

## 基于实测频率轨迹的机组调速器参数辨识

张辉<sup>1</sup>, 蒲天骄<sup>2</sup>, 王刚<sup>3</sup>, 于汀<sup>2</sup>, 王文杰<sup>3</sup>, 汤伟<sup>4</sup>, 林济铿<sup>5</sup>

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;  
3. 辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 4. 国家电网公司东北分部, 辽宁 沈阳 110180;  
5. 同济大学电子信息与工程学院电气工程系, 上海 201804)

**摘要:** 提出了一种基于实测频率轨迹曲线实现调速系统参数辨识新方法。建立了调速器系统的输入输出模型, 并证明了相应参数的可辨识性。通过设计接口直接调用 PSASP 软件的机电暂态仿真计算模块, 获得电力系统受扰之后的仿真频率曲线; 进而基于粒子群优化算法对调速器参数进行调节, 使得仿真频率曲线与实测频率曲线尽可能接近, 从而实现基于实测频率轨迹曲线的发电机组调速系统参数的辨识。实际系统的算例证明了所提出方法的有效性和正确性, 同时所设计的接口在一定程度上扩展了 PSASP 软件的应用范围。

**关键词:** 调速器; 参数辨识; 可辨识性; 实测频率轨迹; 优化算法

### Governor parameter identification of generation system based on measured frequency curve

ZHANG Hui<sup>1</sup>, PU Tian-jiao<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>, YU Ting<sup>2</sup>, WANG Wen-jie<sup>3</sup>, TANG Wei<sup>4</sup>, LIN Ji-keng<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 2. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Electrical Power Research Institute of Electrical Company of Liaoning Province, Shenyang 110006, China; 4. Northeast China Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, China; 5. Department of Electrical Engineering, College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A new approach for governor system parameter identification based on the measured frequency curve is presented. Firstly, an input-output model of governor system is established and the identifiability of corresponding parameters is confirmed. Then the simulated frequency curve of the disturbed power system is acquired by directly invoking PSASP (Power System Analysis Software Package) electromechanical transient simulation module through an interface design. Governor parameters of generation system are iteratively adjusted to optimally match the simulated frequency curve with the measured frequency curve using PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm, thus governor system parameter identification based on the measured frequency curve is realized. Simulation results of an actual power system illustrate the feasibility and efficiency of the proposed method, meanwhile application of PSASP is extended through the designed interface.

**Key words:** governor; parameter identification; identifiability; measured frequency curve; optimization algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0024-10

## 0 引言

调速系统作为发电机控制系统的重要组成部分, 其参数的正确与否直接影响着电网运行的稳定性和安全性<sup>[1-3]</sup>。由于系统运行方式变换频繁, 各个机组的调速系统为了适应系统的运行方式的变换, 往往也需要进行频繁调整。对于调度中心来说, 如何及时地获得系统所有机组调速系统的参数, 是系统运行安全性及稳定性的有力保证之一。

关于调速系统的参数辨识问题, 研究及工程技

术人员提出了许多有意义的方法, 目前大致可以分为两类方法。

第一类方法是试验结合辨识技术而获得调速系统的参数。文献[4]提出通过离线试验获得汽轮机机电液调节系统的输入和输出曲线, 然后采用最小二乘法对调速系统各个环节的参数进行辨识而获得相应的调速系统参数。文献[5]依据差分进化算法并结合汽轮机负荷扰动实验提出了汽轮机调速系统参数辨识的方法。文献[6]通过分析燃煤机组与燃气轮机在进行转速阶跃试验时的典型响应特性, 提出了响应

特性模型并获取了该模型的适用范围。该类方法的优点是所获得的模型及参数比较准确, 缺点是必须在机组检修情况下才能进行。

第二类方法是基于实测曲线, 进行相应机组调速系统参数的辨识。文献[7]提出了利用系统故障实测频率波动轨迹实现机组调速系统参数辨识的构想, 但并没提出具体算法。文献[8-9]分析了与频率波动轨迹具有强相关关系的调速系统的系数类型, 并得到如下结论: 调速器调差系数影响频率下降的最低点和回升频率, 调速器死区影响频率下降的最低点。文献[10]提出了所谓的系统频率稳定评价指标, 包括初始频降、频降时间、频降斜率、回升频率等; 并分析了对频率轨迹波动影响较大的参数。但该文所提的指标其实质是系统频率轨迹的波动大小的评价指标, 并非频率稳定指标。因此, 从上述可以看出, 目前并没有具体有效方法实现基于实测频率轨迹的调速系统参数辨识。

本文提出了一种基于实测频率轨迹曲线实现调速系统参数辨识新方法。该方法首先建立调速器系统的输入输出模型, 并证明了相应参数的可辨识性;

然后通过设计接口而直接调用 PSASP 软件的机电暂态仿真计算模块而获得电力系统受扰之后的仿真频率曲线, 进而基于粒子群优化算法对调速器参数进行调节使得仿真频率曲线与实测频率曲线尽可能接近; 通过反复的参数优化而得到最优调速器参数, 从而实现了基于实测频率曲线的发电机组调速系统参数的辨识。此外, 由于 PSASP 软件是成熟的商用软件, 本文通过设计接口而直接调用其仿真计算模块, 在一定程度上扩展了该软件的应用范围。实际系统的算例则证明了该方法的有效性和正确性。

## 1 调速系统建模与参数可辨识性分析

### 1.1 调速系统建模

因对频率轨迹波动影响较大的参数主要集中于电液调节系统, 故本文只对调速器电液调节系统进行详细建模, 调速器的电液伺服机构, 汽轮机模型, 以及发电机系统、励磁系统以及网络等均为已知系统。在调速器电液调节系统作用下的包括励磁、发电机以及网络的整个系统的传递函数框图如图 1 所示。

