

基于物理模型的同步电机参数可辨识性研究

陈向宜¹, 查晓明², 李春艳³, 马占军²

(1. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

3. 四川省电力公司电网规划中心, 四川 成都 610072)

摘要: 针对实际辨识过程中出现的参数辨识结果不稳定及多解的情况, 提出并研究了基于物理模型的同步电机参数的可辨识性。根据模型可辨识性的概念及分析方法, 结合三相同步电机的物理模型特点, 推导了三相同步电机的观测方程和忽略定子暂态的状态方程, 然后基于该状态方程和观测方程, 推导了三相同步电机的传递函数矩阵, 最后根据可测输入、输出所对应的传递函数, 构造了传递函数系数与待辨识参数之间的关系, 实现了基于物理模型的三相同步电机参数的可辨识性分析。仿真结果验证了理论分析的正确性, 即仅利用暂态和次暂态过程的测量数据就可以辨识三相同步电机的所有电抗参数。

关键词: 同步电机; 可辨识性; 物理参数; Park 模型; 传递函数矩阵

中图分类号: TM 301

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0058-05

0 引言

同步发电机模型及其参数在电力系统分析和控制中具有至关重要的作用, 同步发电机参数的辨识是电机工程领域的基础研究课题, 对此人们已经做了不少工作, 并已取得大量的研究成果, 形成了一些有指导意义的理论体系和导则标准^[1-4]。

纵观同步电机参数辨识几十年的发展, 学者的研究热点一直集中在对频域响应法、时域辨识法和人工智能技术这三大辨识方法的改善和实际研究上^[5-8], 在模型的可辨识性以及寻求其他更有效的辨识方法方面没有得到突破性进展。而在实际辨识过程中, 经常会遇到参数辨识结果不稳定并出现多解的情况^[9]。造成这些问题的原因是多方面的, 模型本身的结构决定了参数不能唯一辨识是其中一个重要的原因。解决这些问题的有效途径之一是从模型本身的结构入手。模型本身的结构决定了参数的可辨识问题, 即模型参数的可辨识性, 它定义为能否根据测量数据唯一确定模型参数^[10]。近年来, 模型的可辨识性问题得到了学者的广泛关注^[11-12]。

本文基于物理参数模型对三相同步电机的可辨识性问题进行了研究。在物理模型状态方程的基础上推导了三相同步电机的传递函数矩阵, 实现了一些重要的结论, 为后续研究多相特种电机的可辨识性提供了技术支撑, 并为研究同步电机的参数辨识方法提供了必要的理论指导和依据。

1 模型可辨识性的概念及分析方法

1.1 可辨识性的概念

考虑一个简单的一阶线性模型^[13]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -p_1 x(t) + p_2 u(t) \\ x_0 = x(0) = 0 \\ y(t) = p_3 x(t) \end{cases} \quad (1)$$

此模型有 3 个未知参数: p_1, p_2, p_3 。对于已知的输入 $u(t)$, 式(1)的解析解为

$$y(t) = p_2 p_3 \int_0^t e^{-p_1(t-\tau)} u(\tau) d\tau \quad (2)$$

假设输入 $u(t)$ 为冲击函数 $\delta(t)$, 则

$$y(t) = p_2 p_3 e^{-p_1 t} \quad (3)$$

很显然, 根据测得的 $y(t)$ 可得到该模型的系数 $a_y = p_2 p_3$ 和指数 $\lambda = p_1$ 。也就是说, p_1 以及 $p_2 p_3$ 是可以被确定的, 但 p_2 或 p_3 却不可单独辨识。当然, 若 p_2 或 p_3 中有一个是已知的, 或者 p_2 与 p_3 之间存在一个唯一的已知关系, 则此模型的所有参数都能根据 $y(t)$ 和 $u(t)$ 唯一确定。

1.2 可辨识性定义

令 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 表示状态向量, $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T$ 表示输入向量, $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ 表示输出向量(测量值), $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T$ 表示未知的参数向量。

