

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230953

基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统 参数分类辨识方法

马睿聪¹, 邹世豪¹, 曹永吉², 张恒旭¹, 刘志文¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学智能创新研究院, 山东 济南 250101)

摘要: 同步调相机及其励磁系统间由于电气耦合而导致参数辨识困难, 但目前缺少对待辨识参数量与观察量间耦合特性的分析。对此, 提出一种基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法。分析同步调相机在不同时间尺度下的关键参数, 基于轨迹灵敏度信息划分待辨识参数的类型, 构建关联参数集合。考虑稳态、次暂态和暂态下同步调相机及其励磁系统响应特性的差异, 在不同时间尺度上分别建立参数分类辨识模型。依据关联参数集合进行参数分类辨识, 采用基于 Tent 混沌映射的改进蛇优化算法求解。通过算例分析验证了所提方法的有效性和适应性。

关键词: 同步调相机; 励磁系统; 灵敏度分析; 关联参数辨识; Tent 混沌映射

Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter

MA Ruicong¹, ZOU Shihao¹, CAO Yongji², ZHANG Hengxu¹, LIU Zhiwen¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Academy of Intelligent Innovation, Shandong University, Jinan 250101, China)

Abstract: The electrical coupling of a synchronous condenser and its excitation system makes parameter identification difficult, and the analysis of the coupling characteristics between the identified parameters and observed variables is omitted. Therefore, a parameter classification and identification method based on sensitivity analysis is proposed. The key parameters of the synchronous condenser are analyzed at different time scales, and the types of parameters are classified based on the trajectory sensitivity information to establish the sets of coupling parameters. Considering the differences in response characteristics of the synchronous condenser and its excitation system in steady-state, sub-transient, and transient conditions, the parameter identification models are separately established at different time scales. The parameter identification is carried out according to the coupling parameter sets, and an improved snake optimization algorithm based on Tent chaotic mapping is adopted for analysis. The effectiveness and adaptability of the proposed method are verified by case study analysis.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177096).

Key words: synchronous condenser; excitation system; sensitivity analysis; coupling parameter identification; Tent chaotic map

0 引言

随着我国多回特高压直流外送通道的建设, 送端系统的格局发生变化, 呈现出“强直弱交”的特

点^[1-3]。由于交流网架薄弱且常规机组逐渐被新能源替代, 电网无功电压支撑能力不足的问题愈发突出^[4-5]。新型调相机具有动态响应速度快、电压穿越能力强、短时过载能力大以及强大瞬时无功支撑等优势^[6-7]。但是, 同步调相机厂家提供的模型和参数一般与真实情况存在偏差, 且随着设备老化参数等发生变化, 导致无功电压特性分析及优化控制困难^[8-10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177096); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2021QE133)

因此, 精准辨识同步调相机及其励磁系统的参数是迫切需要解决的问题。

同步调相机作为无功设备, 其结构与同步电机相似, 现阶段已开展了各类参数辨识研究。文献[11]对电机离线和在线参数估计进行总结, 讨论参数辨识的发展趋势。文献[12]基于非线性最小二乘法制定了同步发电机参数和动态状态的在线辨识方法, 简化了混合轨迹敏感函数。文献[13]为了优化模型参数失配和一拍延迟对永磁同步电机电流控制性能的影响, 提出一种具有参数在线矫正的鲁棒无差拍预测电流控制方法。文献[14]提出一种结合参数自适应的永磁同步电机电流无差拍控制方法, 以解决无差拍控制在参数失调下的鲁棒性问题。文献[15]采用递推最小二乘法, 提出采用测量电压的多参数在线辨识方法。文献[16]基于考虑极端扰动均值的粒子群对扩展卡尔曼滤波器噪声矩阵和量测噪声矩阵进行优化, 具有较好的收敛速度和鲁棒性。文献[17]提出考虑初始参数优化的混沌变异小生镜粒子群优化算法, 解决了电机多参数辨识困难问题。文献[18]利用基于有效信息迭代的快速粒子群优化算法进行参数辨识, 解决了辨识计算量大、运行时间长的问题。文献[19]针对参数识别秩不足的问题, 采用参数摄动法获取样本数据。

由于同步调相机参数辨识存在多值性问题, 辨识结果的精度通常不够理想。文献[20]基于轨迹灵敏度制定了稳态、暂态参数分步辨识策略, 以降低结果多值性的影响。文献[21]利用轨迹灵敏度选取不同参数辨识精度最高的数据区间, 有效地提高了辨识精度。文献[22]根据轨迹灵敏度和平均灵敏度特征提出了同步发电机参数分步辨识策略, 利用各参数灵敏度最大的扰动场景进行辨识。文献[23]采用轨迹灵敏度矩阵对励磁系统参数可辨识性进行分析, 筛选出不可辨识的参数。文献[24]基于灵敏度分析对同步发电机及其励磁系统参数进行多步辨识, 减少每步参数辨识数量。上述研究利用灵敏度信息, 根据变量间的关联关系来设计辨识策略, 提升了同步调相机及其励磁系统参数辨识结果的精度。但是, 现阶段基于灵敏度信息来辨识同步调相机参数的研究, 大多依据参数与不同扰动间的灵敏度关系, 缺少对待辨识参数量与观察量间耦合特性的分析。

本文提出基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法。分析不同时间尺度下同步调相机无功输出的影响因素, 明确需要辨识的关

键参数。基于轨迹灵敏度对同步调相机及其励磁系统待辨识参数的类型进行划分, 构建关联参数集合。建立同步调相机及其励磁系统参数多时间尺度分类辨识模型, 提出基于改进蛇优化(snake optimization, SO)算法的参数辨识方法。

1 基于灵敏度分析的关联参数集合构建

1.1 同步调相机多时间尺度关键参数分析

同步调相机输出的无功功率 Q 可表示为

$$Q = U_q i_d - U_d i_q \quad (1)$$

式中: U_q 和 U_d 分别为 d 轴和 q 轴的电压分量; i_d 和 i_q 分别为 d 轴和 q 轴的电流分量。

在故障场景下, 同步调相机的无功增量 ΔQ 为

$$\Delta Q = Q - Q_0 = U i_d - U_0 i_{d0} = (U_0 + \Delta U)(i_{d0} + \Delta i_d) - U_0 i_{d0} = U \Delta i_d + \Delta U i_{d0} \quad (2)$$

式中: Q_0 为同步调相机无功功率的初始值; U 为同步调相机当前的电压; U_0 和 ΔU 分别为同步调相机电压的初始值和变化量; i_{d0} 和 Δi_d 分别为同步调相机 d 轴电流的初始值和变化量。