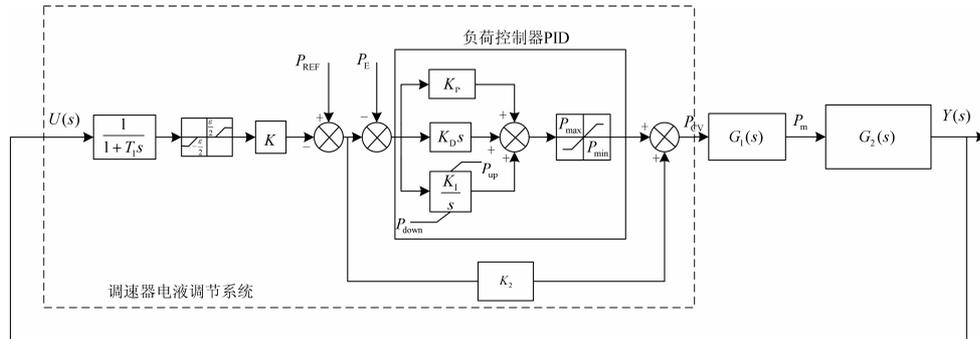


图 1 整体系统传递函数框图

Fig. 1 Transfer function block diagram of the overall system

在图 1 中,  $G_1(s)$  代表电液伺服机构、汽轮机模型等四型调速器内部其余部分的综合传递函数;  $G_2(s)$  代表机械功率-频率转化过程所包括的发电机系统、励磁系统以及网络所对应的综合传递函数。  $Y(s)$  表示系统频率偏移,  $U(s)$  表示系统输入, 该系统中,  $U(s) = Y(s)$ 。

由于在整个过程中电液伺服机构、汽轮机模型等调速器内部其余部分, 发电机系统、励磁系统以及网络的所有参数均为已知且不变, 因此  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  是固定不变的。只需要对图 1 中虚线框内的每个环节的传递函数, 建立相应的每个环节的输入输出函数关系, 进而建立整个调速器电液调节系统的输入和输出之间的函数关系。

下面分别对图 1 虚线框内的每一模块分别进行

建模, 进而获得其整体数学模型。

对于图 2 所示的模块 1 传递函数, 其中  $U(s)$  代表输入的系统频率偏移  $\Delta f$ 。  $x_1$  代表待辨识参数  $T_1$ ;  $Y_1(s)$  代表输出;  $u$ ,  $y_1$  分别为输入和输出时域函数形式 (以下同)。则该传递函数相应的微分方程为

$$u = y_1 + \frac{dy_1}{dt} T_1$$

化简得

$$y_1 = f(T_1, u) = f_1(x_1, u) \quad (1)$$

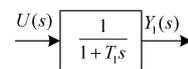


图 2 模块 1 传递函数

Fig. 2 Transfer function for the unit 1

对于如图 3 所示的模块 2 传递函数,  $Y_1(s)$  代表输入,  $Y_2(s)$  代表输出,  $x_2$  代表待辨识参数  $\varepsilon, K$ ; 将传递函数化为代数方程得

$$\begin{aligned} f_{21}(y_1, x_2) &= K(y_1 + \varepsilon/2), f_{22}(y_1, x_2) = K(y_1 - \varepsilon/2), \\ f_{23}(y_1, x_2) &= 0. \end{aligned}$$

则

$$y_2 = \begin{cases} K(y_1 + \varepsilon/2) & y_1 < -\varepsilon/2 \\ K(y_1 - \varepsilon/2) & y_1 > \varepsilon/2 \\ 0 & -\varepsilon/2 \leq y_1 \leq \varepsilon/2 \end{cases} = \begin{cases} f_{21}(y_1, x_2) & y_1 < -x_2/2 \\ f_{22}(y_1, x_2) & y_1 > x_2/2 \\ f_{23}(y_1, x_2) & -x_2/2 \leq y_1 \leq x_2/2 \end{cases} \quad (2)$$

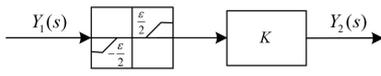


图 3 模块 2 传递函数

Fig. 3 Transfer function for the unit 2

对于如图 4 所示的模块 3 传递函数,  $Y_3(s)$  代表输入,  $Y_4(s)$  代表输出,  $x_3$  代表待辨识参数  $K_1$ 。由图 1 可以看出, 输入  $Y_3(s) = P_{REF} - Y_2(s) - P_E$ , 其中  $P_{REF}$  代表给定负荷,  $P_E$  代表反馈负荷, 因此, 与图 4 所表示的传递函数所对应的方程为

$$\begin{aligned} f_{41}(x_3, y_3) &= P_{up}, f_{42}(x_3, y_3) = P_{down}, \\ f_{43}(x_3, y_3) &= \int K_1 y_3 dt = \int x_3 y_3 dt \end{aligned}$$

则

$$y_4 = f_4(x_3, y_3) = \begin{cases} P_{up} & f_{43}(x_3, y_3) > P_{up} \\ P_{down} & f_{43}(x_3, y_3) < P_{down} \\ f_{43}(x_3, y_3) & P_{down} \leq f_{43}(x_3, y_3) \leq P_{up} \end{cases} = \begin{cases} f_{41}(x_3, y_3) & f_{43}(x_3, y_3) > P_{up} \\ f_{42}(x_3, y_3) & f_{43}(x_3, y_3) < P_{down} \\ f_{43}(x_3, y_3) & P_{down} \leq f_{43}(x_3, y_3) \leq P_{up} \end{cases} \quad (3)$$