观察区间为 $t_0 < t < T$; 初始状态 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(t_0, \boldsymbol{\theta})$ 依赖于 $\boldsymbol{\theta}$ (非线性的); 向量函数矩阵 $\mathbf{F}$ 反映已知的状态向量、输入向量与状态向量的导数之间的耦合关系, $\mathbf{V}$ 表示状态向量、输入向量与输出向量之间的耦合关系, 它们都以 $\boldsymbol{\theta}$ 为参数; $\mathbf{H}$ 表示一系列关于 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{U}$ 、 $\boldsymbol{\theta}$ 的等式或不等式约束所构成的向量, 它是 v 个独立

的附加约束条件。根据以上定义,系统模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{X}(t, \theta) = F[X(t, \theta), U(t), t, \theta] \\ Y(t, \theta) = V[X(t, \theta), U(t), \theta] \\ X_0 = X(t_0, \theta) \\ H[X(t, \theta), U(t), \theta] \geq 0 \\ t_0 < t < T \end{cases} \quad (4)$$

根据所测量的信息,对模型中的某个参数 θ_i 有如下一些定义。

a. 唯一(全局)可辨识:模型参数存在唯一解。

b. 非唯一可辨识:模型参数解的数目大于1。

c. 0不可辨识:模型参数不存在解。

d. ∞ 不可辨识:模型参数存在无穷多个解。

e. 区间可辨识:它从属于 ∞ 不可辨识,但可确定它的上、下限 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$,参数区间表示为 $\Delta\theta_i = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ 。

f. 准可辨识:如果模型是区间可辨识的,且 $\Delta\theta_i$ 小到足以得到一个近似唯一解。

值得注意的是,0不可辨识和 ∞ 不可辨识是2个不同的概念,应加以区分。

同时要注意,上述可辨识性是由模型结构所决定的,即认为输入信号是充分激励的。当输入信号不充分时,也会引起参数多解,此时称为输入不可辨识。另外,传统辨识方法常会收敛到不同的局部最优解,从而导致不同的参数辨识结果,这种情况不属于参数不可辨识。

1.3 模型可辨识性分析方法

线性模型的可辨识性分析相对比较成熟,是非线性模型可辨识性分析的基础。线性模型可以有多种描述方式,如状态方程、传递函数、差分方程等^[14],其中,拉氏传递函数法概念简单,观测量与参数之间的关系式直观、清晰,因而得到了广泛应用。

一般可以把一个系统的传递函数多项式表示为

$$G(s) = \frac{b_{n-1}(\theta_i)s^{n-1} + b_{n-2}(\theta_i)s^{n-2} + \cdots + b_1(\theta_i)s + b_0(\theta_i)}{s^n + a_{n-1}(\theta_i)s^{n-1} + a_{n-2}(\theta_i)s^{n-2} + \cdots + a_1(\theta_i)s + a_0(\theta_i)} \quad (5)$$

其中, θ_i 为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 中的某个未知参数; $a_{n-1}(\theta_i), a_{n-2}(\theta_i), \dots, a_1(\theta_i), a_0(\theta_i)$ 分别是 θ 中某个元素的乘积和,且均不为零,均不能互相组合表示。

若 $G(s)$ 的各项系数为已知,即

$$\begin{cases} a_{n-1}(\theta_i) = c_{n-1}, a_{n-2}(\theta_i) = c_{n-2}, \dots, a_0(\theta_i) = c_0 \\ b_{n-1}(\theta_i) = d_{n-1}, b_{n-2}(\theta_i) = d_{n-2}, \dots, b_0(\theta_i) = d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $c_{n-1}, c_{n-2}, \dots, c_0, d_{n-1}, d_{n-2}, \dots, d_0$ 是通过辨识得到的传递函数的各个参数值。

a. 若式(5)中存在缺项,即某项的系数为零,不能构成可用方程。假设共有 h_1 个缺项,则式(6)中有效方程的数目为 $2n - h_1$ 个。另外可以判定剩下方程的相关性,若存在 h_2 个方程可被其他的方程表示(即相关),则式(6)中有效方程的数目可进一步修正为 $2n - h_1 - h_2$ 个。令 $h = h_1 + h_2$ 表示式中无效方程的个数,则最终可以辨识的参数个数为 $2n - h$ 个。

b. 对于多输入输出系统,传递函数为矩阵形式

$G(s)$, 其中每一个元素 $G_{ij}(s)$ 的分子、分母均为形如式(5)的多项式,可以按照 a 中的方法进行分析。

c. 根据系统辨识理论知识,对于可测输入、输出所对应的传递函数,其分子与分母中 s 的各次系数是可知的,由此可分析出未知参数的可辨识性。若线性系统本身结构是可以辨识的,则当形如式(6)的有效方程个数增加时,易知:原来可辨识的未知参数仍可辨识;原来不可辨识或难辨识的未知参数,常常变得可辨识或易辨识。另外,当未知参数个数 p 等于 $G_{ij}(s)U_j(s)$ 所能提供的有效方程个数时,方程组可解,即未知参数全部可辨识。

