{qs} - \omega_r L_{qd} I_{ds} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \omega_r L_{dd} I_{ds} + \omega_r L_{dq} I_{qs} + \omega_r \lambda_f \end{aligned} \quad (4)$$

2.1절의 기존 제정수 추정 방식에서는 교차 결합 인덕턴스에 의한 전압 성분을 고려하지 않으므로 이 전압 성분을 전압 오차로 인식하게 된다. 전압 오차로 인식되는 교차 결합 인덕턴스에 의한 d, q축 전압 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{ds} &= -\omega_r L_{qd} I_{ds} \\ \Delta V_{qs} &= \omega_r L_{dq} I_{qs} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 교차 결합 인덕턴스에 의한 제정수 추정 오차는 식(2)와 (5)로부터 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_{ds} \\ \Delta L_{qs} \\ \Delta \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ds}[k_0] & 0 & -\omega_r I_{qs}[k_0] & 0 \\ I_{qs}[k_0] \omega_r I_{ds}[k_0] & 0 & \omega_r & \\ I_{ds}[k_1] & 0 & -\omega_r I_{qs}[k_1] & 0 \\ I_{qs}[k_1] \omega_r I_{ds}[k_1] & 0 & \omega_r & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_{ds}[k_0] \\ \Delta V_{qs}[k_0] \\ \Delta V_{ds}[k_1] \\ \Delta V_{qs}[k_1] \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(5)와 (6)에 의해 추정 오차는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \Delta R_s &= -\omega_r L_{qd} \\ \Delta L_{ds} &= 0 \\ \Delta L_{qs} &= 0 \\ \Delta \lambda_f &= (L_{dq} + L_{qd}) I_{qs}[k_0] \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)의 결과는 교차 결합 인덕턴스에 의한 제정수 추정 오차가 저항과 역기전력 상수에 집중되어 나타남을 보여준다. 여기서, 저항 추정 오차는 전동기 구동 속도에 비례하여 증가하며 역기전력 상수의 추정 오차는 q축 전류에 비례하게 나타난다. 따라서 교차 결합 인덕턴스가 매우 작은 전동기라 할지라도 전동기 구동 속도가 매우 빠르거나 토크가 매우 큰 운전 영역에서는 교차 결합 현상에 의한 제정수의 추정 오차를 반드시 고려해야 한다.

2.3 시뮬레이션을 통한 분석 검증

이 절에서는 2.2절에서 분석한 교차 결합 인덕턴스에 의한 제정수 추정 오차를 시뮬레이션을 통해 검증한다. 시뮬레이션을 위해 Matlab Simulink를 이용하였으며, 전동기 모델에 교차 결합 인덕턴스를 추가하였다. 전동기의 제정수는 표 1과 같다. 시뮬레이션에서는 q축 전류를 고정된 상태에서 d축 전류에 DC 전류를 주입한 뒤 최소자승법(Recursive least square)을 통해 제정수를 추정하였다. 그림 2는 q축 전류가 50A일 때, 전동기 구동 속도에 따른 각 제정수의 추정 오차를 나타낸 결과이다. 이 결과는 2.2절에서 수학적으로 분석한 식(7)의 결과와 정확하게 일치한다.

표 1 시뮬레이션을 위한 전동기 제정수 값
Table 1 Parameters of IPMSM for simulation

제정수	값
R_s	0.0133[Ω]
L_{dd}	0.25[mH]
L_{qq}	0.79[mH]
λ_f	0.0977[V · rad/s]
L_{dq}	0.025[mH]
L_{qd}	0.079[mH]

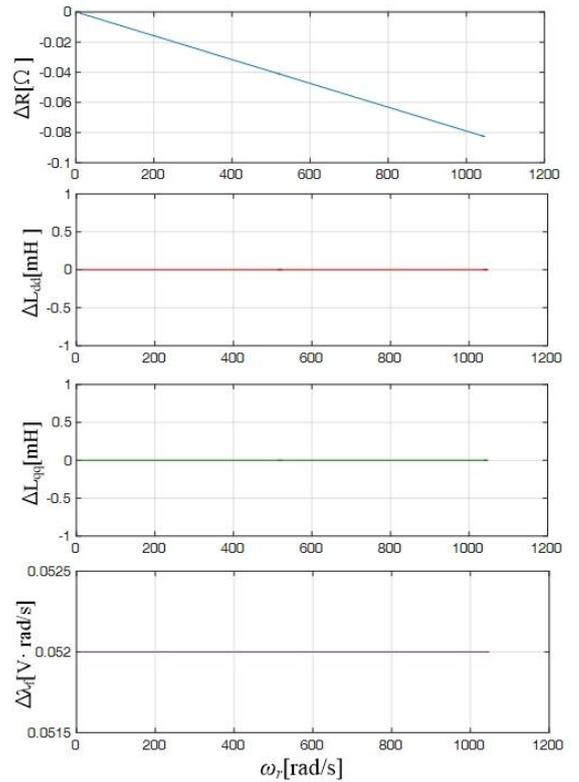


그림 2 전동기 속도에 따른 제정수 추정 오차 결과
Fig. 2 Simulation results of parameter estimation error according to motor speed

3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 제정수 추정 시 전동기 모델의 부정확성에 따른 추정 오차를 분석하였다. 특히, 교차 결합 현상을 전동기의 d, q축 전압 모델에 적절하게 반영하지 않을 경우 나타나는 제정수 추정 오차를 수학적으로 분석하고, 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] K. Liu, Z. Q. Zhu and D. A. Stone, "Parameter Estimation for Condition Monitoring of PMSM Stator Winding and Rotor Permanent Magnets," in IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 60, no. 12, pp. 5902-5913, Dec. 2013.
- [2] Q. Liu and K. Hameyer, "A Fast Online Full Parameter Estimation of a PMSM with Sinusoidal Signal Injection," Proc. of the IEEE, ECCE, Montreal, 2015, pp. 4091-4096.
- [3] G. Feng, C. Lai and N. C. Kar, "A Novel Current Injection Based Online Parameter Estimation Method for PMSMs Considering Magnetic Saturation," in IEEE Trans. on Mag., vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016.
- [4] S. L. Kellner and B. Piepenbreier, "Identification of Ohmic Stator Resistance Based on Low Frequency Current Signal Injection in Permanent Magnet Synchronous Machines," Proc. of the IEEE, PEMC, 2010, pp. T5-221-T5-229.