由式(2)可得, 同步调相机无功增量受无功电流影响, 而无功电流变化量与同步调相机参数具有密切联系^[25]。当不考虑励磁系统时, 在次暂态下将从机端看进去的等效系统阻抗作为定子漏抗的一部分, 次暂态下的同步调相机无功电流增量 Δi_d 为

$$\Delta i_d = - \left(\frac{1}{X_d'' + X_k} - \frac{1}{X_d' + X_k} \right) e^{-\frac{t}{T_{ds}}} \Delta U_q - \left(\frac{1}{X_d' + X_k} - \frac{1}{X_d + X_k} \right) e^{-\frac{t}{T_{ds}}} \Delta U_q + \frac{\cos(\omega t + \delta)}{X_d'' + X_k} e^{-\frac{t}{T_{ss}}} \Delta U - \frac{\Delta U_q}{X_d + X_k} \quad (3)$$

式中: X_k 为系统等效电抗; T_{ds}' 为计及系统阻抗的次暂态短路时间常数; T_{ds} 为计及系统阻抗的暂态短路时间常数; T_{ss} 为计及系统阻抗的定子暂态时间常数; X_d 、 X_d' 和 X_d'' 分别为 d 轴电抗、暂态电抗和次暂态电抗; ΔU_q 为 q 轴电压变化量; ω 和 δ 分别为转子角速度和功角。

在故障发生瞬间, 无功电流的增量约为 $-\Delta U/(X_d'' + X_k)$, 因此系统发生故障时同步调相机提供的瞬时无功 ΔQ 为

$$\Delta Q = -\frac{U \Delta U}{X_d'' + X_k} + \Delta U i_{d0} \quad (4)$$

由式(4)可得,故障时同步调相机提供的瞬时无功与参数 X_d'' 密切相关。图1为三相短路故障下两台同步调相机输出的无功电流,故障发生在2000 ms,其中调相机1的 X_d'' 为0.11 p.u.,调相机2的 X_d'' 为0.3 p.u.,其余参数均相同。

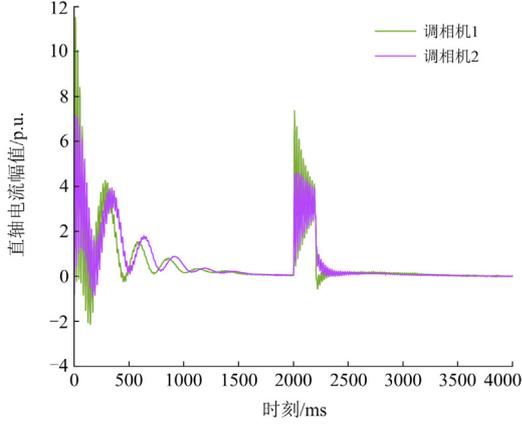


图1 不同 d 轴次暂态电抗下的同步调相机无功电流
Fig. 1 Reactive current of synchronous condenser with different d -axis subtransient reactance

当同步调相机的 q 轴次暂态电抗 X_q'' 变化时,在三相短路故障下不同 X_q'' 参数的两台同步调相机输出的无功电流如图2所示。其中,故障发生在500 ms,调相机1的 X_q'' 为0.243 p.u.,调相机2的 X_q'' 为0.1 p.u.,其余参数均相同。由图2可知, X_q'' 变化对同步调相机的无功输出无明显影响。

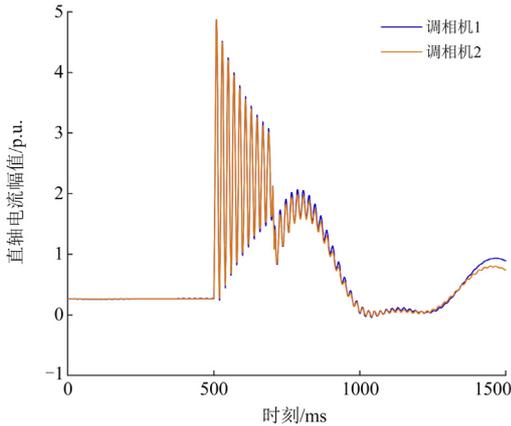


图2 不同 q 轴次暂态电抗下的同步调相机无功电流
Fig. 2 Reactive current of synchronous condenser with different q -axis subtransient reactance

在暂态下,当忽略次暂态参数影响时将定子电压方程及磁链方程进行拉氏变换,可得

$$\begin{cases} U_d = -R_s I_d(s) + s\psi_d(s) - \psi_{d0} - \psi_q(s) \\ U_q = -R_s I_q(s) + s\psi_q(s) - \psi_{q0} + \psi_d(s) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \psi_d(s) = -X_d(s)I_d(s) + \frac{X_{da}I_{f0}}{s} \\ \psi_q(s) = -X_q(s)I_q(s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_s 为定子电阻; X_{da} 为直轴电枢反应电抗; X_q 为 q 轴电抗; ψ_d 和 ψ_q 分别为 d 轴和 q 轴磁链; ψ_{d0} 和 ψ_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴磁链的初始值; I_{f0} 为励磁电流; s 为Laplace算子。

考虑各项初始条件及无阻尼绕组可得, $X_q(s) = X_q$ 。将式(5)和式(6)结合,同时考虑定子电阻 R_s 较小,化简可得

$$\frac{X_{da}I_{f0}}{s} = \left[s^2 + sR_s \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_q} \right) + 1 \right] X_d(s)I_d(s) \quad (7)$$

当不考虑阻尼时, d 轴电抗的倒数为

$$\frac{1}{X_d(s)} = \frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{sT_d'}{sT_d' + 1} \quad (8)$$

式中, T_d' 为暂态 d 轴时间常数。

空载时调相机的机端电压与励磁电动势相等,可得 $X_{da}I_{f0} = U_{q0} = \sqrt{3}E_0$,其中 E_0 为空载电压电动势。

将式(7)和式(8)结合,并进行拉氏反变换,得到频域和时域下的 d 轴电流 $I_d(s)$ 。

$$I_d(s) = \frac{\sqrt{3}E_0}{s \left[s^2 + sR_s \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_q} \right) + 1 \right]} \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{sT_d'}{sT_d' + 1} \right] \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{3}E_0 \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} \right] - \frac{\sqrt{3}E_0}{X_d'} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos t \\ T_a = \frac{2X_d'X_q}{X_d' + X_q} \end{cases} \quad (10)$$

式中, T_a 为电枢时间常数。

由式(10)可得,在 X_d 固定的情况下, X_d' 决定定子电流 i_d 幅值, T_a 决定振荡时间。图3为三相短路故障下两台同步调相机输出的无功电流,图3展示了从故障发生时刻到故障持续1 s时的无功电流变化曲线。其中,调相机1的 X_d' 为0.165 p.u.,调相机2的 X_d' 为0.3 p.u.,其余参数均相同。对比可

得, 调相机 2 在瞬时无功和持续无功上的衰减明显快于调相机 1。在持续无功出力稳定上, 调相机 1 要优于调相机 2。在故障消失后的无功供给上, 调相机 1 无功供给量高于调相机 2。因此, 随着 X'_d 减小, 调相机在后续无功供给上更加稳定且供给量更高。

