

基于 Park 模型的同步发电机参数辨识

孙黎霞¹, 鞠平¹, 高运华¹, 史可琴², 杨文字², 甄威³, 刘柏私³, 吴磊¹

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210098; 2. 西北电网有限公司, 陕西省 西安市 710000;
3. 四川电力试验研究院, 四川省 成都市 610072)

Parameter Estimation of Synchronous Generator Based on Park Model

SUN Li-xia¹, JU Ping¹, GAO Yun-hua¹, SHI Ke-qin², YANG Wen-yu², ZHEN Wei³, LIU Bai-si³, WU Lei¹

(1. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;

2. Northwest Power Grid Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi Province, China;

3. Sichuan Electric Power Test & Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: It was pointed that the dependency between the practical parameters of synchronous machines might lead to difficulties in estimation of the parameters. This paper proposed to estimate the circuit parameters in Park model and then convert the circuit parameters into practical parameters. The identifiability of the circuit parameters in Park model was analyzed in detail. The q -axis parameters are uniquely identifiable, the d -axis parameters are not uniquely identifiable with using the steady-state pre fault and dynamic process and uniquely identifiable with adding the steady-state post fault. An experiment was carried out via applying a step disturbance to the excitation system. Some of the circuit parameters in Park model were firstly estimated according to the steady-state equations, and others were estimated through the dynamic process with using ant colony optional (ACO) algorithm. The test results with real-time digital simulator (RTDS) show that the parameter estimation based on Park model can improve both the precision and the stability of the parameter estimation compared with the practical parameter estimation.

KEY WORDS: synchronous generator; Park equation; parameter estimation; ant colony optimization

摘要: 指出实用参数的非独立性可能导致基于实用模型的参数辨识的困难, 提出直接基于 Park 模型辨识电路参数, 必要时转换为实用参数。分析基于 Park 模型的同步发电机参数的可辨识性问题。对于 q 轴电路参数来说, 其参数是唯一可辨识的。但对于 d 轴电路参数来说, 仅利用扰动前稳态及

动态过程的数据时, 其参数是无穷不可辨识的; 如果再利用扰动后稳态, 则 d 轴电路参数均可唯一辨识。提出在励磁参考电压上施加阶跃扰动, 先根据前后稳态条件辨识出同步发电机的部分电路参数, 然后根据动态过程数据采用蚁群算法辨识其余参数。在实时数字仿真系统(real-time digital simulator, RTDS)上进行测试, 结果表明, 与采用实用模型辨识实用参数相比, 该文所提方法能有效地改善参数辨识精度及其平稳性。

关键词: 同步发电机; Park 方程; 参数辨识; 蚁群算法

0 引言

同步发电机的 Park 模型是一种基本模型, 其状态变量是磁链, 在电力系统计算中并不经常直接采用。在工程实际中, 人们经常采用的是实用模型, 这种模型以等效电势为状态变量, 易于理解。为此, 以往关于同步发电机参数辨识的研究大都是针对实用模型及其中的实用参数的^[1-7]。然而, 一系列研究表明, 基于实用模型来辨识实用参数的精度很难令人满意, 辨识所得实用参数不够平稳, 影响因素较多。这一方面是由于实用模型是在一定的假设简化下得出的, 是否还有其他原因有待进一步研究。

为此, 本文提出直接针对 Park 模型进行电路参数辨识, 然后必要时转换为实用参数。首先分析 Park 模型与实用模型参数之间的关系, 重点分析基于 Park 模型的同步发电机电路参数的可辨识性问题, 为基于 Park 模型的同步发电机参数辨识提供理论依据。通过在发电机励磁参考电压上加阶跃扰动, 分 2 步辨识同步发电机的电路参数。利用 RTDS 验证方法的正确性, 并且与采用实用模型所得结果

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50725723); 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217901)。

Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50725723); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB 217901).

