

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240869

基于改进粒子群算法的 MMC-STATCOM 参数仿射辨识方法

黄耀宣¹, 程杉¹, 黄永章², 徐恒山³, 杜鹏飞⁴

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001; 4. 国网许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 参数辨识效果会强关联于耦合误差, 同时参数的耦合误差又呈现出高复杂性特征, 但传统粒子群算法难以高效利用耦合误差扩充算法搜索范围。提出一种基于改进粒子群算法的模块化多电平静止同步补偿器参数仿射辨识方法。首先, 建立模块化多电平静止同步补偿器(modular multilevel converter static synchronous compensator, MMC-STATCOM)的数学模型, 确定待辨识参数。其次, 提出一种基于仿射算法的参数辨识方法, 将参数辨识问题转化为参数与耦合误差联合辨识问题。在此基础上, 采用熵权法综合考虑区间满足度和区间误差对辨识效果的影响, 结合改进粒子群算法实现模块化多电平静止同步补偿器的参数与耦合误差的解耦辨识。仿真结果证明, 参数和耦合误差的辨识误差分别在 1.06%和 2.95%以内。

关键词: 静止同步补偿器; 模块化多电平变换器; 改进粒子群算法; 仿射算法; 熵权法; 参数辨识

MMC-STATCOM affine parameter identification method based on improved particle swarm optimization

HUANG Yaoyuan¹, CHENG Shan¹, HUANG Yongzhang², XU Hengshan³, DU Pengfei⁴

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 4. State Grid Xuchang Electric Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: The effectiveness of parameter identification is strongly related to coupling errors, which exhibit highly complexity characteristics. However, traditional particle swarm optimization (PSO) algorithms are difficult to efficiently utilize the coupling errors to expand their search range. This paper proposes an affine parameter identification method for modular multilevel converter static synchronous compensator (MMC-STATCOM) based on an improved PSO. First, the mathematical model of the MMC-STATCOM is established to determine the parameters to be identified. Next, an affine-based parameter identification method is proposed to transform the parameter identification problem into a joint identification problem of parameters and coupling errors. Building on this, the entropy weight method is adopted to comprehensively consider the influence of interval satisfaction and interval errors on the identification results. The improved PSO is then used to realize decoupling identification of the parameters and coupling errors for the MMC-STATCOM. Simulation results prove that the identification errors of parameters and coupling errors are within 1.06% and 2.95%, respectively.

This work is supported by Ningxia Natural Science Foundation (No. 2023AAC03857).

Key words: static synchronous compensator; modular multilevel converter; improved particle swarm optimization; affine algorithm; entropy weight method; parameter identification

0 引言

近年来,随着大功率电力电子设备的广泛应用,

基金项目: 宁夏自然科学基金项目资助(2023AAC03857); 新能源电力系统国家重点实验室 2024 年开放课题项目资助(LAPS24006)

电网中的电能质量问题日益严重。静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)作为一种能显著改善电力系统电能质量并提高电力系统稳定性的电气设备,深受现代电力系统青睐,其中模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)结构的 STATCOM 是现阶段电网的主流选择。研究接入 STATCOM 对电网的影响,必须获取

准确的 STATCOM 模型结构与控制参数。因此, 研究有效的参数辨识方法具有重要的实际意义。

20 世纪 70 年代末, 世界上出现了首台静止同步发电机^[1], 以此为基础, 之后的 STATCOM 结构不断改进, 2012 年文献[2]将 MMC 拓扑结构应用到 STATCOM 中, 实现无功和负序电流高效补偿的同时, 获得了模块化拓展特性。文献[3]提出了一种改进型 MMC-STATCOM 拓扑, 基于等效模型的上层控制和子模块的下层控制实现分层控制。文献[4]在文献[3]的基础上提出了基于直接功率控制的功率解耦控制方法。文献[5]提出了基于直流功率控制的滑模变结构控制, 获得了相较于传统 PI 控制更好的系统稳定性。虽然对 MMC-STATCOM 模型的研究较多, 但如何获取模型准确控制参数的辨识研究还较少。常用的参数辨识方法有递推最小二乘法、模型参数自适应法和人工智能算法等^[6-9]。文献[10]提出了基于多层粗细网格搜索的 SVG 动态模型参数辨识方法, 提高了参数辨识效率, 但忽略了参数辨识误差对整体辨识效果的影响。文献[11]提出了基于改进鸡群算法的 SVC 参数逐步辨识方法, 根据灵敏度实现参数分步辨识, 虽提高了参数的整体辨识精度, 但辨识误差仍需个别参数承担。文献[12-13]都提出了筛选主导参数作为分步辨识依据, 但筛选过程较主观, 忽略了筛选过程对辨识结果的影响。