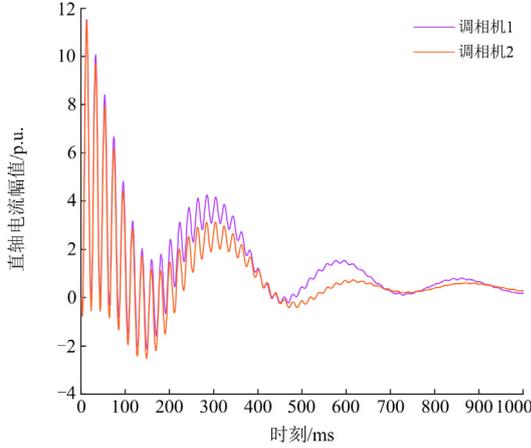


图 3 不同 d 轴暂态电抗下的同步调相机无功电流
Fig. 3 Reactive current of synchronous condenser with different d -axis transient reactance

当参数 X'_q 变化时, 三相短路故障下两台同步调相机输出的无功电流如图 4 所示。其中, 调相机 1 的 X'_q 为 0.265 p.u., 调相机 2 的 X'_q 为 0.4 p.u., 其余参数均相同。由图 4 可知, X'_q 的变化对同步调相机的无功输出无明显影响。

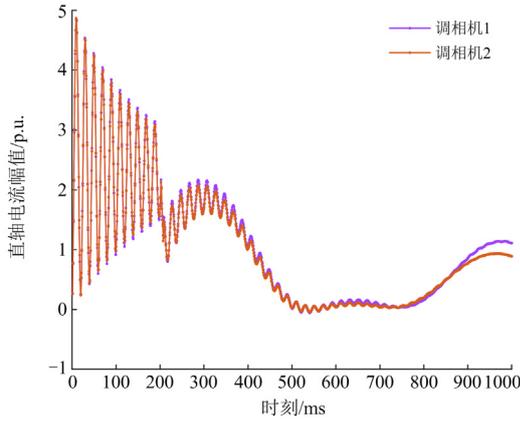


图 4 不同 q 轴暂态电抗下的同步调相机无功电流
Fig. 4 Reactive current of synchronous condenser with different q -axis transient reactance

综上所述, 同步调相机无功输出主要受 d 轴参数影响, 而几乎不受 q 轴参数影响。因此, 在同步调相机的无功电压分析与控制中, 次暂态与暂态参数主要关注 d 轴参数。

1.2 基于轨迹灵敏度的参数类型划分

参数 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的轨迹灵敏度指系统输出变量 y 的变化量与参数 x_i 的变化量间的比值^[22]。

$$\frac{\partial y(x_i, k)}{\partial x} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x_i} \cdot [y(x_i + \Delta x_i, k) - y(x_i, k)] \quad (11)$$

式中: k 为计算时间长度中轨迹灵敏度采样点; Δx_i 为摄动量; $y(\cdot)$ 为摄动量和采样点构成的函数。

同步调相机及其励磁系统参数与机端电压及输出无功的关联性不同。采用灵敏度分析方法将所需辨识参数类型进行划分, 构建关联参数集合。基于灵敏度信息, 可以将待辨识的参数划分为三类——电压型参数、无功型参数和中立型参数, 具体分析步骤如下所述。

1) 根据参数浮动上下限将待分类参数设置为下限值, 其余参数设置为原值。对电压和无功功率的仿真轨迹进行采样, 计算电压和无功功率误差。

$$\begin{cases} E_V = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{t,i} - V'_{t,i})^2} \\ E_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{e,i} - Q'_{e,i})^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_V 和 E_Q 分别为电压和无功功率误差; $V_{t,i}$ 为原值下机端电压采样数据; $Q_{e,i}$ 为原值下调相机无功功率采样数据; $V'_{t,i}$ 为参数变化时机端电压采样数据; $Q'_{e,i}$ 为参数变化时调相机无功功率采样数据; N 为采样点总数。

2) 根据参数变化步长进行下一个步长增量下的仿真, 计算步骤 1) 的电压和无功功率误差, 保存误差, 重复步骤 2), 直至该参数到达其上限。

3) 采用单位步长内数值变化绝对值总和和衡量各参数灵敏度, 明确参数关联类型。

$$\begin{cases} S_{V,i} = \sum_{m=1}^{M-1} |E_{V,i,m+1} - E_{V,i,m}| \\ S_{Q,i} = \sum_{m=1}^{M-1} |E_{Q,i,m+1} - E_{Q,i,m}| \end{cases} \quad (13)$$

式中: $S_{V,i}$ 和 $S_{Q,i}$ 分别为参数 i 电压灵敏度指标和无功灵敏度指标; $E_{V,i,m}$ 为参数 i 在第 m 个参数变化步长下的电压误差; $E_{Q,i,m}$ 为参数 i 在第 m 个参数变化步长下的无功误差; M 为参数变化步长总数。

设定参数灵敏度指标 $S_{V,i}$ 和 $S_{Q,i}$ 偏差阈值 S_T 。当 $S_{V,i}$ 高于 $S_{Q,i}$ 的数值大于 S_T 时, 参数 i 为电压型; 当 $S_{V,i}$ 低于 $S_{Q,i}$ 的数值大于 S_T 时, 参数 i 为无功型;

其余情况下，参数 i 为中立型。

2 同步调相机及其励磁系统参数辨识模型

2.1 同步调相机数学模型

1) 稳态数学模型

利用稳态数据求解同步调相机的稳态参数，包括 d 轴电抗 X_d 和比例系数 K 。

$$\begin{cases} i_{q0} = U_{q0} + X_d i_{d0} \\ i_{d0} = K U_{f0} \end{cases} \quad (14)$$

式中， U_{q0} 和 U_{f0} 分别为初始的 q 轴电压和励磁电压。

2) 暂态数学模型

利用暂态数据求解同步调相机的暂态参数，包括 d 轴暂态电抗 X'_d 、次暂态电抗 X''_d 、暂态时间常数 T'_{d0} 和次暂态时间常数 T''_{d0} 。

$$\begin{cases} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X''_d} (E'_q - E''_q) + E_f \\ T''_{d0} \frac{dE''_q}{dt} = E'_q - E''_q - (X'_d - X''_d) i_d \\ T''_{d0} \frac{dE''_d}{dt} = -E''_d + (X_q - X''_q) i_q \\ E_f = K U_f \\ U_q = E''_q - X''_d i_d \\ U_d = E''_d + X''_q i_q \\ U_t = \sqrt{U_q^2 + U_d^2} \\ Q_c = U_q i_d - U_d i_q \end{cases} \quad (15)$$

式中： E'_q 和 E''_q 分别为 q 轴的暂态和次暂态电动势； T''_{d0} 为 q 轴次暂态时间常数； E''_d 为 d 轴次暂态电动势； E_f 为励磁电动势； U_f 为励磁电压； U_t 和 Q_c 分别为机端电压和无功功率的输出量。