进行比较。

1 2 种模型参数的独立性

同步发电机的模型有 2 种形式, 一种是基于原型电路参数、以磁链作为状态变量的 Park 模型, 另一种是基于实用参数、以电势作为状态变量的实用模型。有关模型方程在文献[8-9]中有详细介绍, 各量的涵义亦参见文献[8-9]。

在 Park 模型中, 电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_0 \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_a i_d \\ -r_a i_q \\ -r_a i_0 \\ r_f i_f \\ r_D i_D \\ r_Q i_Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_D=0$; $u_Q=0$ 。磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & 0 & 0 & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & 0 & 0 & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

电抗与漏抗的关系为

$$\begin{cases} X_d = X_{ad} + X_l \\ X_q = X_{aq} + X_l \\ X_f = X_{ad} + X_{fl} \\ X_D = X_{ad} + X_{Dl} \end{cases} \quad (3)$$

在 Park 模型中共有 11 个电路参数, 其中 2 个参数 r_a 和 X_l 是 d 轴和 q 轴都有的, d 轴有 5 个电路参数, 分别为 r_f 、 r_D 、 X_{ad} 、 X_{fl} 和 X_{Dl} , q 轴有 3 个电路参数, 分别为 r_Q 、 X_{aq} 和 X_{Ql} 。还有 1 个 0 分量电抗 X_0 人们并不关心, 不作讨论。

稳态时有

$$r_f = u_{f0} / i_{f0} \quad (4)$$

式中下标 0 代表初值。对于 Park 模型中的电路参数, 由式(4)可求出励磁绕组电阻 r_f , 其余 9 个参数都是互相独立的。

在实用模型中共有 10 个电路参数, 其中 1 个参数 r_a 是 d 轴和 q 轴都有的, d 轴共有 6 个实用参数, 分别为 X_d 、 X'_d 、 X''_d 、 T'_{d0} 、 T''_{d0} 和 K , q 轴共有 3 个实用参数, 分别为 X_q 、 X''_q 和 T''_{q0} 。实用模型中没有 0 分量方程, 也就没有出现电抗 X_0 。实用参数与电路参数之间有如下关系:

$$X'_d = X_d - X_{ad}^2 / X_f \quad (5)$$

$$T'_{d0} = X_f / r_f \quad (6)$$

$$K = X_{ad} / r_f \quad (7)$$

由式(4)~(7)可见, 如果已知 X_d 、 X'_d 和 T'_{d0} , 则参数 K 就可计算而得。即, 实用参数并不都是独立的。因此, 以往文献中针对实用模型自由辨识 d 轴的所有实用参数, 会带来较大误差, 后面的算例也验证了这一点。对于 q 轴, 则不存在这个问题。

2 参数辨识的可辨识性

2.1 可辨识性原理

在以往同步发电机模型实用参数辨识中, 经常出现参数变化较大的情况, 但动态曲线拟合却又较好。要解决参数不平稳问题, 必须从参数可辨识性分析入手, 同时采用全局收敛的参数辨识方法[2,10-11]。

由式(1)~(2)可知, 只要假设转速 ω 恒定, Park 方程就是线性模型。在电磁暂态过程中, 这样的假设是合理的。所以, 基于 Park 模型的可辨识性分析完全可采用线性系统的分析方法。另外, 文中对 Park 方程进行偏差化, 而不是线性化。这样做可使状态变量初值为 0, 并不会由此带来误差。

当发电机功角 δ 可测量时, 则可方便地获得电压和电流的 d 轴和 q 轴分量:

$$\begin{cases} u_d = U \sin \delta \\ u_q = U \cos \delta \\ i_d = I \sin(\delta + \varphi) \\ i_q = I \cos(\delta + \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: φ 为功率因数角; U 和 I 分别是发电机出口电压和电流。从而参数辨识时可将 d 、 q 轴分开进行。

2.2 d 轴参数的可辨识性

将 Park 模型 d 轴方程变换成标准的状态方程形式。由式(1)~(2)可得

$$\begin{cases} \dot{i}_f = (u_f - \dot{\psi}_f) / r_f \\ \dot{i}_D = (u_D - \dot{\psi}_D) / r_D \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi}_f = -i_d X_{ad} + i_f X_f + i_D X_{ad} \\ \dot{\psi}_D = -i_d X_{ad} + i_f X_{ad} + i_D X_D \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得

$$\begin{cases} i_f = [X_D \psi_f - X_{ad} \psi_D - i_d (X_{ad}^2 - X_{ad} X_D)] / (X_f X_D - X_{ad}^2) \\ i_D = 1 / [X_f \psi_D - X_{ad} \psi_f - i_d (X_{ad}^2 - X_{ad} X_f)] / (X_f X_D - X_{ad}^2) \end{cases} \quad (11)$$

由式(9)~(11)可得

$$\begin{cases} \dot{\psi}_f = \frac{r_f}{X_{ad}^2 - X_f X_D} [X_D \psi_f - X_{ad} \psi_D - i_d \cdot \\ (X_{ad}^2 - X_{ad} X_D)] + u_f \\ \dot{\psi}_D = \frac{r_D}{X_{ad}^2 - X_f X_D} [X_f \psi_D - X_{ad} \psi_f - i_d \cdot \\ (X_{ad}^2 - X_{ad} X_f)] \end{cases} \quad (12)$$