应用拉氏传递函数分析线性定常模型是方便的。对不同的线性模型,可以通过变换将其转换为拉氏传递函数模型。如果传递函数的阶次是最低的,则其分子与分母中 s 的各次系数可通过合适的辨识方法唯一得到,再加上一些其他信息,可以分析原参数的可辨识性。

2 基于物理参数模型的三相同步电机可辨识性研究

2.1 三相同步电机在线辨识的 Park 模型^[15]

$$\begin{cases} U_{dq} = -p\psi_{dq} + A\psi_{dq}\omega - R_{dq}I_{dq} \\ \psi_{dq} = X_{dq}I_{dq} \end{cases} \quad (7)$$

$$U_{dq} = [U_d, -U_{fd}, -U_{kd}, U_q, -U_{kq}]^T$$

$$I_{dq} = [I_d, I_{fd}, I_{kd}, I_q, I_{kq}]^T$$

$$\psi_{dq} = [\psi_d, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_q, \psi_{kq}]^T$$

$$X_{dq} = \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0 \\ x_{ad} & x_{fd} & x_{ad} & 0 & 0 \\ x_{ad} & x_{ad} & x_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_q & x_{aq} \\ 0 & 0 & 0 & x_{aq} & x_{kq} \end{bmatrix}$$

$$R_{dq} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当选取各个绕组的磁链量 ψ_{dq} 作为状态量时,三相同步电机的 Park 方程可变换为如下的状态方程形式:

$$\begin{cases} p\psi_{dq} = [A\omega - R_{dq}X_{dq}^{-1}]\psi_{dq} - U_{dq} \\ I_{dq} = X_{dq}^{-1}\psi_{dq} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 三相同步电机状态(Park)方程的化简

忽略定子暂态,即 $p\psi_d = 0, p\psi_q = 0$, 式(8)的磁链状态方程为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ p\psi_{fd} \\ p\psi_{kd} \\ 0 \\ p\psi_{kq} \end{bmatrix} = [A\omega - R_{dq}X_{dq}^{-1}] \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_q \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_d \\ -U_{fd} \\ -U_{kd} \\ U_q \\ -U_{kq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

令

$$\mathbf{N} = \mathbf{R}_{dq} \mathbf{X}_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} N_{(1,1)} & N_{(1,2)} & N_{(1,3)} & 0 & 0 \\ N_{(2,1)} & N_{(2,2)} & N_{(2,3)} & 0 & 0 \\ N_{(3,1)} & N_{(3,2)} & N_{(3,3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{(4,4)} & N_{(4,5)} \\ 0 & 0 & 0 & N_{(5,4)} & N_{(5,5)} \end{bmatrix}$$

式(9)可化为一组代数约束方程和一组状态方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}\psi_{fd} \\ \mathbf{p}\psi_{kd} \\ \mathbf{p}\psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{(2,2)} & N_{(2,3)} & 0 \\ N_{(3,2)} & N_{(3,3)} & 0 \\ 0 & 0 & N_{(5,5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_{dq} + \begin{bmatrix} N_{(2,1)} & 0 \\ N_{(3,1)} & 0 \\ 0 & N_{(5,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} N_{(1,1)} & \omega \\ -\omega & N_{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} N_{(1,2)} & N_{(1,3)} & 0 \\ 0 & 0 & N_{(4,5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} - \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_{dq} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

令

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi} &= [\psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kq}]^T \\ \mathbf{N}_1 &= \begin{bmatrix} N_{(2,2)} & N_{(2,3)} & 0 \\ N_{(3,2)} & N_{(3,3)} & 0 \\ 0 & 0 & N_{(5,5)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} N_{(2,1)} & 0 \\ N_{(3,1)} & 0 \\ 0 & N_{(5,4)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{N}_3 &= \begin{bmatrix} N_{(1,2)} & N_{(1,3)} & 0 \\ 0 & 0 & N_{(4,5)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} N_{(1,1)} & \omega \\ -\omega & N_{(4,4)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

