УДК 621.313.32

СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С НЕПОДВИЖНЫМ РОТОРОМ КАК ОБЪЕКТ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Ю.В. Кибартене

Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, Казахстан
E-mail: JuVK@yandex.ru

Рассмотрен синхронный электродвигатель как объект идентификации. Приведено математическое описание синхронного электродвигателя в пространстве состояния. Установлено, что синхронный электродвигатель является управляемым, наблюдаемым и идентифицируемым объектом. Сделан вывод о том, что к синхронному электродвигателю возможно применение известных методов параметрической идентификации для определения его параметров.

Ключевые слова:
Синхронный электродвигатель, параметрическая идентификация.

Key words:
Synchronous motor, parametric identification.

Требования повышения надежности и энергетической эффективности технологических процессов и оборудования предопределяют постановку и решение научно-технических задач по созданию новых эффективных систем автоматического управления и регулирования с синхронными электродвигателями (СД). Желаемая надежность и эффективность во многом определена свойствами электрической машины, а именно, параметрами СД, точные значения которых необходимы для формирования требуемых статических и динамических режимов.

Реальные параметры электродвигателей могут значительно отличаться от паспортных данных, а также данных, приводимых в справочной и технической документации, клиентских и наладочных формулярах. Это отличие может превышать 5...20 %.

Отличие реальных параметров от расчетных оказывает значительное влияние на статические и динамические показатели систем автоматического управления и регулирования с СД, серьезно ухудшая показатели надежности и энергетической эффективности технологического объекта.

Это вызывает необходимость создания специального инструмента, позволяющего простыми средствами осуществлять идентификацию параметров СД. Таким инструментом могут стать созданные научно-обоснованный метод, разработанные алгоритмы и технические реализации, обеспечивающие эффективную идентификацию параметров обмоток СД различных конструктивных модификаций в режиме с неподвижным ротором [1]. Необходимыми условиями для обеспечения успешной идентификации параметров СД в режиме с неподвижным ротором являются следующие специальные требования к входным и выходным сигналам: входной сигнал должен возбуждать все собственные колебания объекта (объект должен быть управляемым), а выходной сигнал должен содержать достаточно информации об объекте (объект должен быть наблюдаемым и идентифицируемым) [2, 3]. Поэтому возникает необходимость проанализировать синхронный электромеханический преобразователь с точки зрения объекта идентификации.

Управляемость, наблюдаемость и идентифицируемость объекта определяется из его математического описания в пространстве состояния методом переменных состояния. Модель состояния в общем случае имеет вид [2, 3]

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U; \quad Y = C \cdot X, \qquad (1)$$

где ***A, B, C*** – матрицы коэффициентов, соответственно: переменных состояния, размерностью $n \times n$; управления, размерностью $n \times r$; выхода, размерностью $m \times n$; ***X*** – n-мерный вектор-столбец переменных состояния; ***Y*** – m-мерный вектор-столбец выходных координат; ***U*** – r-мерный вектор-столбец переменных управления.

Для представления СД в пространстве состояния воспользуемся математической моделью, представленной в виде дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы, протекающие в СД. Уравнения электромеханического преобразования не учитываются, т. к. идентификация проходит при неподвижном роторе, следовательно, M=0 и ω=0.

Математическое описание синхронного электродвигателя без демпферных обмоток представлено в виде, приведенном в [4–6]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_d}{dt} \\ \frac{d\psi_q}{dt} \\ \frac{d\psi_f}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \qquad (2)$$

где индексы: d и q – статорной обмотки по продольной и поперечной осям d и q; f – обмотки возбуждения.

Потокосцепления обмоток по поперечной и продольной осям определяются соотношениями

$$\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\\ \psi_f\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_d & 0 & x_{ad}\\ 0 & x_q & 0\\ x_{ad} & 0 & x_f\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_f\end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где ad – индекс взаимного влияния статорной обмотки и обмотки ротора по оси d.

Математическое описание неявнополюсного СД без демпферных обмоток может быть получено как частный случай из уравнений явнополюсной синхронной машины (2, 3), принимая $x_d=x_q$ и $x_{ad}=x_{aq}$.

По уравнениям (2), (3) строим структурную схему (рисунок). Примем за переменные состояния потокосцепления ψ_d, ψ_q, ψ_f. Выходными координатами являются токи по соответствующим осям i_d, i_q, i_f. Управляющими воздействиями будут напряжения u_d, u_q, u_f.