同时, 由式(2)可知

$$\psi_d = -i_d X_d + i_f X_{ad} + i_D X_{ad} \quad (13)$$

把式(11)代入式(13)可得

$$\psi_d = \frac{X_{ad}(X_D - X_{ad})}{X_f X_D - X_{ad}^2} \psi_f + \frac{X_{ad}(X_f - X_{ad})}{X_f X_D - X_{ad}^2} \psi_D - (X_d + \frac{2X_{ad}^2 - X_{ad} X_f - X_{ad} X_D}{X_f X_D - X_{ad}^2}) i_d \quad (14)$$

将式(3)分别代入式(12)、(14), 可得

$$\begin{cases} \dot{\psi}_f = r_f [(X_{ad} + X_{Dl}) \psi_f - X_{ad} \psi_D - i_d [X_{ad}^2 - \\ X_{ad}(X_{ad} + X_{Dl})] / [X_{ad}^2 - (X_{ad} + X_{fl}) \cdot \\ (X_{ad} + X_{Dl})] + u_f \\ \dot{\psi}_D = r_D [(X_{ad} + X_{fl}) \psi_D - X_{ad} \psi_f - i_d (X_{ad}^2 - X_{ad} \cdot \\ (X_{ad} + X_{fl})) / [X_{ad}^2 - (X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl})] \\ \psi_d = \frac{X_{ad} X_{Dl}}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \psi_f + \\ \frac{X_{ad} X_{fl}}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \psi_D - (X_{ad} + X_l + \\ \frac{2X_{ad}^2 - X_{ad}(X_{ad} + X_{fl}) - X_{ad}(X_{ad} + X_{Dl})}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2}) i_d \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)进行偏差化(不是线性化), 并且进行 Laplace 变换, 可得

$$\mathbf{G}_d(s) = [\mathbf{G}_1(s) \quad \mathbf{G}_2(s)]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{G}_1(s) = \frac{b_1 s + b_2 + d_1(s^2 + a_1 s + a_2)}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (17)$$

$$\mathbf{G}_2(s) = \frac{c_1 s + c_2}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (18)$$

其中:

$$a_1 = \frac{r_f(X_{ad} + X_{Dl}) + r_D(X_{ad} + X_{fl})}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{r_f r_D}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \quad (20)$$

$$b_1 = \frac{-(r_f X_{Dl}^2 + r_D X_{fl}^2) X_{ad}^2}{[(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2]^2} \quad (21)$$

$$b_2 = -r_f r_D X_{ad}^2 [(X_{ad} + X_{fl}) X_{Dl}^2 + (X_{ad} + X_{Dl}) X_{fl}^2 + 2X_{ad} X_{fl} X_{Dl}] / [(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2]^3 \quad (22)$$

$$c_1 = \frac{X_{ad} X_{Dl}}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \quad (23)$$

$$c_2 = \frac{r_D X_{ad} X_{Dl} (X_{ad} + X_{fl}) - r_D X_{ad}^2 X_{fl}}{[(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2]^2} \quad (24)$$

$$d_1 = -\{X_{ad} + X_l + [2X_{ad}^2 - X_{ad}(X_{ad} + X_{fl}) - X_{ad} \cdot (X_{ad} + X_{Dl})] / [(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2]\} \quad (25)$$

根据线性系统辨识理论, $\mathbf{G}(s)$ 矩阵元素中的 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 和 d_1 均可唯一辨识。由式(19)~(21)、(23)可得

$$\frac{r_f(X_{ad} + X_{Dl}) + r_D(X_{ad} + X_{fl})}{X_{ad} X_{Dl}} = \frac{a_1}{c_1} \quad (26)$$

$$\frac{r_f r_D}{X_{ad} X_{Dl}} = \frac{a_2}{c_1} \quad (27)$$

$$\frac{r_f X_{Dl}^2 + r_D X_{fl}^2}{X_{ad}^2} = -\frac{b_1}{c_1^2} \quad (28)$$

从以上分析可知, 无法单独辨识 X_{ad} 、 X_{fl} 、 X_{Dl} 、 X_l 、 r_a 、 r_f 和 r_D 这 7 个参数。因此, 仅利用前稳态和动态过程的数据, Park 模型 d 轴参数是无穷不可辨识的。