2.2 励磁系统数学模型

励磁系统向电机提供励磁电流，具有调节机端电压的作用，其结构如图 5 所示。

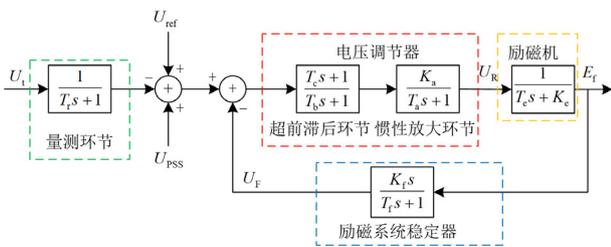


图 5 励磁系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of excitation system

图中： K_a 和 T_a 分别为电压调节器的放大倍数和时间常数； K_c 和 T_c 分别为励磁绕组传递函数的放大倍数和时间常数； K_f 和 T_f 分别为负反馈环节的放大倍数和时间常数； U_R 为电压调节器的输出电压； U_F 为励磁负反馈电压； U_{ref} 为励磁系统的参考电压； U_{PSS} 为励磁附加控制信号。

由图 5 可得，量测环节表示惯性环节，电压调节器由超前滞后环节和惯性放大环节构成，由于 T_r 、 T_b 和 T_c 的数值相对较小，可以忽略^[25]。因此，励磁系统需要辨识的参数为 K_a 、 T_a 、 K_c 、 T_c 、 K_f 和 T_f ，简化后的励磁系统如图 6 所示。

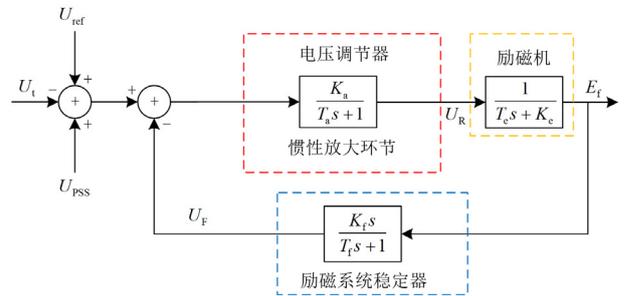


图 6 励磁系统简化框图

Fig. 6 Block diagram of simplified excitation system

励磁系统的输出量为励磁电动势 E_f ，输入量为机端电压 U_t 、参考电压 U_{ref} 和励磁附加控制信号 U_{PSS} 。因此，基于图 6 可得励磁系统表达式。

$$\begin{cases} T_a \frac{dU_R}{dt} = K_a (U_{ref} - U_t + U_{PSS} - U_F) - U_R \\ T_c \frac{dE_f}{dt} = U_R - K_c E_f \\ T_f \frac{dU_F}{dt} = \frac{K_f}{T_c} (U_R - K_c E_f) - U_F \end{cases} \quad (16)$$

2.3 多时间尺度参数辨识模型

1) 稳态参数辨识模型

同步调相机稳态参数辨识以稳态数据为输入，以稳态参数为待求量。

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}(\mathbf{X}_w, \mathbf{I}_w) \quad (17)$$

式中： \mathbf{X}_w 为待辨识稳态参数 X_d 和 K 组成的向量； \mathbf{I}_w 为稳态参数辨识所需数据构成的向量； $\mathbf{h}(\cdot)$ 为式 (14) 中的方程。

2) 暂态参数辨识模型

电压型参数的辨识模型以电压估计值与真实值间差值最小为目标函数。

$$\begin{cases} \min \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{t,i} - V_{t_est,i})^2} \\ \frac{dx}{dt} = f(x, X_V, I_Z) \\ \mathbf{0} = g(x, X_V, I_Z) \end{cases} \quad (18)$$

式中: \mathbf{x} 为式(15)和式(16)中状态变量组成的向量; X_V 为式(15)和式(16)中待辨识电压型参数组成的向量; I_Z 为参数辨识所需暂态数据构成的向量; $f(\cdot)$ 为式(15)和式(16)中的微分方程; $g(\cdot)$ 为式(15)中的代数方程; $V_{t_est,i}$ 为参数辨识时机端电压的估计值。

无功型参数的辨识模型以无功估计值与真实值间的差值最小为目标, 可表示为

$$\begin{cases} \min \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{e,i} - Q_{e_est,i})^2} \\ \frac{dx}{dt} = f(x, X_Q, I_Z) \\ \mathbf{0} = g(x, X_Q, I_Z) \end{cases} \quad (19)$$

式中: X_Q 为式(15)和式(16)中待辨识无功型参数组成的向量; $Q_{e_est,i}$ 为输出无功估计值。

中立型参数的辨识模型以电压差值与无功差值之和最小为目标, 可表示为

$$\begin{cases} \min \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{t,i} - V_{t_est,i})^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{e,i} - Q_{e_est,i})^2} \right] \\ \frac{dx}{dt} = f(x, X_N, I_Z) \\ \mathbf{0} = g(x, X_N, I_Z) \end{cases} \quad (20)$$

式中, X_N 为式(15)和式(16)中待辨识中立型参数组成的向量。

3 基于改进 SO 算法的参数辨识求解方法

3.1 关联参数集辨识求解方法

基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统的参数分类辨识方法如图 7 所示。其中, 基于灵敏度分析的关联参数集构建部分对影响同步调相机无功输出的关键参数进行剖析, 筛选出无需辨识参数。同步调相机及其励磁系统参数辨识模型部分, 基于参数分类结果分别构建电压、无功及中立型参数辨识模型。基于 Tent 混沌映射的改进 SO 算法作为参数辨识计算方法。

由图 7 可得, 本文提出的关联参数集辨识求解方法的具体步骤如下:

1) 稳态参数识别, 利用扰动后稳态数据辨识同步调相机 d 轴稳态参数, q 轴参数采用原值参与计算;

2) 电压型参数辨识, 电压型参数设置为优化算法决策变量, 无功型参数和中性型参数基于参数范围均值初始化, 对式(18)进行电压型参数辨识计算;

3) 无功型参数辨识, 此阶段无功型参数设置为优化算法决策变量, 电压型参数设置为步骤 2) 中的辨识结果, 中性型参数初始化为取值范围的均值, 对式(19)进行无功型参数辨识计算;

4) 根据步骤 2) 和步骤 3) 的辨识结果限制电压型参数和无功型参数的搜索范围, 此阶段电压型参数和无功型参数均被设置为优化算法决策变量, 中性型参数设置为参数范围均值, 优化目标为式(20)所示的目标函数;

5) 中立型参数辨识, 中立型参数设置为优化算法决策变量, 电压型参数和无功型参数采用步骤 4) 中的辨识结果, 对式(20)进行参数辨识计算, 辨识中立型参数, 至此完成所有参数辨识。