上述研究考虑到参数耦合关系对辨识精度的影响, 并通过参数筛选和分步辨识降低参数耦合程度^[14], 但均未考虑非辨识参数辨识误差对整体辨识精度的影响^[15], 所以如何解决因参数之间的辨识误差耦合而导致的辨识精度低的问题, 是目前亟需解决的重要问题^[16-17]。区间算法能通过少量的边界信息表述完整的变量信息^[18-21], 而仿射算法作为区间算法的拓展, 进一步考虑了不同变量之间波动范围的耦合关系, 跟踪其在控制环节的传递过程, 提高了辨识准确性^[22]。文献[23]提出了一种自适应仿射参数辨识算法, 实现了参数解耦辨识, 但没有探究算法性能, 难以实现高效辨识。文献[24]提出了基于改进仿射粒子群算法的模型参数区间估计方法, 在弥补区间算法容易过估计的基础上, 提高了算法在高维多峰函数中的辨识效率, 但没有综合考虑辨识结果的完备性和准确性, 所得结果较保守。

针对以上研究存在的问题, 本文在建立了基于双闭环控制的 MMC-STATCOM 模型的基础上, 仿射化控制参数, 并提出一种基于可信度的三黑洞系统粒子捕获策略的粒子群算法 (particle swarm optimization with reliability based three black hole system capture strategy, PSO-TCS) 对仿射参数进行辨识, 然

后针对辨识结果完备性与准确性不平衡的问题, 引入区间满足度作为评判指标, 提出一种采用熵权法综合考虑辨识区间满足度与辨识误差的辨识方法, 最后利用我国西北某场站 MMC-STATCOM 并网仿真系统验证本文所提方法的有效性和准确性。

1 MMC-STATCOM 的数学模型

1.1 MMC 子模块平衡控制

MMC-STATCOM 稳定运行的基础是子模块电容能量的平衡控制。理想情况下, MMC 的直流侧电容电压 U_{dc} 应均匀地分配到 MMC 各相子模块中。

$$U_{uj} = U_{wj} = U_{dc} / N \quad (1)$$

式中: U_{uj} 和 U_{wj} 分别表示 MMC 的 $j(j = a, b, c)$ 相上、下桥臂上各子模块的电容电压; N 表示子模块个数。

对于模块间能量转移进行分析, j 相 $f(f = u, w)$ 桥臂第 z 个子模块吸收能量瞬时值 $\Delta p_{jf}(z)$ 可表示为

$$\Delta p_{jf}(z) = u_{jf}(z) i_{jf} = \left(\frac{u_{jf}}{N} + \Delta u_{jf}(z) \right) * \left(i_{cj} + \frac{i_{oj}}{2} \right) \quad (2)$$

式中: $u_{jf}(z)$ 、 $\Delta u_{jf}(z)$ 分别表示 j 相 f 桥臂第 z 个子模块的电容电压和输出电压调整量; i_{jf} 为桥臂电流; i_{cj} 和 i_{oj} 分别表示 j 相环流和交流侧电流。由于 i_{jf} 由上级控制器控制, 因此要使子模块能量转移不受相间和桥臂间能量转移的影响, 需控制 Δu_{jf} 瞬时总值为零^[25]。

$$\sum_{z=1}^N \Delta u_{jf}(z) = 0 \quad (3)$$

1.2 MMC-STATCOM 整体控制

MMC-STATCOM 主流控制方式为直接电流控制, 即电压外环、电流内环的控制结构。其在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型可表示为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: L 为等效电感; R 为线路阻抗; ω 为角频率; i_d 和 i_q 分别为 MMC-STATCOM 输出电流 dq 轴分量; u_{sd} 和 u_{sq} 分别为电网电压 dq 轴分量; u_d 和 u_q 分别为 STATCOM 输出电压 dq 轴分量。为了使 i_d 和 i_q 之间解除耦合, 可将式(4)改写为

$$\begin{cases} u_d = u_{sd} - \Delta u_d + \omega L i_q \\ u_q = u_{sq} - \Delta u_q + \omega L i_d \end{cases} \quad (5)$$

式中, Δu_d 和 Δu_q 可由 PI 控制来等效 MMC-STATCOM 的阻抗压降, 可表示为式(6)的形式。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta u_d &= L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = \\ &K_p(i_{dref} - i_d) + K_i \int (i_{dref} - i_d) dt \\ \Delta u_q &= L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = \\ &K_p(i_{qref} - i_q) + K_i \int (i_{qref} - i_q) dt \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中： i_{dref} 和 i_{qref} 分别为 dq 轴电流参考值； K_p 、 K_i 为 PI 控制器的控制参数。