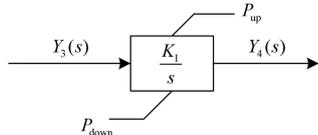


图 4 模块 3 传递函数

Fig. 4 Transfer function for the unit 3

对于如图 5 所示的模块 4 传递函数,  $Y_4(s)$  代表输入,  $Y_5(s)$  为输出,  $x_4$  表示待辨识参数  $K_p, K_D$ 。与图 5 相对应的方程为

$$y_5 = y_4 + K_p y_3 + K_D \frac{dy_3}{dt} = f_5(y_3, y_4, x_4) \quad (4)$$

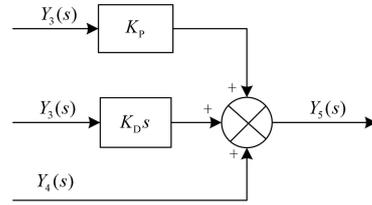


图 5 模块 4 传递函数

Fig. 5 Transfer function for the unit 4

对于如图 6 所示的模块 5 传递函数,  $Y_5(s)$  代表输入;  $x_5$  代表待辨识参数, 包括  $P_{max}, P_{min}$ ;  $Y_6(s)$  代表输出。与图 6 相对应的方程为

$$f_{61}(x_5, y_5) = P_{max}, f_{62}(x_5, y_5) = P_{min}, f_{63}(x_5, y_5) = ky_5$$

则

$$y_6 = f_6(x_5, y_5) = \begin{cases} P_{max} & f_{63}(x_5, y_5) > P_{max} \\ P_{min} & f_{63}(x_5, y_5) < P_{min} \\ f_{63}(x_5, y_5) & P_{min} \leq f_{63}(x_5, y_5) \leq P_{max} \end{cases} = \begin{cases} f_{61}(x_5, y_5) & f_{63}(x_5, y_5) > P_{max} \\ f_{62}(x_5, y_5) & f_{63}(x_5, y_5) < P_{min} \\ f_{63}(x_5, y_5) & P_{min} \leq f_{63}(x_5, y_5) \leq P_{max} \end{cases} \quad (5)$$

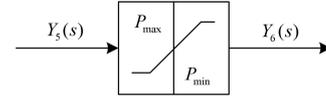


图 6 模块 5 传递函数

Fig. 6 Transfer function for the unit 5

对于如图 7 所示的模块 6 传递函数,  $Y_6(s)$ ,  $Y_7(s)$  代表输入; 由图 1 可知,  $Y_7 = K_2(P_{REF} - Y_2)$ ,  $P_{CV}$  代表输出, 表示由电液调节系统输出的调门指令。与图 7 相对应的方程为

$$P_{CV} = y_6 + y_7 = f_7(y_6, y_7) \quad (6)$$

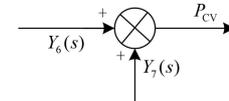


图 7 模块 6 传递函数

Fig. 7 Transfer function for the unit 6

将  $u$  代入式 (1) 得到  $y_1$ , 将  $y_1$  代入式 (2) 得到  $y_2$ , 由  $y_2$  表示出  $y_3$  和  $y_7$ , 并将  $y_3$  代入式 (3) 得到  $y_4$ , 将  $y_3$  和  $y_4$  代入式 (4) 得到  $y_5$ , 将  $y_5$  代入式 (5) 得到  $y_6$ , 将  $y_6$  和  $y_7$  代入式 (6) 得到图 1 中虚线框图内所表示的输入和输出函数表达式为

$$P_{CV} = f(u, x) \quad (7)$$

其中:  $u$  代表是输入的系统频率偏移  $\Delta f$ ;  $x$  代表电液调节系统中各环节的待辨识的参数, 包括  $T_1, K, \varepsilon, K_I, K_D, K_P, K_2, P_{up}, P_{down}, P_{max}, P_{min}$ ;  $P_{CV}$  代表输出机械功率。

## 1.2 参数可辨识性分析

对式 (7) 中的变量 (即待辨识参数) 的可辨识性进行分析<sup>[11-13]</sup>。在图 1 中, 当死区环节触发时 (即输入位于死区中), 没有输出, 无须讨论。当死区环节未触发时,  $y_1 > \varepsilon/2$  与  $y_1 < -\varepsilon/2$  时的情况类似, 因此只须对  $y_1 > \varepsilon/2$  时的可辨识性进行分析,  $y_1 < -\varepsilon/2$  情况与之类似。下面分两种情况进行讨论。

(1) 图 1 中虚线框内的饱和环节没有被触发 (即只是线性环节)。则图 1 中虚线框内的输出函数可以表示为

$$P_{CV} = \begin{bmatrix} G_a(s) & G_b(s) & G_c(s) & G_d(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(s) \\ P_{REF}(s) \\ P_E(s) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_a(s) = -\frac{KK_D s^2 + K(K_P + K_2)s + KK_I}{(1 + sT_1)s} =$$

$$-\frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{b_0 s^2 + b_1 s}$$

$$G_b(s) = \frac{T_1 K_D s^3 + (K_D + T_1 K_P + T_1 K_2)s^2 +$$

$$(K_P + K_2 + T_1 K_I)s + K_I}{(1 + sT_1)s} =$$

$$\frac{a_3 s^3 + a_4 s^2 + a_5 s + a_6}{b_0 s^2 + b_1 s}$$

$$G_c(s) = -\frac{T_1 K_D s^3 + (K_D + T_1 K_P)s^2 -$$

$$(K_P + T_1 K_I)s + K_I}{(1 + sT_1)s} =$$

$$-\frac{a_3 s^3 + a_7 s^2 + a_8 s + a_6}{b_0 s^2 + b_1 s}$$

$$G_d(s) = \frac{K\varepsilon[T_1 K_D s^3 + (K_D + T_1 K_P + T_1 K_2)s^2] +$$

$$K\varepsilon[(K_P + K_2 + T_1 K_I)s + K_I]}{2(1 + sT_1)s} =$$

$$\frac{a_9 s^3 + a_{10} s^2 + a_{11} s + a_{12}}{b_0 s^2 + b_1 s}$$

其中:  $T_1 = b_0$ ;  $K_D = \frac{b_0}{a_3}$ ;  $K_P = \frac{a_3 a_7 - b_0}{a_3 b_0}$ ;  $K_I = a_6$ ;

$$K = \frac{a_2}{a_6}; K_2 = \frac{a_7 - a_4}{b_0}; \varepsilon = \frac{2a_9 a_6}{a_2 a_3}。$$