对发电机采用励磁扰动的方式进行参数辨识时, 扰动后稳态条件的测量是很方便的, 而且不同于扰动前的稳态条件。因此, 可将其作为附加已知条件。由于稳态时磁链不会发生变化, 也没有阻尼电流, 即 $\dot{\psi}_d$ 、 $\dot{\psi}_q$ 、 $\dot{\psi}_f$ 、 i_D 和 i_Q 都为 0, $\omega=1$ pu, 则由式(1)得稳态电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -r_a i_d + X_q i_q \\ u_q = -X_d i_d - r_a i_q + X_{ad} i_f \end{cases} \quad (29)$$

$$u_f = r_f i_f \quad (30)$$

式(29)中有 r_a 、 X_d 、 X_q 和 X_{ad} 共 4 个未知参数, 2 个方程不能唯一求解。因此, 必须有两个不同的稳态状态。在励磁电压上加阶跃扰动时, 可得到两个稳态状态即扰动前稳态和扰动后稳态的电压、电流值, 记为 u_{d0} 、 u_{q0} 、 i_{d0} 、 i_{q0} 、 i_{f0} 和 $u_{d\infty}$ 、 $u_{q\infty}$ 、 $i_{d\infty}$ 、 $i_{q\infty}$ 、 $i_{f\infty}$, 则可得到 4 个方程:

$$\begin{cases} u_{d0} = -r_a i_{d0} + X_q i_{q0} \\ u_{q0} = -X_d i_{d0} - r_a i_{q0} + X_{ad} i_{f0} \\ u_{d\infty} = -r_a i_{d\infty} + X_q i_{q\infty} \\ u_{q\infty} = -X_d i_{d\infty} - r_a i_{q\infty} + X_{ad} i_{f\infty} \end{cases} \quad (31)$$

式(31)为关于 4 个参数的 4 个线性方程,可唯一求出 r_a 、 X_d 、 X_q 和 X_{ad} 这 4 个参数。由此还可得到

$$X_l = X_d - X_{ad} \quad (32)$$

由于 r_f 已经由式(4)获得,所以由 3 个方程式(26)~(28)可得到 3 个参数 r_D 、 X_{Dl} 和 X_{fl} 。

至此,从理论上证明了:充分利用扰动前、后的稳态条件和动态过程,同步发电机 Park 模型中 d 轴电路参数均是可唯一辨识的。

2.3 q 轴参数的可辨识性

类似地,经过适当推导可得 q 轴有如下方程:

$$G_q(s) = [(X_{aq}^2 - (X_{aq} + X_{ql})(X_{aq} + X_l))s - r_Q(X_{aq} + X_l)] / [(X_{aq} + X_{ql})s + r_Q] = \frac{g_1s + g_0}{f_1s + f_0} \quad (33)$$

其中:

$$f_1 = X_{aq} + X_{ql} \quad (34)$$

$$f_0 = r_Q \quad (35)$$

$$g_1 = X_{aq}^2 - (X_{aq} + X_{ql})(X_{aq} + X_l) \quad (36)$$

$$g_0 = r_Q(X_{aq} + X_l) \quad (37)$$

由线性系统理论知, f_1 、 f_0 、 g_1 和 g_0 均可唯一辨识。由 f_0 可直接得到 r_Q 。将式(34)~(35)和(37)代入式(36),可得

$$X_{aq} = \sqrt{g_1 + f_1 \frac{g_0}{f_0}} \quad (38)$$

把式(38)代入式(36)~(37)可得 X_{ql} 和 X_l 。

可见,同步发电机 Park 模型的 q 轴电路参数均可唯一辨识。

3 参数辨识的分步策略

在 Park 模型中共有 11 个电路参数,若要同时辨识这些参数,一方面会增加计算量,另一方面也会影响辨识精度。因为参数空间维数越多,搜索到精确解的概率就越小。因此,本文采取分步辨识的策略,即先利用扰动前、后的稳态条件辨识发电机的部分参数,然后再利用动态条件辨识其余参数。基本步骤如下:

1) 利用扰动前和扰动后发电机的稳态条件确定一部分电路参数。由式(4)可求出励磁绕组的电阻 r_f 。由式(31)、(32)可求出 r_a 、 X_d 、 X_q 、 X_{ad} 和 X_l 。

2) 根据发电机的动态过程辨识其余电路参数,即 d 轴的 X_{fl} 、 X_{Dl} 、 r_D 和 q 轴的 X_{ql} 、 r_Q 。动态过程区间大小的选取会影响参数辨识的精度,合适的区间应该是电气时间常数的 10 倍左右。