MMC-STATCOM 电压外环通过控制 MMC 直流侧电容电压 U_{dc} ，与给定值 $U_{dc,ref}$ 作差并通过 PI 调节产生 i_{dref} ，控制 U_{dc} 维持在系统设定值。具体控制结构图如图 1 所示。

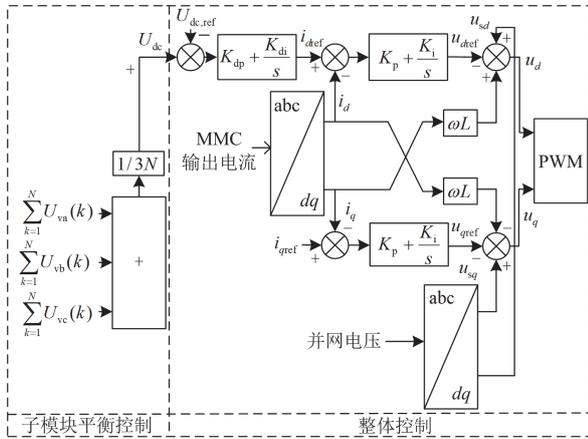


图 1 MMC-STATCOM 控制结构图

Fig. 1 Control structure diagram of MMC-STATCOM

综上所述，考虑到电容平衡控制对输出无功功率影响不大，本文 MMC-STATCOM 控制模型待辨识参数分别为电压外环的比例、积分环节控制参数 K_{dp} 、 K_{di} 和电流内环的比例、积分环节控制参数 K_p 、 K_i 。

2 仿射算法

2.1 仿射算法的基本形式

在仿射算法中，区间值 $[x, \bar{x}]$ (\underline{x} 、 \bar{x} 分别表示该区间的上、下界) 通常用一阶多项式来表示，也称为区间值的基本仿射形式，如式(7)所示。

$$\hat{x} = x_0 + x_1 \varepsilon_1 + \dots + x_n \varepsilon_n \quad (7)$$

式中： \hat{x} 为区间值 $[x, \bar{x}]$ 的仿射形式； x_0 为区间中点值； n 为噪声元数量， $n=1, 2, 3, \dots$ ； ε_n 为相互独立的第 n 个噪声元，取值为 $[-1, 1]$ ； x_n 为第 n 个噪声元的噪声系数。

根据式(7)， \underline{x} 、 \bar{x} 可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{x} &= x_0 + \sum_{c=1}^n |x_c| \\ \underline{x} &= x_0 - \sum_{c=1}^n |x_c| \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中， $\sum_{c=1}^n |x_c|$ 表示当所有噪声元取到上限值时的最大仿射半径。

因此，可将区间表示为如式(9)所示的二阶仿射形式。

$$\hat{x} = x_0 + x_b \varepsilon_b \quad (9)$$

式中， x_b 表示 \hat{x} 的二阶仿射半径系数。 x_0 和 x_b 可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= (\underline{x} + \bar{x}) / 2 \\ x_b &= (\bar{x} - \underline{x}) / 2 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

2.2 仿射算法的近似计算

对于仿射算法线性运算，其运算规则可表示为

$$\hat{x} \pm \hat{y} = (x_0 \pm y_0) + (x_1 \pm y_1) \varepsilon_1 + \dots + (x_n \pm y_n) \varepsilon_n \quad (11)$$

式中： \hat{y} 为独立于 \hat{x} 的仿射变量； y_n 为该仿射变量的第 n 个噪声元的噪声系数。

对于非线性运算，其乘法运算规则可表示为

$$\hat{x}\hat{y} = x_0 y_0 + \sum_{e=1}^n (x_0 y_e \pm y_0 x_e) \varepsilon_e + \sum_{e=1}^n (x_e \varepsilon_e) \sum_{g=1}^n (y_g \varepsilon_g) \quad (12)$$

式中， $e, g=1, 2, 3, \dots, n$ ，且 $g \neq e$ 。其中的二次噪声项会导致区间扩张，但直接舍去则无法满足仿射运算的完备性，因此对其二次项进行近似是在满足仿射运算完备性的前提下降低其保守性的主要途径。