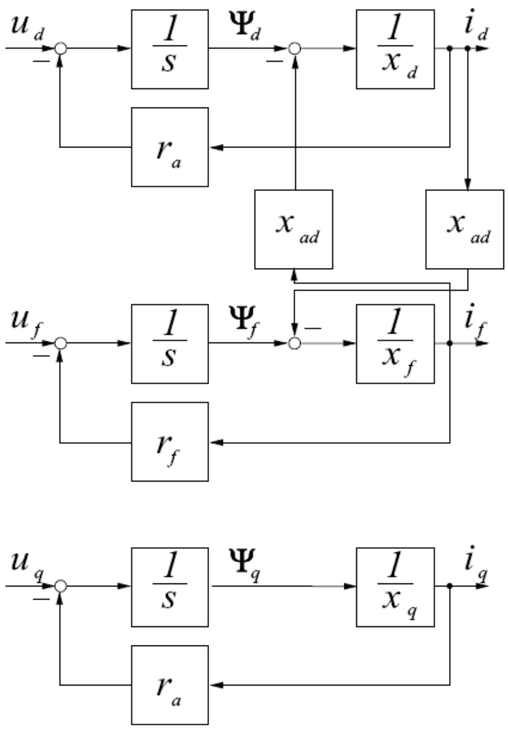

Рисунок. *Структурная схема синхронного электродвигателя без демпферных обмоток при неподвижном роторе*

На основании структурной схемы записываются выражения для определения переменных состояния

$$\dot\psi_d=u_d-\frac{r_a}{x_d}\psi_d+\frac{r_a x_{ad}}{x_f}\psi_f; \qquad (4)$$

$$\dot\psi_q=u_q-\frac{r_a}{x_q}\psi_q; \qquad (5)$$

$$\dot\psi_f=u_f+\frac{r_f x_{ad}}{x_d}\psi_d-\frac{r_f}{x_f}\psi_f. \qquad (6)$$

Выходные координаты также определяются через переменные состояния

$$i_d=\frac{1}{x_d}\psi_d-\frac{x_{ad}}{x_d x_f}\psi_f; \qquad (7)$$

$$i_q=\frac{1}{x_q}\psi_q; \qquad (8)$$

$$i_f=-\frac{x_{ad}}{x_f x_d}\psi_d+\frac{1}{x_f}\psi_f. \qquad (9)$$

Приведем уравнения (4–9) к виду (1)

$$\begin{bmatrix}\dot\psi_d\\ \dot\psi_q\\ \dot\psi_f\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{r_a}{x_d} & 0 & \frac{r_a x_{ad}}{x_d x_f}\\ 0 & -\frac{r_a}{x_q} & 0\\ \frac{r_f x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & -\frac{r_f}{x_f}\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\\ \psi_f\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}u_d\\ u_q\\ u_f\end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_f\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{x_d} & 0 & -\frac{x_{ad}}{x_d x_f}\\ 0 & \frac{1}{x_q} & 0\\ -\frac{x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & \frac{1}{x_f}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\\ \psi_f\end{bmatrix}.$$

СД является управляемым, если матрица управляемости U [2, 3]

$$U=[B\vdots\ \ AB\vdots\ \ A^2B]$$

имеет ранг равный трем (ранг матрицы равен порядку наибольшего минора, отличного от нуля).

$$U=$$

$$=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & -\frac{r_a}{x_d} & 0 & \frac{r_a x_{ad}}{x_d x_f} & a & 0 & b\\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{r_a}{x_q} & 0 & 0 & \left(\frac{r_a}{x_q}\right)^2 & 0\\ 0 & 0 & 1 & \frac{r_f x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & -\frac{r_f}{x_f} & c & 0 & d\end{bmatrix}.$$

$$a=\frac{r_a(r_f x_{ad}^2+r_a x_f^2)}{x_d^2 x_f^2};\quad b=-\frac{r_a x_{ad}(r_a x_f+r_f x_d)}{x_d^2 x_f^2};$$

$$c=-\frac{r_f x_{ad}(r_a x_f+r_f x_d)}{x_d^2 x_f^2};\quad d=\frac{r_f(r_a x_{ad}^2+r_f x_d^2)}{x_d^2 x_f^2}.$$