3) 根据转换公式获得实用参数,具体参见文

献[8-9,12]。

这样分步辨识,减少了待辨识的参数个数,不仅可提高参数辨识的速度,而且可改善参数辨识的精度。

4 参数辨识的目标函数

对于 Park 模型的参数辨识问题,本文采用的输出变量是磁链增量,目标函数是磁链增量“实际值”与计算值之间误差的平方和。 d 轴电路参数辨识的目标函数为

$$E_d(\bar{Z}) = \sum_{k=0}^N [\Delta\psi_{dm}(k) - \Delta\psi_{dc}(k)]^2 \quad (39)$$

式中: k 为测点时步; N 为测点总数; $\Delta\psi_d$ 为 d 轴磁链增量;下标 m 表示“实际值”;下标 c 表示计算值。 q 轴电路参数辨识的目标函数类似。

同步发电机的磁链不能直接测量。由于转速在电磁暂态过程中变化很小,故可近似认为 $\omega \approx 1$ pu,为避免初始值问题,对 dq 轴电压方程进行偏差化处理,整理成如下状态方程形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\psi}_d \\ \Delta\dot{\psi}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi_d \\ \Delta\psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_d + r_a \Delta i_d \\ \Delta u_q + r_a \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (40)$$

式中定子电阻 r_a 已经用前后稳态条件辨识获得。由此可根据电压电流的实测值,求出磁链增量的“实际值”。

计算磁链增量的增量方程为

$$\begin{cases} \Delta\dot{\psi}_f = r_f \{ (X_{ad} + X_{Dl}) \Delta\psi_f - X_{ad} \Delta\psi_D - \Delta i_d \cdot [X_{ad}^2 - X_{ad}(X_{ad} + X_{Dl})] \} / [X_{ad}^2 - (X_{ad} + X_{fl}) \cdot (X_{ad} + X_{Dl})] + \Delta u_f \\ \Delta\dot{\psi}_D = r_D \{ (X_{ad} + X_{fl}) \Delta\psi_D - X_{ad} \Delta\psi_f - \Delta i_d \cdot [X_{ad}^2 - X_{ad}(X_{ad} + X_{fl})] \} / [X_{ad}^2 - (X_{ad} + X_{fl}) \cdot (X_{ad} + X_{Dl})] \\ \Delta\psi_d = \frac{X_{ad} X_{Dl}}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \Delta\psi_f + \frac{X_{ad} X_{fl}}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2} \Delta\psi_D - (X_{ad} + X_l + \frac{2X_{ad}^2 - X_{ad}(X_{ad} + X_{fl}) - X_{ad}(X_{ad} + X_{Dl})}{(X_{ad} + X_{fl})(X_{ad} + X_{Dl}) - X_{ad}^2}) \Delta i_d \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} \Delta\dot{\psi}_Q = -\frac{r_Q}{X_{aq} + X_{ql}} \Delta\psi_Q - \frac{r_Q X_{aq}}{X_{aq} + X_{ql}} \Delta i_q \\ \Delta\psi_q = \frac{X_{aq}}{X_{aq} + X_{ql}} \Delta\psi_Q + [\frac{X_{aq}^2}{X_{aq} + X_{ql}} - (X_{aq} + X_l)] \Delta i_q \end{cases} \quad (42)$$

由式(41)~(42)所得的磁链增量与发电机参数有关。其中部分参数已由前后稳态数据确定,其余参数在优化过程中有中间值可用。

5 参数辨识的蚁群算法

目标函数与参数之间的关系很复杂,所以优化方法必须十分有效。本文对比了多种模拟进化方法,选择采用蚁群算法作为参数优化的方法,详见文献[13-14],基本步骤如下:

1) 将蚁群在解空间内按一定方式作初始分布(推荐采用均匀分布)。这里要根据问题定义域的大小,即被辨识发电机参数的可能范围的大小,决定合适的蚁群规模。发电机参数的可能范围可根据参数的厂家给定值来选定。

2) 根据蚁群所处解空间位置的优劣,决定蚁群的信息量分布。

3) 求出各子区间内应有的蚁数分布。

4) 根据各子区间内应有的蚁数分布状况和当前蚁数分布状况之间的差别,决定蚁群的移动方向,并加以移动。

在蚁群做完一次整体移动之后,又可回到第2步,如此循环往复,直到若干次之间目标函数的差异小于设定的某个值时,迭代收敛,得出最优解。

本文方法可用于某个运行工况的参数辨识,当运行工况发生变化时,可再次进行参数辨识。

6 RTDS 测试

RTDS仿真系统为单机无穷大系统^[15],发电机的额定容量为217.43 MVA,功率因数为0.875 0。进行测试时,没有考虑发电机的饱和问题^[16-20]。采