参考文献[26]引入高次噪声元。由于所有噪声元的取值范围均为 $[-1, 1]$ ，所以高次噪声元的取值范围也为 $[-1, 1]$ ，仿射乘法可近似为

$$\hat{x}\hat{y} = x_0 y_0 + \sum_{e=1}^n (x_0 y_e \pm y_0 x_e) \varepsilon_e + \left(\sum_{e=1}^n |x_e| \right) \left(\sum_{e=1}^n |y_e| \right) \varepsilon_{n+1} \quad (13)$$

式中， ε_{n+1} 为高次噪声元， $\varepsilon_{n+1} \in [-1, 1]$ 。

3 参数仿射辨识方法

3.1 传统参数辨识方法

传统的参数辨识方法是通过将模型实测数据与待定参数模型仿真数据进行对比，通过最小化实测数据与仿真模型输出之间的误差指标，从而获得能精准表述原模型的输出特性的参数。具体误差计算公式定义为

$$J(x) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (Q_{si}(x) - Q_{ri}(x))^2} \quad (14)$$

式中: $J(x)$ 为实测数据与仿真数据的均方根误差, 作为参数辨识的适应度函数, $x = [K_{dp}, K_{di}, K_p, K_i]$; M 为辨识过程中实测与仿真的数据对比数量; m 为采样点; $Q_{si}(x)$ 和 $Q_{ri}(x)$ 分别为仿真和实测无功功率。

3.2 参数仿射辨识方法

传统辨识方法的最终辨识结果并不是式(14)的最小均方根误差, 而是对应 $Q_{si}(x)$ 的待定参数。因此, 无论模型输出是否很好地拟合了实测系统的动态响应, 只要 $J(x)$ 满足要求, 就认为辨识结果准确。

$$J(x_h) \in \alpha \quad (15)$$

式中: $J(x_h)$ 为最终辨识结果 x_h 所对应的适应度; α 为参数辨识结束条件, 包括迭代次数和辨识误差接受上限。但当包含辨识误差 Δx 的辨识结果 x_0 同样满足式(15)时, 则有

$$J(x_0) \in \alpha, x_0 = x_h + \Delta x \quad (16)$$

式中: $J(x_0)$ 为辨识结果 x_0 所对应的适应度值, 在满足误差要求的情况下, x_0 也会被认为目标辨识结果。不同辨识误差对辨识结果的影响如图 2 所示。

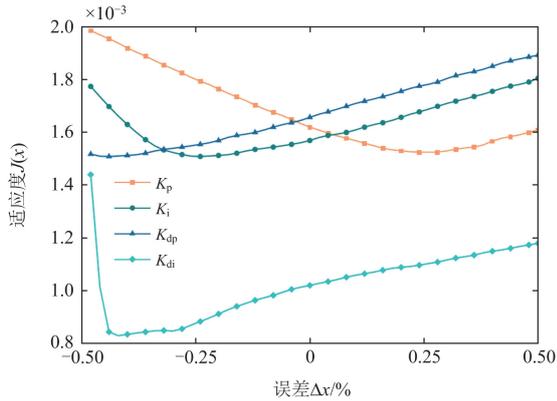


图 2 参数误差对辨识结果的影响

Fig. 2 Influence of parameter errors on identification results

如图 2 所示, 对参数施加不同程度误差作为耦合误差, $J(x)$ 会在一定范围内浮动, 且不同参数的不同耦合误差可以对应到相同的 $J(x)$ 。由此可知, 即使辨识参数不准确, 其 $J(x)$ 仍可能满足辨识要求^[27]。然而, 参数的耦合误差可能有无数组合, 确定值参数辨识难以完全表述误差之间的耦合关系, 限制了最终的辨识效果, 因此本文提出一种将参数仿射化并对仿射区间进行辨识的参数仿射辨识方法。待辨识参数的二阶仿射形式可表示为

$$\hat{x}_s = x_s + \Delta x_s = x_{s,0} + x_{s,1} \varepsilon_s \quad (17)$$

式中: \hat{x}_s 为第 s 个参数的仿射形式; $x_{s,0}$ 为第 s 个参数的区间中点值; Δx_s 为第 s 个参数的仿射半径;

$x_{s,1}$ 为第 s 个参数的耦合误差半径; ε_s 为第 s 个参数的噪声元。

4 基于改进粒子群的参数仿射辨识方法

4.1 PSO-TCS 算法

4.1.1 随机黑洞粒子群算法

随机黑洞粒子群算法(random black hole particle swarm optimization, RBHPSO)选取全局最优粒子 g_b 为质心、 r 为半径形成黑洞。RBHPSO 将黑洞所在区域作为近似真实解, 每个粒子会有几率 p 被黑洞捕获或逃逸^[28]。RBHPSO 所具有的特性使其在较基本粒子群算法有了更大搜索区域的同时, 具备了更好的收敛特性。