从而意味着所有待辨识参数  $T_1, K, K_I, K_D, K_P, K_2, \varepsilon$  与各传递函数  $G_a(s), G_b(s), G_c(s), G_d(s)$  的系数  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, b_0, b_1$  均为简单的线性关系。

当  $P_{REF}(s), P_E(s), P_{CV}, U(s)$  均为已知时,  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, b_0, b_1$  可辨识; 由  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, b_0, b_1$  与  $T_1, K, K_I, K_D, K_P, K_2, \varepsilon$  的简单的线性关系, 说明  $T_1, K, K_I, K_D, K_P, K_2, \varepsilon$  均可以唯一辨识。

(2) 图 1 中虚线框内饱和环节被触发。第一个饱和环节如图 4 所示, 假设此时输入  $Y_4(s)$  达到饱和上限, 则相应的传递函数为

$$P_{CV} = \frac{-(KK_2 + KK_P + KK_D)U(s)}{1 + T_1 s} + \frac{(1 + T_1 s)(K_2 + K_P + K_D s)P_{REF}(s)}{1 + T_1 s} -$$

$$\frac{(1 + T_1 s)(K_P + K_D s)P_E(s)}{1 + T_1 s} +$$

$$\frac{K(1 + T_1 s)(K_2 + K_P + K_D s)\frac{\varepsilon}{2} + (1 + T_1 s)P_{up}}{1 + T_1 s} =$$

$$\begin{bmatrix} G_e(s) & G_f(s) & G_g(s) & G_h(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(s) \\ P_{REF}(s) \\ P_E(s) \\ 1 \\ P_{up} \end{bmatrix}$$

$$G_e(s) = -\frac{KK_2 + KK_P + KK_D}{1 + T_1 s}, G_f(s) = K_2 + K_P + K_D s$$

$$G_g(s) = K_P + K_D s, G_h(s) = K(K_2 + K_P + K_D s)\frac{\varepsilon}{2}$$

$$P_{up} = P_{CV} - G_e(s)U(s) - G_f(s)P_{REF}(s) - G_g(s)P_E(s) - G_h(s)$$

由于在饱和环节没有被触发时  $T_1, K_D, K, K_2, K, \varepsilon$  已经唯一辨识, 所以  $G_e(s), G_f(s), G_g(s), G_h(s)$  可以获得, 相应地当  $P_{REF}(s), P_E(s), P_{CV}, U(s)$  均为已知时, 由参数  $P_{up}$  的上述表达式可知  $P_{up}$  可唯一辨识; 对于  $P_{down}$ , 情况类似, 也可唯一辨识。

第二个饱和环节如图 6 所示, 假设输入  $y_6$  达到该饱和环节的上限  $P_{max}$ , 则系统的输出函数可以表示为

$$P_{CV} = \frac{-KK_2U(s) + K_2(1+T_1s)P_{REF}(s)}{1+T_1s} + \frac{KK_2(1+T_1s)\frac{\varepsilon}{2} + (1+T_1s)P_{max}}{1+T_1s} = \begin{bmatrix} U(s) \\ P_{REF}(s) \\ 1 \\ P_{max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_i(s) & G_j(s) & G_k(s) & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_i(s) = \frac{-KK_2}{1+T_1s}, G_j(s) = K_2, G_k(s) = KK_2 \frac{\varepsilon}{2}$$

$$P_{max} = P_{CV} - G_i(s)U(s) - G_j(s)P_{REF}(s) - G_k(s)$$

由于在饱和环节没有被促发时  $T_1, K_2, K, \varepsilon$  已经唯一辨识, 所以  $G_i(s), G_j(s), G_k(s)$  便可得到, 当  $P_{REF}(s), P_{CV}, U(s)$  均为已知时, 由参数  $P_{max}$  的上述表达式可知其可唯一辨识; 对于  $P_{min}$ , 情况类似, 也可唯一辨识。

因此, 图 1 虚线框中的调速器电液调节系统的相关参数是可唯一辨识的。

## 2 基于优化技术的调速器电液调节系统的参数辨识算法

若把图 1 中待辨识参数的实际值用向量  $\bar{x}$  表示, 实际输入变量用向量  $\bar{u}$  表示, 由 1.1 节推得的输出函数式 (7) 与  $G_1(s), G_2(s)$  的相应时域表达式  $ff(P_{CV})$  相乘, 得到图 1 的整体时域表达式; 若图 1 的实际输出用向量  $\bar{z}$  表示, 则图 1 的输入和输出之间的数学表达式为

$$\bar{z} = f(\bar{x}, \bar{u}) \cdot ff(f(\bar{x}, \bar{u})) \quad (8)$$

若调速器电液调节系统的待辨识变量估计值记为  $\hat{x}$ , 仿真输入为  $\hat{u}$  时相应模型输出为  $\hat{z}$ , 则调速器电液调节系统的参数辨识问题即为求使得仿真系统 (即模型) 的输出与实际系统输出最为接近情况下的最佳参数, 即可表示为

$$\text{Min}_{\hat{x}} (\hat{z} - \bar{z})^2 = \text{Min}_{\hat{x}} (f(\hat{x}, \hat{u}) \cdot ff(f(\hat{x}, \hat{u})) - \bar{z})^2 \quad (9)$$