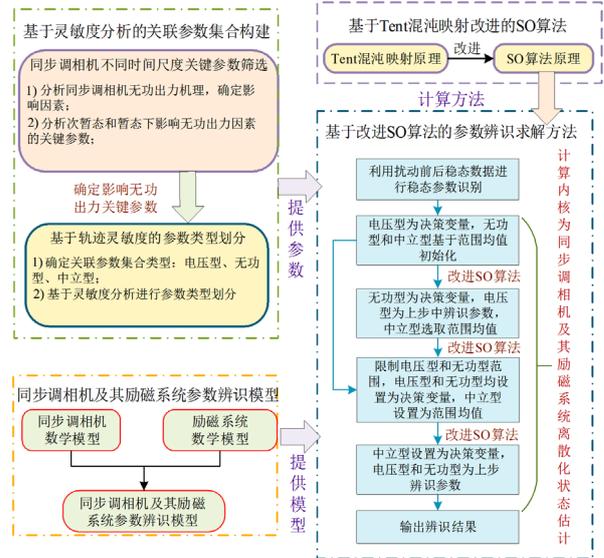


图 7 基于灵敏度分析的参数辨识方法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of parameter classification and identification method based on sensitivity analysis

为精确衡量所提参数辨识方法的优越性, 现定义参数辨识精度以提高比例指标 I_E 。

$$I_E = \frac{E_{r,o} - E_{r,n}}{E_{r,o}} \quad (21)$$

式中, $E_{r,n}$ 和 $E_{r,o}$ 分别为本文所提方法和对比方法的参数辨识误差。

3.2 基于 Tent 混沌映射的改进 SO 算法

3.2.1 SO 算法优化计算的基本原理

SO 算法在全局搜索能力和计算收敛速度方面具有较好的性能^[26], 其种群初始化可表示为

$$X_j = (X_{\max} - X_{\min}) \cdot r + X_{\min} \quad (22)$$

式中: X_j 为第 j 只种群个体; r 为 0~1 之间的随机数; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为取值范围的上、下边界。

SO 算法模拟蛇群生存繁衍的过程, 在种群初始化后, 须将种群均分为雄性和雌性两个子种群, 搜索过程包含勘探和开发两个阶段。其中, 勘探阶段是在食物不足的情况下, 蛇通过选择随机位置搜索食物, 更新蛇的位置。

$$X_{i,j}(t+1) = X_{r,j}(t) \pm c_1 A_j [(X_{\max} - X_{\min}) \cdot r + X_{\min}] \quad (23)$$

$$A_j = \exp\left(-\frac{f_{r,j}}{f_{i,j}}\right) \quad (24)$$

式中: $X_{i,j}(t+1)$ 为第 i 只性别为 j 的蛇在 $t+1$ 次迭代时的位置; $X_{r,j}$ 为随机选择的性别为 j 的蛇在 t 次迭代时的位置; A_j 为性别为 j 的蛇的捕食能力; $f_{i,j}$ 为第 i 只性别为 j 的蛇对应的适应度; $f_{r,j}$ 为蛇随机选择的性别为 j 的蛇对应的适应度; c_1 为常数。

开发阶段是在食物充足的情况下, 以温度条件为依据划分蛇的行为模式。当环境温度 T 大于或等于阈值时, 蛇只会寻找食物, 进行位置更新。

$$\begin{cases} X_{i,j}(t+1) = X_f \pm c_2 \cdot T \cdot r [X_f - X_{i,j}(t)] \\ T = \exp\left(-\frac{t}{N_m}\right) \end{cases} \quad (25)$$

式中: X_f 为最佳个体的位置; c_2 为常数; N_m 为最大迭代次数。

当环境温度 T 小于阈值时, 蛇处于战斗或交配模式。在战斗模式下, 蛇种群的行为可表示为

$$\begin{cases} X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + c_2 \cdot F_j [Q \cdot X_{b,j} - X_{i,j}(t)] \\ F_j = \exp\left(-\frac{f_{b,j}}{f_i}\right), Q = c_3 \cdot \exp\left(\frac{t - N_m}{N_m}\right) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $X_{b,j}$ 为性别为 j 的蛇群体中的最佳位置; $f_{b,j}$ 为性别为 j 的蛇群体中的最佳适应度; f_i 为第 i 只蛇对应的适应度; c_3 为常数; Q 为食物数量。

在交配模式下, 蛇种群的行为可表示为

$$\begin{cases} X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + c_2 \cdot M_j \cdot r \cdot [Q \cdot X_{i,j}(t) - X_{i,j}(t)] \\ M_m = \exp\left(-\frac{f_{i,f}}{f_{i,m}}\right) \\ M_f = \exp\left(-\frac{f_{i,m}}{f_{i,f}}\right) \end{cases} \quad (27)$$

式中: M_m 和 M_f 分别为雄蛇和雌蛇的交配能力; M_j 为性别为 j 的蛇的交配能力; $f_{i,f}$ 和 $f_{i,m}$ 分别为第 i 只雄蛇和雌蛇对应的适应度。

3.2.2 基于 Tent 混沌映射的初始解生成

Tent 混沌映射能够为基于迭代求解的优化算法提供多样性的初始解, 增强其寻优能力, 加速收敛过程^[27-28]。Tent 混沌映射的基本原理可表示为

$$Z(t+1) = \begin{cases} \frac{Z(t)}{u}, & 0 \leq Z(t) \leq u \\ \frac{1-Z(t)}{1-u}, & u < Z(t) \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $Z(t+1)$ 和 $Z(t)$ 分别为第 $t+1$ 和 t 次迭代时的映射值; μ 为混沌参数。

因此, 基于 Tent 混沌映射的改进 SO 算法如图 8 所示。

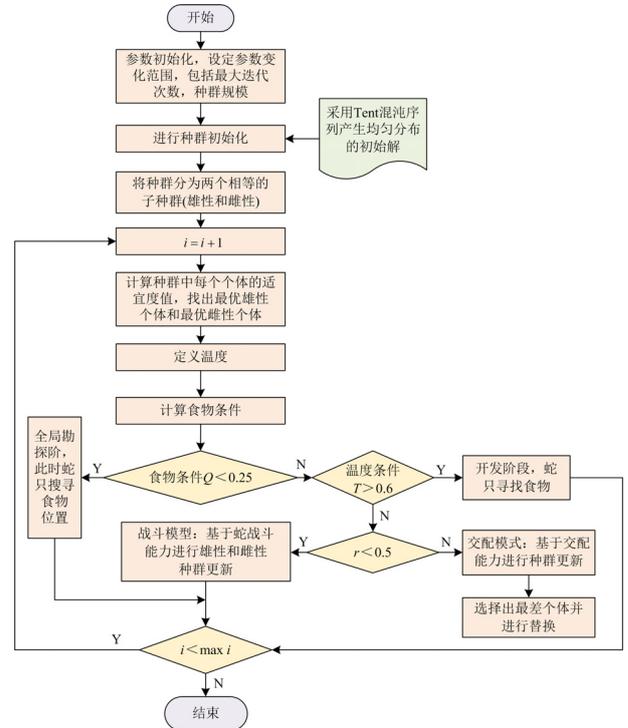


图 8 基于 Tent 混沌映射的改进 SO 算法流程
Fig. 8 Flowchart of improved SO algorithm based on Tent chaotic mapping