则式(11)可化为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3 \boldsymbol{\Psi} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_{dq} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)可得磁链的状态方程:

$$\mathbf{p}\boldsymbol{\Psi} = [\mathbf{N}_1 - \mathbf{N}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3] \boldsymbol{\Psi} - [\mathbf{K}_1 + \mathbf{N}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2] \mathbf{U}_{dq} \quad (13)$$

令

$$\mathbf{L} = \mathbf{X}_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} L_{(1,1)} & L_{(1,2)} & L_{(1,3)} & 0 & 0 \\ L_{(2,1)} & L_{(2,2)} & L_{(2,3)} & 0 & 0 \\ L_{(3,1)} & L_{(3,2)} & L_{(3,3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{(4,4)} & L_{(4,5)} \\ 0 & 0 & 0 & L_{(5,4)} & L_{(5,5)} \end{bmatrix}$$

则式(8)的电流观测方程可变为

$$\begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{(2,2)} & L_{(2,3)} & 0 \\ L_{(3,2)} & L_{(3,3)} & 0 \\ 0 & 0 & L_{(5,5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{(2,1)} & 0 \\ L_{(3,1)} & 0 \\ 0 & L_{(5,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{(1,2)} & L_{(1,3)} & 0 \\ 0 & 0 & L_{(4,5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} L_{(1,1)} & 0 \\ 0 & L_{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

令

$$\mathbf{I} = [I_{fd}, I_{kd}, I_{kq}]^T, \quad \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_{(2,2)} & L_{(2,3)} & 0 \\ L_{(3,2)} & L_{(3,3)} & 0 \\ 0 & 0 & L_{(5,5)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} L_{(2,1)} & 0 \\ L_{(3,1)} & 0 \\ 0 & L_{(5,4)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_3 = \begin{bmatrix} L_{(1,2)} & L_{(1,3)} & 0 \\ 0 & 0 & L_{(4,5)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_4 = \begin{bmatrix} L_{(1,1)} & 0 \\ 0 & L_{(4,4)} \end{bmatrix}$$

可得:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \mathbf{L}_3 \boldsymbol{\Psi} + \mathbf{L}_4 \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = [\mathbf{L}_3 - \mathbf{L}_4 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3] \boldsymbol{\Psi} - \mathbf{L}_4 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_{dq} \quad (16)$$

将式(12)代入式(14)可得系统的观测方程:

$$\mathbf{I} = [\mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3] \boldsymbol{\Psi} - \mathbf{L}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_{dq} \quad (17)$$

至此,式(13)(17)构成了忽略定子暂态后三相电机的状态方程。

2.3 三相同步电机传递函数矩阵的推导

令

$$\bar{\mathbf{A}} = [\mathbf{N}_1 - \mathbf{N}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3], \quad \bar{\mathbf{B}} = -[\mathbf{K}_1 + \mathbf{N}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2]$$

$$\bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}_3], \quad \bar{\mathbf{D}} = -\mathbf{L}_2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2$$

将标准状态方程变化为传递函数形式:

$$\mathbf{I}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{U}_{dq}(s) \quad (18)$$

可得传递函数为

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{I}(s)}{\mathbf{U}_{dq}(s)} = \bar{\mathbf{C}}[s\mathbf{E} - \bar{\mathbf{A}}]^{-1} \bar{\mathbf{B}} + \bar{\mathbf{D}} \quad (19)$$

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{I_{fd}(s)}{U_d(s)} & \frac{I_{fd}(s)}{U_{fd}(s)} & \frac{I_{fd}(s)}{U_{kd}(s)} & \frac{I_{fd}(s)}{U_q(s)} & \frac{I_{fd}(s)}{U_{kq}(s)} \\ \frac{I_{kd}(s)}{U_d(s)} & \frac{I_{kd}(s)}{U_{fd}(s)} & \frac{I_{kd}(s)}{U_{kd}(s)} & \frac{I_{kd}(s)}{U_q(s)} & \frac{I_{kd}(s)}{U_{kq}(s)} \\ \frac{I_{kq}(s)}{U_d(s)} & \frac{I_{kq}(s)}{U_{fd}(s)} & \frac{I_{kq}(s)}{U_{kd}(s)} & \frac{I_{kq}(s)}{U_q(s)} & \frac{I_{kq}(s)}{U_{kq}(s)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