用RTDS仿真的最大好处是参数的真值可设定,从而可测试参数辨识结果的精度。

电路参数的真值如下: $X_l=0.112\ 0\ \text{pu}$, $X_{ad}=0.880\ 0\ \text{pu}$, $X_{aq}=0.496\ 0\ \text{pu}$, $r_f=0.000\ 4\ \text{pu}$, $r_D=0.008\ 1\ \text{pu}$, $r_Q=0.071\ 0\ \text{pu}$, $X_{fd}=0.180\ 0\ \text{pu}$, $X_{Df}=0.220\ 1\ \text{pu}$, $X_{ff}=0.172\ 5\ \text{pu}$; 实用参数的真值如下: $X_d=0.992\ 0\ \text{pu}$, $X'_d=0.257\ 0\ \text{pu}$, $X''_d=0.201\ 0\ \text{pu}$, $T'_{d0}=8.7700\ \text{s}$, $T''_{d0}=0.1400\ \text{s}$, $X_q=0.608\ 0\ \text{pu}$, $X''_q=0.240\ 0\ \text{pu}$, $T''_{q0}=0.300\ 0\ \text{s}$ 。

当时间 $t=0.5\ \text{s}$ 时,将发电机的励磁参考电压阶跃性升高3%作为参数辨识的扰动信号,数据采样的时间间隔为0.01 s,采用相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)装置获得发电机出口电压、电流及励磁电压、转速和功角的实测数据。

基于扰动前后稳态条件可获得电抗 X_d 和 X_q ,结果如表1所示。由表1可见辨识误差很小,精度很高。

基于实用模型和Park模型的参数辨识结果如表2所示。对比表中结果可见,基于Park模型的辨识结果要比基于实用模型的辨识结果的精度高,辨识结果也更平稳。

基于Park模型辨识参数所得的 d 、 q 轴磁链动态响应曲线如图1所示。由图可见,基于Park模型的参数辨识取磁链为输出量是可行的,辨识所得模型的磁链拟合得很好。

表1 同步发电机稳态参数辨识结果

Tab. 1 Estimated steady-state parameters

参数	真值/pu	辨识值/pu	误差/%
X_d	0.992 0	0.991 9	-0.010 1
X_q	0.608 0	0.607 7	-0.049 3

表2 2种模型的动态参数辨识结果

Tab. 2 Estimation results of dynamic parameters with different models

搜索范围/%	模型	X'_d		X''_d		T'_{d0}		T''_{d0}		X''_q		T''_{q0}	
		辨识值/pu	误差/%	辨识值/pu	误差/%	辨识值/s	误差/%	辨识值/s	误差/%	辨识值/pu	误差/%	辨识值/s	误差/%
(-30, +30)	实用	0.257 3	0.101 3	0.219 4	9.172 8	8.852 0	0.934 6	0.133 7	-4.47 6	0.239 4	-0.24 9	0.296 7	-1.09 8
	Park	0.272 4	5.977 7	0.211 5	5.235 4	7.528 5	-14.155 8	0.135 0	-3.596 6	0.241 3	0.547 9	0.299 4	-0.210 8
(-60, +10)	实用	0.192 8	-24.991 8	0.181 3	-9.777 1	9.868 2	12.522 1	0.099 5	-28.918 9	0.221 9	-7.533 7	0.279 4	-6.852 1
	Park	0.264 5	2.908 8	0.202 6	0.808 6	7.475 7	-14.757 7	0.129 7	-7.362 4	0.244 1	1.723 9	0.292 9	-2.365 3
(-60, +30)	实用	0.115 2	-55.175 1	0.253 9	26.341 3	11.306 1	28.917 4	0.162 3	15.942 1	0.220 5	-8.107 1	0.272 6	-9.146 9
	Park	0.270 3	5.165 9	0.211 5	5.235 3	7.505 9	-14.414 1	0.134 9	-3.672 7	0.244 1	0.547 9	0.292 9	-0.210 8
(-60, +60)	实用	0.346 8	34.931 0	0.249 5	24.124 6	7.737 9	-11.768 3	0.114 9	-17.926 5	0.243 8	1.595 1	0.294 6	-1.788 8
	Park	0.267 8	4.196 7	0.215 0	6.944 5	7.479 4	-14.715 8	0.142 9	2.095 0	0.241 3	0.547 9	0.299 4	-0.210 8
(-30, +60)	实用	0.368 8	43.517 8	0.285 6	42.076 2	7.491 4	-14.578 9	0.142 0	1.450 6	0.232 8	-3.000 0	0.291 0	-3.000 0
	Park	0.285 9	11.231 4	0.216 5	7.723 6	7.677 8	-12.454 0	0.146 5	4.637 6	0.238 4	-0.646 5	0.306 2	2.076 9
(-10, +60)	实用	0.352 1	37.014 1	0.289 7	44.144 5	7.669 0	-12.553 9	0.166 7	19.066 5	0.232 8	-3.000 0	0.291 0	-3.000 0
	Park	0.297 7	15.851 7	0.214 8	6.880 2	7.813 7	-10.904 1	0.147 0	5.027 2	0.251 5	4.773 1	0.317 4	5.803 5