SO 算法初始化种群依据变量范围随机生成, 具有较大随机性和不确定性。利用 Tent 混沌映射生成的数值序列对 SO 算法的种群进行初始化, 使得初始解尽可能地均匀分布在解空间。其中, 在蛇种群初始化阶段, 蛇种群的初始位置序列 $X_{i,j}$ 为

$$X_{i,j} = (X_{\max} - X_{\min}) \cdot Z(j) + X_{\min} \quad (29)$$

式中, $Z(j)$ 为性别为 j 的蛇群体的映射值。

4 算例分析

4.1 仿真模型参数

某工程采用的新型分布式调相机及其励磁系统的参数如表 1 所示。在 Matlab/Simulink 中进行模型仿真, 仿真时间设置为 10 s, 设置 5 s 时发生三相短路且持续 0.2 s, 采样时间间隔为 0.05 s。

表 1 同步调相机及其励磁系统参数设置

Table 1 Parameter setting of synchronous condenser and its excitation system

参数	数值	参数	数值
X_d	1.305	X_1	0.18
X'_d	0.296	T'_d	7.01
X''_d	0.252	T''_d	0.053
X_q	1.300	T'_{q0}	0.1
X''_q	0.243	R_s	0.002 854
T_r	0.002	K_f	0.2
K_a	300	T_f	0.1
T_a	0.3	E_{fmin}	-11.5
K_c	1	E_{fmax}	11.5
T_c	0.3	K_p	0
T_b	0	V_{10}	1
T_c	0	V_{f0}	1.29

4.2 基于灵敏度分析的参数类型划分

对所需辨识的参数进行灵敏度分析, 以划分参数类型, 参数设置范围, 如表 2^[18]所示。

表 2 辨识参数设置范围

Table 2 Range setting of identified parameter

参数	范围	参数	范围
X'_d	0.11~0.4	T_a	0.0005~0.5
X''_d	0.11~0.3	K_f	0.0005~0.3
T'_{d0}	6~8	T_f	0.04~1.5
T''_{d0}	0.001~0.08	K_c	0.1~1
K_a	25~400	T_c	0.1~1

由于待辨识参数范围不同, 每个参数需设置相对应的步长进行灵敏度分析。同步调相机次暂态和暂态参数及其励磁系统参数被划分为无功型、中立

型和电压型, 以 X'_d 、 T'_{d0} 和 K_a 为例, 随着相应参数的变化, 误差变化趋势如图 9—图 11 所示。

由图 9 可得, X'_d 随着参数值的变化, 其无功误差变化程度明显大于电压误差, 当 X'_d 变化至设定值 0.296 时, 误差变为 0。由图 10 和图 11 可得, K_a 随着参数的变化, 其电压误差变化程度大于无功误差变化程度, 而参数 T'_{d0} 随着其数值变化, 电压误差和无功误差变化程度大致相同, 当参数 K_a 和 T'_{d0} 的数值变化至其设定值时, 误差均变为 0。经统计, 参数电压和无功灵敏度指标如表 3 所示。

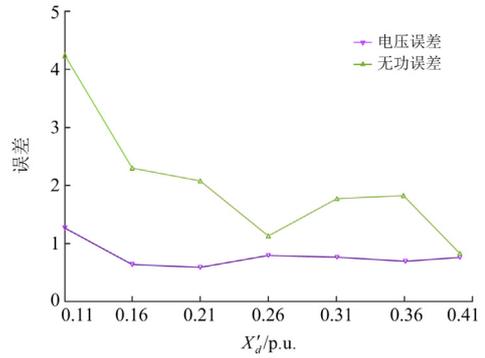


图 9 参数 X'_d 无功电压误差变化

Fig. 9 Error change of reactive power and voltage of X'_d

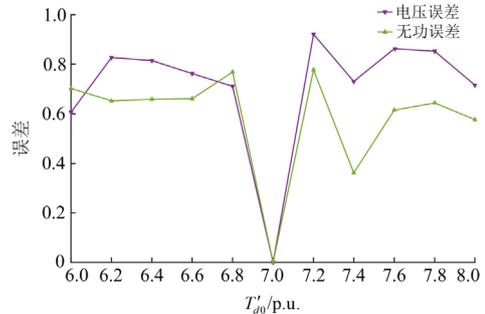


图 10 参数 T'_{d0} 无功电压误差变化

Fig. 10 Error change of reactive power and voltage of T'_{d0}

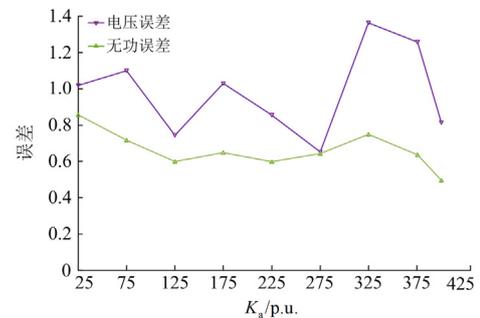


图 11 参数 K_a 无功电压误差变化

Fig. 11 Error change of reactive power and voltage of K_a

表 3 暂态辨识参数电压和无功灵敏度

Table 3 Sensitivity of voltage and reactive power with transient identified parameter

参数	电压灵敏度	无功灵敏度	参数	电压灵敏度	无功灵敏度
X'_d	2.6044	7.0363	T_a	2.0662	2.4714
X''_d	3.7357	3.5789	K_f	2.6348	3.0097
T'_{d0}	2.4388	2.4798	T_f	4.4414	3.1904
T''_{d0}	3.3031	1.7630	K_c	2.5640	1.3667
K_a	3.6715	2.0412	T_c	3.2497	1.6479

划分电压和无功类型的灵敏度指标偏差阈值设定为 0.1，如表 3 所示，参数 X'_d 无功灵敏度指标较电压型指标高出 4.4319，因此参数 X'_d 为无功型参数。同理，参数 K_a 为电压型参数，参数 T'_{d0} 的无功灵敏度指标与电压灵敏度指标仅相差 0.041，参数 T'_{d0} 为中立型参数。同步调相机及其励磁系统待辨识参数类型如表 4 所示。

表 4 同步调相机及其励磁系统待辨识参数类型

Table 4 Type of identified parameters of synchronous condenser and its excitation system

参数	类型	参数	类型
X'_d	无功型	T_a	无功型
X''_d	电压型	K_f	无功型
T'_{d0}	中立型	T_f	电压型
T''_{d0}	电压型	K_c	电压型
K_a	电压型	T_c	电压型