通常,同步发电机能够测量得到的有用数据是机端的定子相电流和电压、励磁电压和电流。由于阻尼绕组本身是假想的,阻尼电流 I_{kd} 和 I_{kq} 不可能直接使用物理设备测量,因此一般可以得到的测量数据是 U_{fd} 、 I_{fd} 、 U_a 、 U_b 、 U_c 、 I_a 、 I_b 、 I_c 。可以取相关的传递函数矩阵元素 $G_{11} = I_{fd}(s)/U_d(s)$ 、 $G_{12} = I_{fd}(s)/U_{fd}(s)$ 和 $G_{14} = I_{fd}(s)/U_q(s)$ 的系数来构成辨识方程。由于所有传递函数的分母系数一致,所以分母就取 G_{11} 的分母。

表1给出了方程与待辨识参数的关系。通过对这些方程的联立,从表中选出相应的方程按步骤即可求解出所有的相关参数。

通过对物理参数模型公式的推导,实现了三相同步电机的可辨识性分析。研究表明:仅利用次暂态和暂态过程的测量数据是完全可以辨识所有电机的相关电抗参数的。

表 1 构造方程与待辨识参数的关系

Tab.1 Relationship between constructing equations and parameters to be identified

方程编号	构造方程的系数	x_d	x_{ad}	x_{fd}	x_{kd}	x_q	x_{aq}	x_{kq}
1	G_{11} 分子 s^1 系数	√		√				√
	G_{11} 分子 s^2 系数	√						
	G_{11} 分子 s^3 系数	√		√				√
2	G_{12} 分子 s^0 系数	√				√		
3	G_{12} 分子 s^1 系数	√	√		√	√	√	√
4	G_{12} 分子 s^2 系数	√	√		√	√	√	√
5	G_{14} 分子 s^1 系数	√		√	√	√	√	√
	G_{14} 分子 s^2 系数	√		√	√	√	√	√
	G_{14} 分子 s^3 系数	√		√	√	√	√	√
	G_{11} 分母 s^0 系数	√				√		
	G_{11} 分母 s^1 系数	√	√	√	√	√	√	√
	G_{11} 分母 s^2 系数	√	√	√	√	√	√	√
	G_{11} 分母 s^3 系数	√	√	√	√	√	√	√

注:√表示参数与构造方程相关。

3 仿真验证

可辨识性的研究为设计在线施加扰动方法、确定辨识方法提供了理论基础。根据对相应的传递函数矩阵进行辨识,获得传递函数的参数,进而通过计算完成电机的物理参数辨识,应用忽略定子暂态的同步电机状态方程模型,进行了三相同步电机参数辨识的验证。

一台正常运行的 120 MV·A 凸极同步发电机,采用负变化产生扰动,并加 5 % 随机白噪声干扰。采用 PSCAD 进行仿真,接线图见图 1。仿真计算所得电流、电压作为测量值,利用动态过程数据辨识 x_d 、 x_{ad} 、 x_{fd} 、 x_{kd} 、 x_q 、 x_{aq} 、 x_{kq} 。

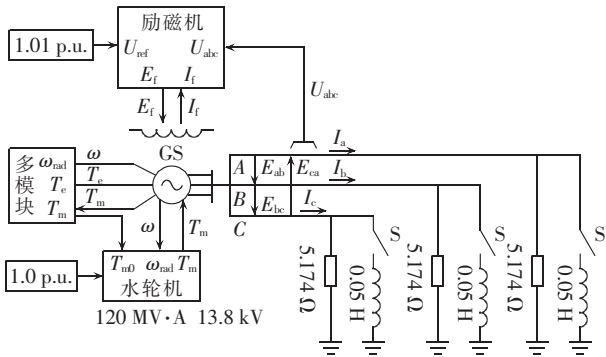


图 1 同步电机测试单线接线图

Fig.1 Single line connection diagram of synchronous generator test

仿真采用的参数(标么值)如下: $x_d=1.04$, $x_{ad}=0.936$, $x_{fd}=1.086$, $x_{kd}=1.059$, $x_q=0.68$, $x_{aq}=0.576$, $x_{kq}=0.782$, $r_d=0.000\ 54$, $r_{fd}=0.000\ 74$, $r_{kd}=0.001\ 51$, $r_{kq}=0.001\ 59$ 。