对于式 (9) 所示的调速器电液调节系统参数辨识的优化求解过程, 可以表示成图 8 所示。

本文把图 8 的参数辨识过程结合实际系统的实测频率轨迹和 PSASP 软件系统, 提出了调速器电液调节系统的参数辨识新方法。基本思路为: 对于除调速器以外的所有系统 (励磁系统、发电机系统、网络) 均已知的  $s$  条频率录波曲线, 初选一组调速

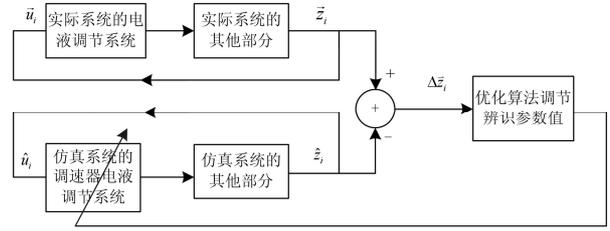


图 8 参数辨识的基本过程

Fig. 8 Principle of the parameter identification

器电液调节系统初始参数, 利用 PSASP 软件获得对应于此组调速器电液调节系统参数的  $s$  条频率仿真轨迹, 并分别计算  $s$  条频率仿真轨迹相对于实测轨迹的偏差, 选取仿真与相应实测频率曲线对中偏差值最大的 1 对曲线, 依据优化算法对已有调速器电液调节系统参数进行修正, 而获得新的调速器电液调节系统参数; 并按上述方法进行新一轮计算及修正, 如此循环迭代, 直到停止计算判据满足要求。其具体过程如下。

(1) 初始化:  $k=0$ , 给定迭代次数  $N$ , 收敛判据  $\varepsilon$ ; 给定待辨识调速器参数的初始值及其变化区间。

(2) 基于待辨识参数的估计值  $\hat{x}_k$  ( $k$  表示进行第  $k$  次参数估计), 利用 PSASP 软件获得对应于此组调速器参数的  $s$  条频率仿真轨迹 (对应于系统的  $s$  种故障), 并利用式 (10) 计算  $s$  条频率仿真轨迹相对于实测轨迹的偏差。

$$g_i(\hat{x}_k) = \sum_{t=0}^m [\hat{z}_i(\hat{x}_k, \hat{u}, t) - \bar{z}_i(\bar{x}, \bar{u}, t)]^2 \quad (10)$$

其中:  $i$  表示第  $i$  条频率轨迹;  $m$  表示将频率曲线离散化后的采样数;  $t$  表示频率轨迹的第  $t$  个采样点;  $\hat{x}_k$  表示待辨识参数的第  $k$  次估计值;  $\bar{x}$  表示辨识参数的真值;  $\hat{z}_i(\hat{x}_k, \hat{u}, t)$  表示利用第  $k$  次待辨识参数估计值获得的第  $i$  条频率仿真轨迹离散化后对应于第  $t$  个采样点的值;  $\bar{z}_i(\bar{x}, \bar{u}, t)$  表示第  $i$  条频率实测轨迹离散化后对应于第  $t$  个采样点的值;  $g_i(\hat{x}_k)$  表示以待辨识参数的第  $k$  次估计值获得的第  $i$  条频率仿真轨迹与实测轨迹的偏差的平方和。

(3) 选取仿真与实测频率曲线对中偏差最大的曲线对, 即

$$g(\hat{x}_k) = \max_i [g_i(\hat{x}_k)] \quad (11)$$

若  $g(\hat{x}_k) < \varepsilon$ , 说明偏差最大的仿真曲线与实测曲线的偏差值满足要求, 已获得了待辨识参数的最佳估计值, 迭代结束; 否则采用粒子群优化技术, 基于所选中的仿真与实际频率曲线对, 对于当前待测量估计值  $\hat{x}_k$  进行修正, 获得其新值  $\hat{x}_{k+1}$ ; 粒子群优化技术, 限于篇幅, 请参阅相关文献 [14-17]。

(4)  $k = k + 1$ , 转向步骤 (1)。  
其整体流程图如图 9 所示。

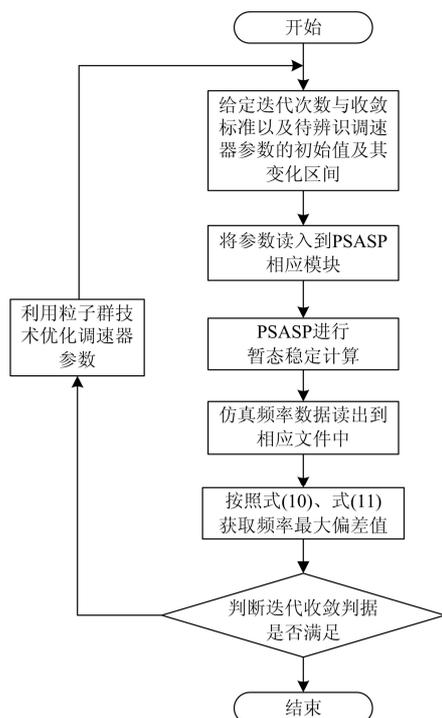


图 9 计算流程图

Fig. 9 Flowchart for the method proposed

### 3 与 PSASP 软件调用相关的操作的实现

对于实际系统的仿真计算,是第 2 节算法中的一个重要环节,本文通过设计接口直接调用电力系统分析综合程序(PSASP)<sup>[18-19]</sup>的计算模块,而方便地实现了仿真计算。