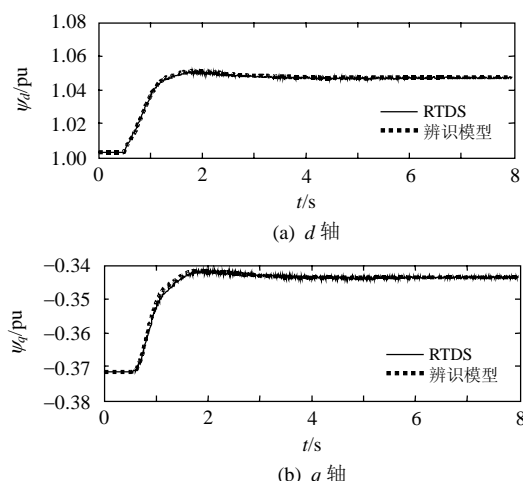


图 1 磁链曲线对比

Fig. 1 Comparison of d - and q -axis fluxes

对比 2 种模型的动态曲线计算结果, d 、 q 轴电流拟合曲线如图 2 所示。从图中可看出: 1) 2 种模型所得 q 轴电流拟合都很好, 这是因为 2 种模型的 q 轴参数都是互相独立的; 2) 用 Park 模型所得 d 轴电流与 RTDS 的曲线几乎没有差别, 而实用模型则有差别。所以, 基于 Park 模型参数辨识的动态曲线拟合效果更好。

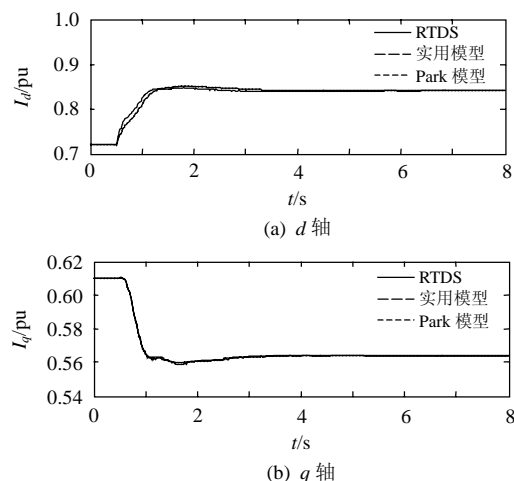


图 2 电流曲线对比

Fig. 2 Current curves of d - and q -axis with two different models

7 结论

1) 分析了电路参数的可辨识性问题, 研究结果表明: 利用对同步发电机励磁电压的扰动试验, Park 模型的 q 轴电路参数是唯一可辨识的。但 d 轴电路参数在仅利用扰动前的稳态量及动态过程的信息时, 其参数是无穷不可辨识的, 必须增加利用扰动后的稳态量, 才能使 d 轴电路参数可唯一辨识。

2) 提出了对同步发电机参数分步辨识的策略。

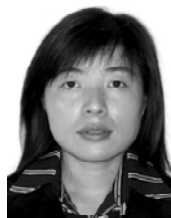
即利用扰动前后的稳态条件辨识出同步发电机的部分参数, 然后根据动态数据、利用蚁群算法辨识其他参数, 这样既保证了模型的可辨识性, 又提高了辨识的速度和精度。

3) 在 RTDS 仿真机上验证了上述辨识理论与辨识策略的有效性, 仿真计算结果表明, 基于 Park 模型辨识所得参数比基于实用模型所得参数具有更高的精度和平稳性。