Система полностью наблюдаема, если по результатам наблюдения (измерения) выхода за ограниченный интервал времени можно оценить (восстановить) начальные значения всех переменных состояния. Для полной наблюдаемости СД необходимо и достаточно, чтобы матрица наблюдаемости N

$$N=[C^T \vdots A^T \vdots C^T \vdots (A^T)^2 C^T]$$

имела ранг, равный трем [2, 3].

$$N=$$

$$=\begin{bmatrix} \frac{1}{x_d} & 0 & -\frac{x_{ad}}{x_d x_f} & C & 0 & B & D & 0 & A \\ 0 & \frac{1}{x_q} & 0 & 0 & -\frac{r_a}{x_q} & 0 & 0 & \frac{r_a^2}{x_q^3} & 0 \\ -\frac{x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & \frac{1}{x_f} & B & 0 & E & A & 0 & F \end{bmatrix};$$

$$A=\frac{r_a r_f x_{ad}(x_d x_f - x_{ad}^2)+x_{ad}(r_a^2 x_f^2 - r_f^2 x_d^2)}{x_d^3 x_f^3};$$

$$B=\frac{x_{ad}(r_a x_f + r_f x_d)}{x_d^2 x_f^2}; \quad C=\frac{-r_a x_f^2 - r_f x_{ad}^2}{x_d^2 x_f^2};$$

$$D=\frac{r_a^2 x_f^3 - r_f^2 x_d x_{ad}^2}{x_d^3 x_f^3}; \quad E=\frac{-r_a x_{ad}^2 - r_f x_d^2}{x_d^2 x_f^2};$$

$$F=\frac{r_f^2 x_d^3 - r_a^2 x_f x_{ad}^2}{x_d^3 x_f^3}.$$

Система полностью идентифицируема, если по измерениям координат состояния объекта можно определить матрицу собственных (внутренних) коэффициентов системы [2, 3]. Для полной идентифицируемости СД необходимо и достаточно, чтобы матрица идентифицируемости I

$$I=[X \vdots AX \vdots A^2 X]$$

имела ранг, равный трем.

$$I=\begin{bmatrix} \psi_d & \frac{r_a(x_{ad}\psi_f - x_f\psi_d)}{x_d x_f} & X \\ \psi_q & -\frac{r_a}{x_q}\psi_q & \left(-\frac{r_a}{x_q}\right)^2 \psi_q \\ \psi_f & \frac{r_f(x_{ad}\psi_d - x_d\psi_f)}{x_d x_f} & Y \end{bmatrix};$$

$$X=\frac{r_a r_f x_{ad}(x_{ad}\psi_d - x_d\psi_f)+r_a^2 x_f(x_f\psi_d - x_{ad}\psi_f)}{x_d^2 x_f^2};$$

$$Y=\frac{r_a r_f x_{ad}(x_{ad}\psi_f - x_f\psi_d)+r_f^2 x_d(x_d\psi_f - x_{ad}\psi_d)}{x_d^2 x_f^2}.$$

Поскольку по условиям физической реализуемости все электрические параметры являются положительными и ненулевыми, то матрицы U, N имеют ранг, равный трем. Матрица идентифицируемости I синхронной машины имеет ранг, равный трем, если ψ_d, ψ_q, ψ_f не будут равны нулю.

При рассмотрении явнополюсного СД с демпферной обмоткой пространство состояния расширяется, т. к. переменных состояния становится больше.

Выводы

Показано, что синхронный двигатель является полностью управляемым и наблюдаемым объектом. Идентифицируемым СД является только при наличии потокосцеплений в обмотках. При нулевых значениях потокосцепления синхронный двигатель находится в состоянии покоя и не может быть идентифицирован. Это создает принципиальную возможность осуществления полной параметрической идентификации электрических параметров обмоток в режиме с неподвижным ротором при учете различных конструктивных особенностей синхронных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 15208 РК. МПК[8] G01L 3/10. Способ определения параметров синхронной машины / В.В. Кибартас, Ю.В. Кибартене, В.Ю. Мельников. Заявлено 21.05.2003; Опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12. – 8 с.: ил.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 687 с.
4. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Наука, 1985. – 502 с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
6. Копылов И.П. Электрические машины. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа; Логос, 2000. – 607 с.

Поступила 06.07.2009 г.