PSASP 软件提供了用户自定义建模(UD)和用户程序接口(UPI)环境,然而 PSASP 并没有提供计算模块和输出数据的接口<sup>[20]</sup>,无法实现其计算模块的直接调用和对计算结果的处理。本文设计了 PSASP 软件计算模块及用户程序接口调用方法,实现了其计算模块及计算结果的调用和处理。本文第 2 节调速器参数辨识算法中与 PSASP 软件相关的数据自动读取、多次自动进行计算模块以及计算结果的调用等三方面问题的具体实现方法分别如下。

#### (1) 从文件中读入调速器参数

PSASP 提供了从交互界面读入所有控制系统的参数,但并未提供从文件中读入相应的参数功能。由于每次优化之后调速器的参数是存储于文件中,因此为了仿真计算的反复进行,需实现存储于文件中的调速器参数读入 PSASP 的计算模块中的操作。

由于 PSASP 软件系统的调速器参数存储于 lib

文件夹下的 commpar.dbc 数据库的 gov.dbf 表格中,即其计算模块能够自动读取存储于 gov.dbf 表格中的相应参数。因此,本文采用 ODBC 作为接口,实现文件与 gov.dbf 表格的链接,并通过 Putcollect() 语句将相应文件中的调速器参数读入到 commpar.dbc 数据库的 gov.dbf 表格中,从而实现了调速器参数从文件中直接读入 PSASP 计算程序。相应的逻辑代码为

```

Begin;
m_pConnection2.CreateInstance(__uuidof(Connection)); // 建立 commpar.dbc 的数据源链接
m_govset.CreateInstance(__uuidof(Recordset)); // 建立相关的记录集 m_govset
m_govset->Open();
m_govset->Move(); // 寻找到 m_govset 中将要进行修改的调速器参数所在的位置
m_govset->PutCollect();
m_govset->Update(); // 将修改后的参数读入并更新
m_govset->Close(); // 关闭记录集
m_pConnection2->Close(); // 断开数据源链接
End.
  
```

#### (2) PSASP 暂态稳定计算模块的多次自动调用

为了对多组频率录波曲线的仿真逼近,需要进行 PSASP 计算模块的反复调用。而 PSASP 系统只提供一次计算,且计算的触发须通过交互界面的启动按钮的人为操作才能进行,并没提供计算的自动进行。本文的方法是通过批处理模块 hstbatcal.exe, SetCursorPos() 函数及 mouse\_event() 函数来实现 PSASP 计算模块的反复多次自动调用。具体是通过函数 ShellExecute() 打开 hstbatcal.exe 程序界面,然后通过 SetCursorPos() 函数与 mouse\_event() 函数调用获取 hstbatcal.exe 交互界面中启动按钮位置并点击,从而实现在对于计算模块的多次自动调用。相应的逻辑代码如下。

```

Begin;
ShellExecute(); // 打开 hstbatcal.exe 程序
Do
{
SetCursorPos(); // 找到相关按钮的位置
// 以下为进行一次鼠标点击事件
mouse_event(MOUSEEVENTF_LEFTDOWN,0,0,0,0);
Sleep(1000);
mouse_event(MOUSEEVENTF_LEFTUP,0,0,0,0);
}
While ("未点击暂态稳定计算按钮")
Sleep(); // 主程序挂起已进行暂态稳定计算
  
```

```
WM-close(); //执行完毕, 关闭相关窗口
End
```

(3) 仿真计算所得到的频率轨迹曲线数据读出到相应文件中。

PSASP 计算完成之后, 其结果自动存入 result 文件夹下数据库 stresult.dbc 的 Output 表中, 本文通过 ODBC 接口, 及 Getcollect() 语句将 Output 表中的仿真计算所得到的频率轨迹曲线数据读出并存入相应的 txt 文件中。由于此过程与从文件中把调速器参数读入相应 gov.dbf 表格中的过程类似, 其相应的逻辑代码在此就不再赘述。

#### 4 算例分析

本文将上述方法用于东北电网的调速系统参数辨识中, 以验证该方法的有效性。东北电网 100 MW 以下机组是采用机械式调速系统, 并已有现场实测参数, 但 100 MW 及以上机组, 均安装电气液压式调速系统, 东北电网已开展典型机组的调速器模型参数实测工作, 其中: 绥中厂#2 机采用 PSASP 3 型调速器模型及实测参数; 白山厂#5 机采用 PSASP 7 型调速器模型及实测参数; 伊敏厂#1 机, #4 机采用 PSASP 4 型调速器模型及实测参数, 而对于其他机组的调速系统并没有实测数据。

本文对已实测机组所在电厂的其他机组的调速系统直接套用该厂已实测参数, 对机组容量 100 MW 以上未实测的调速系统均东北电网调度建议的 PSASP 4 型调速器模型 (即本文前述模型), 并按照机组容量把相应调速系统的参数分成三类: 机组容量在 100 MW 到 300 MW 的, 其调速器参数为第一类; 机组容量在 300 MW 到 500 MW 的, 其调速器参数为第二类; 机组容量在 500 MW 以上的, 其调速器参数为第三类。利用本文方法分别辨识出以上三组调速器的参数, 并与实测频率曲线进行对比, 以证明其有效性。

东北电网 2009 年有频率录波轨迹曲线并已知其相应网络结构和机组除调速系统之外所有控制系统参数的故障情况列于表 1 中。

表 1 东北电网 2009 年故障情况

Table 1 Northeast power grid fault cases in 2009

序号	时间	故障详情
1	2009 年 7 月 3 日	沙岭母线跳闸
2	2009 年 8 月 11 日	绥中厂机组跳闸
3	2009 年 11 月 3 日	白山厂切 1 台机
4	2009 年 11 月 3 日(2)	白山厂切 2 台机
5	2009 年 7 月 31 日	哈三 B 机组跳闸
6	2009 年 9 月 6 日	元宝山#3 跳闸
7	2009 年 9 月 6 日 (2)	元宝山#3 跳闸
8	2009 年 11 月 7 日	绥中厂#2 跳闸
9	2009 年 11 月 11 日	元宝山厂#2, #4 跳闸