4.3 分类辨识方法优越性验证

为体现本文制定分类辨识方法优越性，将方法 1 设置为不划分参数类型且全部进行参数辨识，结果如表 5 和表 6 所示。

稳态情况下，两种辨识方法采用相同计算方法，此时辨识精度受仿真输入信号误差及数学模型误差影响，辨识误差最大为 0.667%，在可接受范围内。表 6 为两种辨识方法下的辨识误差对比，总体上进行分类参数辨识误差小于不分类辨识误差，对于个别参数(如 T_f 和 K_f)，由于参数本身数值较小，受辨识算法参数搜索精度限制，误差百分数较不分类辨识大，但数值差值在可接受范围。

表 5 稳态参数辨识结果

Table 5 Identification result of steady-state parameter

参数	真值	辨识结果	误差/%
X_d	1.305	1.3137	0.667
K	0.998	1.0012	0.321

表 6 不同策略辨识结果对比

Table 6 Comparison of identification errors of different strategies

类型	参数	真值	方法 1	误差/%	所提方法	误差/%
电压型	X''_d	0.252	0.263	0.595	0.2522	0.079
	T''_{d0}	0.053	0.064	5.660	0.0534	0.755
	K_a	300	293.87	2.040	296.73	1.090
	T_f	0.1	0.0901	3.900	0.1078	7.800
	K_c	1	0.9001	9.990	1.0304	3.040
	T_c	0.3	0.2782	7.267	0.3195	6.500
无功型	X'_d	0.296	0.306	3.378	0.2902	1.959
	T_a	0.3	0.3151	5.033	0.3005	0.167
	K_f	0.2	0.2043	2.15	0.1955	2.25
中立型	T'_{d0}	7.01	6.0134	14.21	6.8904	1.706

为精准衡量本文所提辨识方法的优越性，借助参数辨识精度提高比例指标进行分析，与方法 1 相比，本文方法的各参数提升效果明显，如表 7 所示。

由表 7 可得，与方法 1 相比，除参数 T_f 和 K_f 外，剩余参数辨识精度均得到提高，其中参数 T_a 提升效果最优，整体参数辨识平均精度提高了 42.23%，侧面证明本文方法的优越性。

表 7 本文所提方法的参数辨识精度提高比例

Table 7 Proportion of parameter identification accuracy improvement of proposed method

参数	精度提高指标	参数	精度提高指标
X'_d	0.420	T_a	0.967
X''_d	0.867	K_f	-0.047
T'_{d0}	0.880	T_f	-1.000
T''_{d0}	0.867	K_c	0.696
K_a	0.467	T_c	0.106

4.4 辨识精度影响因素

4.4.1 不同算法的影响

采用 Tent 混沌映射将 SO 算法初始化阶段进行改进，改善生成初始序列分布的均匀性，降低算法陷入局部解可能性，增强算法搜索性能。图 12 为采用 SO 算法改进前后的辨识误差。

由图 12 可得，与 SO 算法相比，改进 SO 算法计算得到的辨识精度均得到提高，证明经过 Tent 混沌映射改进后，降低了算法陷入局部最优的风险、扩大了搜索范围、提升了辨识精度。

4.4.2 采样时间间隔的影响

采样时间间隔决定了采样点的个数，进而影响参数辨识精度。选取信号采样时间间隔为 0.01 s、0.02 s、0.05 s、0.1 s 和 0.5 s 进行对比，如表 8 所示。

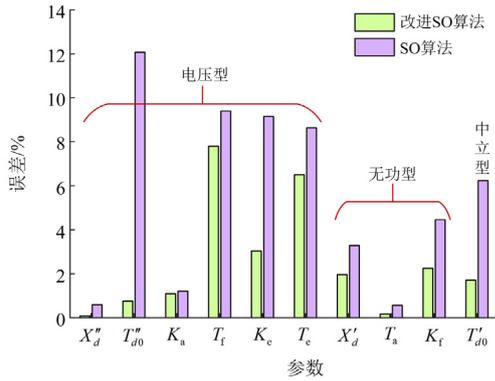


图 12 SO 算法改进前后的辨识误差对比

Fig. 12 Comparison of identification errors between improved SO algorithm and the SO algorithm

表 8 不同采样时间间隔的参数辨识误差对比

Table 8 Comparison of identification errors with different sampling time intervals

采样时间间隔/s	辨识误差/%					
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.5	
电压型 参数	X_d''	0.0398	0.0513	0.079	0.131	0.549
	T_{d0}''	0.241	0.349	0.755	1.213	2.447
	K_a	0.513	0.681	1.090	1.527	1.667
	T_f	5.476	5.983	7.800	8.442	8.563
	K_c	2.081	2.538	3.040	3.579	4.334
	T_e	5.291	5.733	6.500	8.667	10.784
无功型 参数	X_d'	0.885	1.039	1.959	3.516	4.270
	T_a	0.167	0.168	0.167	0.243	0.523
	K_f	1.889	2.013	2.250	2.344	2.400
中立型 参数	T_{d0}'	1.503	1.567	1.706	1.875	2.408

由表 8 可得, 随着采样时间间隔的减小, 在暂态时段内获得采样点的数量增加, 状态估计效果更好; 随着采样时间间隔的增加, 参数辨识误差也会增加, 而采样时间间隔的减小将极大增加参数辨识的计算量、降低辨识效率和增大辨识难度。因此, 选取合适的采样间隔有利于保障参数辨识的精度, 经上述分析, 本文权衡参数辨识结果的精度和计算量, 将采样时间间隔设定为 0.05 s。

4.4.3 不同数据的影响

为了克服采用一组工程数据带来的局限性, 设置了 3 种扰动场景进行分析。场景一: 在 5 s 时发生三相短路故障, 共持续 0.2 s; 场景二: 在 5 s 时发生切机扰动; 场景三: 在 5 s 时发生励磁信号阶跃扰动, 扰动量为 0.3 p.u.。3 组数据的采样时间间隔均为 0.05 s, 参数辨识结果如图 13 所示。

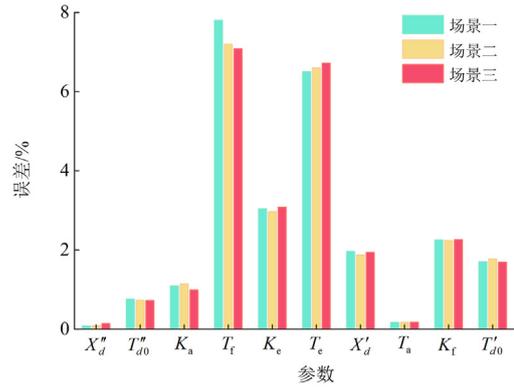


图 13 多组数据下的参数辨识误差

Fig. 13 Parameter identification errors of different data sets

由图 13 可得, 在不同扰动场景下, 所提方法的暂态参数辨识结果的误差大致相同, 可见本文所提方法能够适应不同数据场景, 具有较好的鲁棒性。

5 结论

基于灵敏度信息构建关联参数集合, 提出同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法。采用基于 Tent 混沌映射的改进 SO 算法进行参数辨识计算。主要结论如下:

- 1) 从无功电压角度划分参数类型, 减少每步待辨识参数的数量, 提升了计算结果的精度, 整体参数辨识平均精度提高了 42.23%;
- 2) 采用 Tent 混沌映射的改善 SO 算法初始化序列的均匀性, 增强了算法搜索能力, 与原始算法相比, 提高了参数辨识的计算精度;
- 3) 采样间隔作为辨识精度的重要影响因素, 因此合适的采样间隔能够保障计算结果的精度。

为进一步分析同步调相机参数辨识影响因素, 后续将研究不同工况及饱和特性对参数辨识的影响。

参考文献

[1] 曹永吉, 张恒旭, 施啸寒, 等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 1-8.