算例中的发电机初始运行工况(标么值)如下: $U_0=1.05$, $\cos\phi=0.85$, $P=1.0$, $U_{fd0}=0.97$, $I_{fd0}=0.96$ 。

扰动后得到的励磁和机端电压、电流变化曲线见图 2(图中, U_{fd} 、 I_{fd} 、 U_d 、 U_q 为标么值)。通过最小二乘辨识可获得所需的 3 个传递函数 $G_{11}=I_{fd}(s)/U_d(s)$ 、

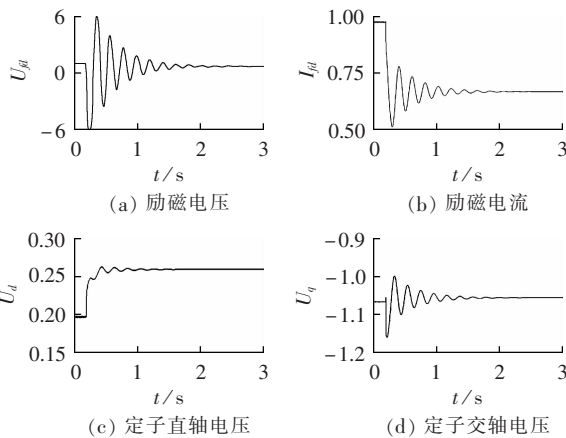


图 2 扰动后的励磁和机端电压、电流变化曲线

Fig.2 Voltage and current curves after disturbance

$G_{12}=I_{fd}(s)/U_{fd}(s)$ 和 $G_{14}=I_{fd}(s)/U_q(s)$ 的系数,如表 2 所示。

表 2 辨识的传递函数的系数

Tab.2 Identified transfer function coefficients

方程编号	构造方程的系数	数值
1	G_{11} 分子 s^3 系数	-0.000 296 03
2	G_{12} 分子 s^1 系数	0.170 29
3	G_{12} 分子 s^2 系数	-51.688
4	G_{12} 分子 s^3 系数	3919.3
5	G_{14} 分子 s^2 系数	-0.114 77
6	G_{14} 分子 s^3 系数	6.140 5
7	G_{11} 分母 s^2 系数	17.896

然后根据表 1 所示的构造方程与待辨识参数的关系,按照对应参数的求解步骤可以辨识出相应的物理参数,具体结果见表 3。

表 3 辨识结果

Tab.3 Identification results

参数	真值	辨识值	误差/%
x_d	1.040	1.037	0.29
x_{ad}	0.936	0.925	1.18
x_{fd}	1.086	1.137	4.70
x_{kd}	1.059	1.048	1.04
x_q	0.680	0.693	1.91
x_{aq}	0.576	0.581	0.87
x_{kq}	0.782	0.735	6.01
最大误差/%			6.01

算例结果分析:在算例中,采用基本最小二乘辨识算法能够辨识相应的传递函数系数,并通过在可辨识性分析中得到的参数与传递函数系数间关系的构造方程可以辨识出相应的物理参数,误差在可以接受的范围以内。仿真验证了可辨识分析的结论是正确的,并且辨识的方法是可行的。

4 结论

通过对三相同步电机的物理参数模型的可辨识性公式的推导,着重分析了该动态模型的可辨识性,从而为设计在线施加扰动方法、确定辨识方法提供了理论基础。通过可辨识性分析无需进行系统的可

控、可观性分析,即可确定可辨识参数。研究表明:仅利用次暂态和暂态的数据是完全可以辨识所有电机的相关电抗参数的。最终仿真验证了可辨识分析的结论,同时证明了基于同步电机物理参数模型的可辨识性研究的可行性。

参考文献:

- [1] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1993:11-23.
- [2] 蒋平,王晓伟,王杨正,等. 遗传算法的改进策略及其在非线性发电机励磁系统参数辨识中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):31-35.
- JIANG Ping,WANG Xiaowei,WANG Yangzheng,et al. Improved strategies of genetic algorithm and their applications in parameter identification of nonlinear generator excitation systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):31-35.
- [3] 管秀鹏,孙元章,程林. 基于综合广域信息的负荷参数辨识方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):29-32.
- GUAN Xiupeng,SUN Yuanzhang,CHENG Lin. Load parameter identification based on wide-area measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):29-32.
- [4] 张仰飞,袁越,陈小虎,等. 优选初值-微变搜索算法及其在双馈风力发电机参数辨识中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):19-21.
- ZHANG Yangfei,YUAN Yue,CHEN Xiaohu,et al. Optimal initial value and micro-variation search algorithm and its application in parameter identification of doubly-fed wind-power generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):19-21.
- [5] 贺仁睦,沈峰,韩冬,等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术,2007,31(14):62-67.
- HE Renmu,SHEN Feng,HAN Dong,et al. The study of generator excitation system modeling and parameters estimation[J]. Power System Technology,2007,31(14):62-67.
- [6] 王亮,王公宝,马伟明,等. 基于小波变换和神经网络的同步电机参数辨识新方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(3):1-6.
- WANG Liang,WANG Gongbao,MA Weiming,et al. A new method for parameters identification of synchronous electric machine based on wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(3):1-6.
- [7] 舒辉,文劲宇. 发电机励磁系统参数辨识综述[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):104-107.
- SHU Hui,WEN Jinyu. Overview of parameter identification methods for generator excitation systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):104-107.
- [8] 黄其新,孙黎霞,甄威,等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):50-53.
- HUANG Qixin,SUN Lixia,ZHEN Wei,et al. Ant colony optimization algorithm and disturbance analysis of synchronous generator parameter identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):50-53.
- [9] 李靖霞,倪腊琴,鞠平,等. 同步电机参数的可辨识性研究[J]. 电力系统自动化,1998,22(3):9-12.
- LI Jingxia,NI Laqin,JU Ping,et al. A study on the identifiability of synchronous generator parameters[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(3):9-12.
- [10] JU Ping,HANDSCHIN E. Identifiability of load models[J]. Generation,Transmission and Distribution,IEEE Proceedings,1997,144(1):45-49.
- [11] LILIANNE D V,CARINE J,GHISLAINE J B. Identifiability of a nonlinear delayed-differential aerospace model[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2006,51(1):154-158.
- [12] LI Jian,STOICA P,XU Luzhou,et al. On parameter identifiability of MIMO radar[J]. IEEE Signal Processing Letters,2007,14(12):968-971.
- [13] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京:河海大学出版社,1999:8-19.
- [14] WALTER E. Identifiability of parametric models[M]. Great Britain: Pergamon Press,1987:28-31.
- [15] KUNDER P. 电力系统稳定与控制[M]. 本书翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2002:33-40.

(实习编辑:叶芳)

作者简介:

陈向宜(1976-),男,湖南茶陵人,博士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制、电力系统仿真、电力系统参数测量与辨识方面的研究(E-mail: morodos@sina.com);

查晓明(1967-),男,安徽怀宁人,博士研究生导师,主要从事电力电子方面的研究;

李春艳(1980-),女,河北唐山人,博士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究;

马占军(1987-),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究。

Identifiability of synchronous generator parameters based on physical models

CHEN Xiangyi¹, ZHA Xiaoming², LI Chunyan³, MA Zhanjun²

(1. Sichuan Electric Power Test & Research Institute, Chengdu 610072, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Center of Grid Planning, Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China)

Abstract: Aiming at the unstable or multiple solutions during parameter identification, the identifiability of synchronous generator parameters based on physical models is studied. According to the concept and analytic method of model identifiability and combined with the characteristics of physical model, the observation equations of three-phase synchronous generator and the state equations without stator transients are deduced, based on which, the transfer function matrix is derived. With the transfer functions corresponding to the measurable inputs and outputs, the relationship between the transfer function coefficients and the parameters to be identified is structured to realize the parameter identifiability analysis based on physical models for three-phase synchronous generator. The validity of theoretical analysis is verified by simulations, i.e. all reactance parameters can be identified only with the measurements of transient and sub-transient states.

Key words: synchronous generator; identifiability; physical parameter; Park model; transfer function matrix