由于东北电网对前四组故障有详尽的录波数据 (每隔 0.02 s 采样一次), 所以依照表 1 中前四组故障相应的各个系统参数及频率录波轨迹曲线, 采用本文所提出的方法对东北电网未实测的三类机组调速系统的参数进行多次辨识, 选择其中最好的一组作为最后辨识的结果, 所获得的三类调速器参数值如表 2 所示。以所辨识出的三类调速器参数及表 1 中后五组故障相对应的系统其他参数进行仿真所获得的系统频率曲线与频率录波轨迹的对比图列于图 10~图 14。

从图 10~图 14 可以看出, 利用本文所辨识的调速器参数结合相应故障及系统其他部分的参数可以获得与频率录波轨迹曲线很接近的频率曲线。相应也证明了本文所提方法的有效性, 从而避免非常繁琐的现场测试, 只需利用频率的故障录波曲线及系统的其他部分的参数, 即可完成系统的调速系统的参数辨识。

表 2 东北电网调速器系统 3 类辨识参数

Table 2 Governor parameter data identified by the method proposed for the three kinds of generators of northeast power grid

参数名称	$\varepsilon$	$T_i$	$K$	$K_p$	$K_D$	$K_i$
第 1 类	0.002	0.02	20.0	0.40	0.0	0.03
第 2 类	0.002	0.02	20.0	0.40	0.0	0.03
第 3 类	0.002	0.02	20.0	0.40	0.0	0.03
参数名称	$K_2$	$P_{up}$	$P_{down}$	$P_{max}$	$P_{min}$	
第 1 类	0.1	1.002 73	0.0	1.014 01	0.0	
第 2 类	0.15	1.0	0.0	1.0	0.0	
第 3 类	0.135 182	1.0	0.0	1.014 18	0.0	

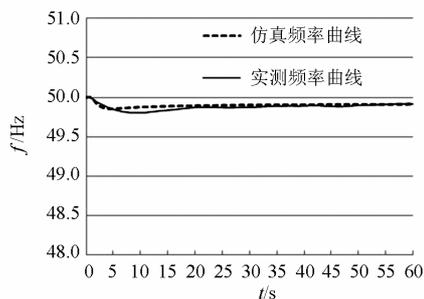


图 10 20090731 故障频率轨迹/仿真频率轨迹  
Fig. 10 20090731 fault frequency curve versus simulated frequency curve

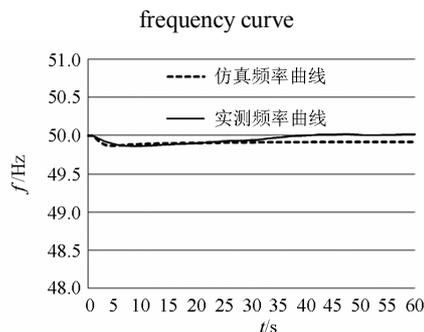


图 11 20090906 故障频率轨迹/仿真频率轨迹  
Fig. 11 20090906 fault frequency curve versus simulated frequency curve

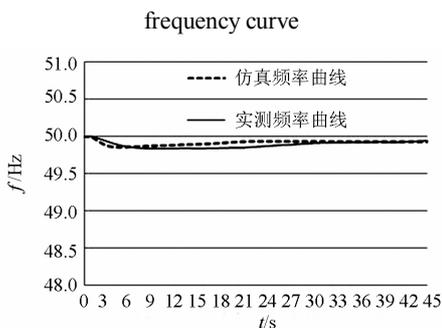


图 12 200909062 故障频率轨迹/仿真频率轨迹  
Fig. 12 200909062 fault frequency curve versus simulated frequency curve

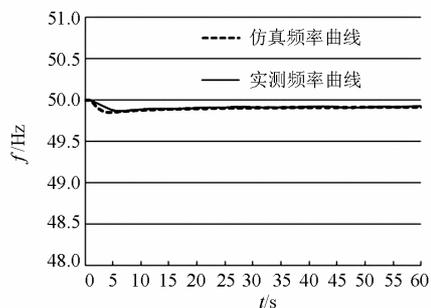


图 13 20091107 故障频率轨迹/仿真频率轨迹  
Fig. 13 20091107 fault frequency curve versus simulated frequency curve

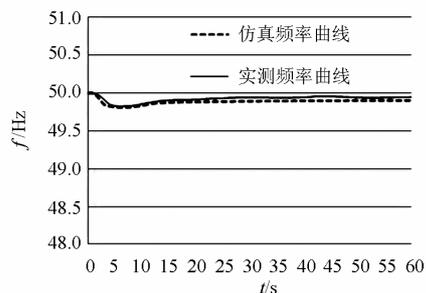


图 14 20091111 故障频率轨迹/仿真频率轨迹  
Fig. 14 20091111 fault frequency curve versus simulated frequency curve

## 5 结论

本文提出了一种基于实测频率轨迹曲线实现调速系统参数辨识新方法。该方法首先建立调速器系统的输入输出模型；然后通过设计接口而直接调用 PSASP 软件的机电暂态仿真计算模块而获得电力系统受扰之后的仿真频率曲线，进而基于粒子群优化算法对调速器参数进行调节使得仿真频率曲线与实测频率曲线尽可能接近；通过反复的参数优化而得到最优调速器参数，而实现了基于实测频率曲线的发电机组调速系统参数的辨识。此外，由于 PSASP 软件是成熟的商用软件，本文通过设计接口而直接调用其仿真计算模块，在一定程度上扩展了该软件的应用范围。由于本文方法具有很强的实用性，有望在实际工程中得到应用。