[2] 索之闻, 李晖, 张锋, 等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 133-141.

- SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 133-141.
- [3] 张恒旭, 曹永吉, 张怡, 等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 42-52.
- ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 42-52.
- [4] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 90-95.
- CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 90-95.
- [5] 曹永吉, 张恒旭, 张怡, 等. 基于事件驱动的机组快速频率响应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 148-154.
- CAO Yongji, ZHANG Hengxu, ZHANG Yi, et al. Event-driven fast frequency response control method for generator unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 148-154.
- [6] 孙巍峰, 崔晨, 周晓风, 等. 调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 182-187.
- SUN Weifeng, CUI Chen, ZHOU Xiaofeng, et al. Coordinated control strategy for synchronous condenser and AC filter in UHVDC converter station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 182-187.
- [7] RQFAQ M S, JUNG J W. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(7): 4747-4758.
- [8] 杨松浩, 李秉芳, 赵天骐, 等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(3): 12-18.
- YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(3): 12-18.
- [9] 周宁, 孟倩戎, 张宇博, 等. 直流受端系统同步调相机容量自动优化配置方法[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(12): 86-94.
- ZHOU Ning, MENG Qianrong, ZHANG Yubo, et al. An automatic capacity optimization method of the synchronous condenser for the DC receiving-end system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(12): 86-94.
- [10] 赵天骐, 李秉芳, 杨松浩, 等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角稳定性影响因素分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(16): 114-122.
- ZHAO Tianqi, LI Bingfang, YANG Songhao, et al. Analysis of influence factors for transient rotor-angle stability of distributed synchronous condensers in renewable energy stations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(16): 114-122.
- [11] ZIMMER V, DECKER I C, E SILVA A S. A robust approach for the identification of synchronous machine parameters and dynamic states based on PMU data[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 165: 167-178.
- [12] 吴春, 赵宇纬, 孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(13): 4329-4340.
- WU Chun, ZHAO Yuwei, SUN Mingxuan. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(13): 4329-4340.
- [13] 龙丹, 唐润忠, 吴公平, 等. 考虑参数失配的PMSM鲁棒无差拍预测电流控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 113-122, 168.
- LONG Dan, TANG Runzhong, WU Gongping, et al. Robust deadbeat predictive current control for PMSM considering parameter mismatch[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 113-122, 168.
- [14] 舒朝君, 柳林志. 基于参数自适应的永磁同步电机无差拍预测电流控制[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(4): 175-184.
- SHU Chaojun, LIU Linzhi. Parameter-adaptive dead-beat predictive current control of permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(4): 175-184.
- [15] XIAO Qianghui, LIAO Kaixian, SHI Chuandong, et al. Parameter identification of direct-drive permanent magnet synchronous generator based on EDMPSO-EKF[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(5).
- [16] 刘细平, 胡卫平, 丁卫中, 等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(6): 1198-1207.

- LIU Xiping, HU Weiping, DING Weizhong, et al. Research on multi-parameter identification method of permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1198-1207.
- [17] 李婕, 杨淑英, 谢震, 等. 基于有效信息迭代快速粒子群优化算法的永磁同步电机参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4604-4613.
- LI Jie, YANG Shuying, XIE Zhen, et al. Online parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on fast particle swarm optimization algorithm with effective information iterated[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4604-4613.
- [18] WANG Zitan, CHAI Jianyun, XIANG Xuewei, et al. A novel online parameter identification algorithm designed for deadbeat current control of the permanent-magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58(2): 2029-2041.
- [19] 王继豪, 王安东, 孙福春, 等. 基于交替迭代优化的同步调相机电气参数分步辨识方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 99-105.
- WANG Jihao, WANG Andong, SUN Fuchun, et al. A step-by-step identification method of synchronous condenser electrical parameters based on alternative iterative optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 99-105.
- [20] 张伟骏, 陈文龙, 黄霆, 等. 基于轨迹灵敏度的同步发电机参数辨识[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 102-109.
- ZHANG Weijun, CHEN Wenlong, HUANG Ting, et al. Parameter identification method of synchronous generator based on trajectory sensitivity[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 102-109.
- [21] 韩睿, 郑竟宏, 朱守真, 等. 基于灵敏度分析的同步发电机参数分步辨识策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 74-80.
- HAN Rui, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, et al. Step identification of synchronous generator parameters based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 74-80.
- [22] 刘兴杰, 闫亮. 基于轨迹灵敏度的励磁系统参数可辨识性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 209-214.
- LIU Xingjie, YAN Liang. Parameter identifiability analysis of excitation system based on trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 209-214.
- [23] ZAKER B, GHAREHPETIAN G B, KARRARI M, et al. Simultaneous parameter identification of synchronous generator and excitation system using online measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1230-1238.
- [24] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
- LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 15-22.
- [25] 沈峰, 贺仁睦, 谢永红. 基于实测扰动的励磁系统参数辨识可行性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 69-73.
- SHEN Feng, HE Renmu, XIE Yonghong. Study on feasibility of excitation system parameter identification based on actual measurement of disturbance[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 69-73.
- [26] HASHIM F A, HUSSIEN A G. Snake optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 242.
- [27] 邹红波, 柴延辉, 杨钦贺, 等. 基于混合 ISSA-LSTM 的锂离子电池剩余使用寿命预测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 21-31.
- ZOU Hongbo, CHAI Yanhui, YANG Qinhe, et al. Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on hybrid ISSA-LSTM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 21-31.
- [28] 周晓华, 冯雨辰, 陈磊, 等. 改进秃鹰搜索算法优化 SVM 的变压器故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 118-126.
- ZHOU Xiaohua, FENG Yuchen, CHEN Lei, et al. Transformer fault diagnosis based on SVM optimized by the improved bald eagle search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 118-126.

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-11-09

作者简介:

马睿聪(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为新型电力系统稳定分析与控制; E-mail: 202114573@mail.sdu.edu.cn

邹世豪(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为发电机参数辨识及电力系统稳定分析与控制; E-mail: zsh990424@126.com

曹永吉(1992—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、可再生能源并网及储能技术。E-mail: yongji@sdu.edu.cn

(编辑 姜新丽)