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: 157-185.
- [2] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999: 48-68.
- [3] 米增强, 陈志忠, 南志远. 同步发电机动态参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 100-105.
Mi Zengqiang, Chen Zhizhong, Nan Zhiyuan. Identification of dynamic parameters in synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 100-105(in Chinese).
- [4] 刘晓芳, 蒙亮, 罗应力, 等. 同步发电机 d - q 轴饱和特性曲线族[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 68-72.
Liu Xiaofang, Meng Liang, Luo Yingli, et al. Saturated curves on d - q axes of synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 68-72(in Chinese).
- [5] 金宇清, 岳陈熙, 甄威, 等. 基于功角测量的同步发电机参数辨识频域法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 7-11.
Jin Yuqing, Yue Chenxi, Zhen Wei, et al. On-line frequency response method of synchronous machine parameter identification based on rotor angle measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 7-11(in Chinese).
- [6] 赵争鸣, 郑逢时, 黄英矩, 等. 大型同步发电机参数在线辨识系统校验与分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(9): 14-16.
Zhao Zhengming, Zheng Fengshi, Huang Yingju, et al. Experimental verification and analysis for identified parameters of large synchronous generators[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(9): 14-16(in Chinese).
- [7] 吴旭升, 马伟明, 王公宝, 等. 基于小波变换和 Prony 算法的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 38-42.
Wu Xusheng, Ma Weiming, Wang Gongbao, et al. Parameter identification of synchronous machine based on wavelet transform and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 38-42(in Chinese).
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统理论和方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 15-60.
- [9] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 1994: 45-198.
- [10] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 基于扩展粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 35-40.
Hu Jiasheng, Guo Chuangxin, Cao Yijia. Generator parameter identification based on extended particle swarm optimization method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 35-40(in Chinese).
- [11] Talebi M A, Rahimpour M, Gholami A, et al. A genetic algorithm approach for identifying synchronous generator parameters from

- excitation disturbance test[C]. Proceedings of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [12] Canay I M. Modeling of alternating current machines having multiple rotor circuits[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1993, 8(2): 280-296.
- [13] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在系统辨识中的应用[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 102-109.
- Wang Lei, Wu Qidi. Ant system algorithm based system identification[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 102-109(in Chinese)
- [14] 程志刚, 陈德钊, 吴晓华. 连续蚁群优化算法的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(8): 1147-1151.
- Cheng Zhigang, Chen Dezhaoh, Wu Xiaohua. Study of continuous ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(8): 1147-1151(in Chinese)
- [15] 郑旭, 孙海顺, 黄立滨, 等. RTDS 中同步电机模型特性研究[J]. 继电器, 2005, 33(13): 64-67.
- Zheng Xu, Sun Haishun, Huang Libin, et al. Research on the synchronous machine model in RTDS[J]. Relay, 2005, 33(13): 64-67(in Chinese).
- [16] 史家燕, 史源素, 赵肖敏, 等. 发电机工况参数模型及进相运行在线监测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 139-143.
- Shi Jiayan, Shi Yuansu, Zhao Xiaomin, et al. The new method of determining the capability of leading phase of generator and realizing the on-line monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 139-143(in Chinese).
- [17] 汤涌. 基于电机参数的同步电机模型[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 47-51.
- Tang Yong. A discussion about standard parameter model of synchronous machine[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 47-51(in Chinese).
- [18] 周长春, 徐政. 由直流输电引起的次同步振荡的阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 6-10.
- Zhou Changchun, Xu Zheng. Damping analysis of subsynchronous oscillation caused by HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 6-10(in Chinese).
- [19] 朱守真, 沈善德, 韩波. 频域法辨识同步机参数[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(1): 107-114.
- Zhu Shouzhun, Shen Shande, Han Bo. Identification of parameters of synchronous machine by frequency response tests[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1995, 35(1): 107-114(in Chinese).
- [20] 戈宝军, 李波, 李发海, 等. 同步电机异步-同步起动过程分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 93-97.
- Ge Baojun, Li Bo, Li Fahai, et al. Analysis of partial frequency startup process of synchronous machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 93-97(in Chinese).



孙黎霞

收稿日期: 2009-03-12。

作者简介:

孙黎霞(1978—), 女, 博士, 讲师, 主要从事电力电子在电力系统中应用方面的教学与研究, lixiasun@yahoo.cn;

鞠平(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统建模与控制方面的教学与研究;

高运华(1982—), 男, 硕士, 主要从事同步发电机参数辨识研究;

史可琴(1963—), 女, 硕士, 主要从事电力系统运行分析与管理。

(责任编辑 谷子)