## 参考文献

- [1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WANG Xi-fan. Modern electric power system analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 张培高, 李兴源, 李政. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 143-149, 155.  
ZHANG Pei-gao, LI Xing-yuan, LI Zheng. Research on frequency stability and control strategy in isolated power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 143-149, 155.
- [3] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.  
ZHAO Yuan, WU Xiao-ping, XIE Kai-gui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [4] 孙平, 袁伯英. 汽轮机调速系统元件参数辨识及其应用[J]. 中国电力, 1995, 28(11): 7-12.  
SUN Ping, YUAN Bo-ying. Parameter recognition of steam turbine governor system elements and its application[J]. Electric Power, 1995, 28(11): 7-12.
- [5] 武海澄, 蔡兵, 陈胜利, 等. 汽轮机调速系统参数辨识方法研究[J]. 安徽电力, 2010, 27(1): 21-25.  
WU Hai-cheng, CAI Bing, CHEN Sheng-li, et al. Research and application on parameter identification method of turbine speed governor system[J]. Anhui Electric Power, 2010, 27(1): 21-25.
- [6] 武诚, 徐政, 倪秋龙, 等. 基于响应特性的原动机及调速器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 226-231.  
WU Cheng, XU Zheng, NI Qiu-long, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 226-231.
- [7] 徐伟, 薛禹胜, 陈实, 等. 从实测轨迹提取知识时的困难及展望[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 1-7.  
XU Wei, XUE Yu-sheng, CHEN Shi, et al. Difficulties and prospects of knowledge extracting from measured trajectories[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 1-7.
- [8] 李宇龙, 王浩, 任继红, 等. 电力系统频率动态仿真结果准确度因素分析[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(1): 50-52, 61.  
LI Yu-long, WANG Hao, REN Ji-hong, et al. Factors influencing accuracy of electric power system frequency dynamic simulation[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(1): 50-52, 61.
- [9] 刘洪波, 穆钢, 徐兴伟, 等. 使功—频过程仿真轨迹逼近实测轨迹的模型参数研究[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 20-24.  
LIU Hong-bo, MU Gang, XU Xing-wei, et al. Model parameter regulation to make simulated trajectory of power frequency process draw near measured trajectory based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 20-24.
- [10] 徐兴伟. 基于轨迹的复杂电力系统频率动态过程分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.  
XU Xing-wei. Complex power system frequency dynamic process analysis based on the trajectory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [11] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
SHEN Shan-de. Identification of power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [12] 王兴贵, 王言徐, 智勇. 辨识理论在发电机励磁系统建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 52-55.  
WANG Xing-gui, WANG Yan-xu, ZHI Yong. Application of parameters identification theory in generator excitation system modeling[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 52-55.
- [13] 林济铿, 张闻博, 武乃虎, 等. 基于故障录波器的机组参数辨识[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 27-34.  
LIN Ji-keng, ZHANG Wen-bo, WU Nai-hu, et al. Generation system parameter identification based on DFR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 27-34.
- [14] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
ZENG Jian-chao, JIE Jing, CUI Zhi-hua. Particle swarm optimization algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [15] 查卫华, 袁越, 张涛. 基于改进粒子群算法的励磁系统参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 29-32.  
ZHA Wei-hua, YUAN Yue, ZHANG Tao. Particle swarm optimization algorithm based excitation system parameters identification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 29-32.
- [16] 何恰刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 163-171.  
HE Yi-gang, ZHU Wen-ji, ZHOU Yan-tao, et al. An analog circuit diagnosis method based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 163-171.
- [17] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.  
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan,

et al. A survey on application of particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.

[18] 张建华, 张国华, 杨京燕. 基于 PSASP 的廊坊电网静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 65-70.  
ZHANG Jian-hua, ZHANG Guo-hua, YANG Jing-yan. An analysis of static voltage stability for Langfang power system based on PSASP[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 65-70.

[19] 吴中习, 周泽昕, 张启沛, 等. 《电力系统分析综合程序》用户程序接口 (PSASP/UIP) 的开发和应用[J]. 电网技术, 1996, 20(2): 15-20.  
WU Zhong-xi, ZHOU Ze-xin, ZHANG Qi-pei, et al. The development and application of user program interface based on power system analysis package (PSASP/UIP)[J]. Power System Technology, 1996, 20(2): 15-20.

[20] 王武双, 王晓茹, 黄飞, 等. 电力系统仿真软件 PSASP 仿真接口研究与应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 113-117.  
WANG Wu-shuang, WANG Xiao-ru, HUANG Fei, et al. Development and application of interface for power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 113-117.

收稿日期: 2013-04-09; 修回日期: 2013-08-15

作者简介:

张 辉 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统参数辨识; E-mail: zhanghuitc0406@126.com

蒲天骄 (1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度自动化, 电网仿真。

### 关于《电力系统保护与控制》录用稿优先数字出版的说明

期刊印刷版学术论文发表周期较长, 为缩短学术论文发表周期, 提高学术成果的传播和利用价值, 争取科研成果的首发权, 本刊加入“中国知网 (<http://www.cnki.net>)”和“万方数据 (<http://www.wanfangdata.com.cn/>)”的学术期刊优先数字出版平台, 将对已录用的论文先于印刷版在“中国知网”、“万方数据”出版。

由于优先数字出版的论文未经编辑加工和校对, 不免存在错字、漏字、病句甚至逻辑错误, 如果您在阅读时发现错误, 请及时联系编辑部, 本刊非常期待您的指正, 感谢您对本刊的支持!

若有不同意优先数字出版的作者, 请投稿时特别说明。

《电力系统保护与控制》编辑部