RBHPSO 下的粒子空间矢量可表示为

$$\begin{cases} v_{i,a}^{k+1} = \lambda v_{i,a}^k + c_1 r_1 (p_{b_{i,a}}^k - x_{i,a}^k) + c_2 r_2 (g_{b_{i,a}}^k - x_{i,a}^k) \\ x_{i,a}^{k+1} = x_{i,a}^k + v_{i,a}^{k+1}, l > p \\ x_{i,a}^{k+1} = g_{b_{i,a}}^k + 2r(r_3 - 0.5), l \leq p \end{cases} \quad (18)$$

式中: $v_{i,a}^{k+1}$ 和 $x_{i,a}^{k+1}$ 分别表示粒子 i 的第 a 维在第 $k+1$ 代的速度和位置, k 为当前迭代次数; λ 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习系数; $p_{b_{i,a}}^k$ 和 $g_{b_{i,a}}^k$ 分别表示粒子 i 个体最优解和全局最优解; l , r_1 , r_2 和 r_3 为 $[0,1]$ 间均匀分布的随机数; p 表示粒子被黑洞捕获的概率, 当 $l > p$ 时, 粒子从黑洞逃逸, 当 $l \leq p$ 时, 粒子则被黑洞捕获。

4.1.2 基于可信度的三黑洞系统粒子捕获策略

由于 RBHPSO 在迭代初期的全局最优粒子是真实最优粒子的可能性较小, 而随着算法的迭代, 粒子会朝着真实最优解运动, 全局最优粒子在其中产生的可能性便会不断增大, 故引入可信度因子 α 。

$$\alpha = \left(\frac{k + r_4 G_{cn}}{G_{cn} + r_4 G_{cn}} \right)^2 \quad (19)$$

式中: G_{cn} 为总迭代次数; r_4 为 $[0,1]$ 区间中均匀分布的随机数。

同时为防止粒子因初始化过度集中而陷入局部最优, 引入三黑洞系统粒子捕获策略(three black hole system capture strategy, TCS)。在迭代初期, 粒子会被随机黑洞捕获, 使黑洞的质量增加, 其引力随之增大, 黑洞半径也随之增大; 随着迭代的进行, 接近全局最优解的黑洞质量不断增大, 直至瓦解其余黑洞。在迭代过程中, 黑洞不仅会吸引其余粒子, 其自身的位置也会在全局最优粒子和上界 x_{max} 的中点、全局最优粒子和下界 x_{min} 的中点、全局最优粒子附近的点之间变动。

$$x_{i,a}^{k+1} = \begin{cases} \alpha \cdot g_{b_a}^k + 2r(r_5 - 0.5), l' > 1 - b \\ \frac{(\bar{x} + g_{b_a}^k)}{2} + 2r(r_5 - 0.5), l' < \frac{1-b}{2} \\ \frac{(\underline{x} + g_{b_a}^k)}{2} + 2r(r_5 - 0.5), \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

式中： r_5 为[0,1]区间中均匀分布的随机数； b 为黑洞位置更新的概率； $l' \in [0,1]$ 。更新方式如图3所示。

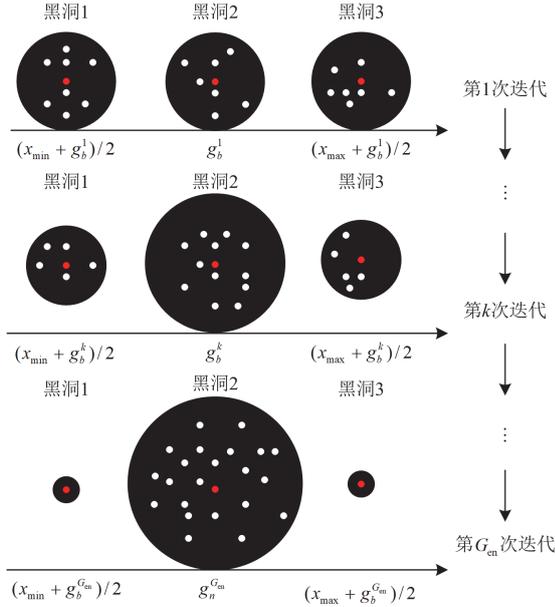


图3 基于可信度的三黑洞系统策略的更新示意图
Fig. 3 Updated schematic diagram of three black hole system strategy based on credibility

4.2 基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法

4.2.1 基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法

基于 PSO-TCS 算法的参数仿射辨识的实质是采用算法分别对参数及其耦合误差进行寻优。第 i 个粒子的空间矢量可表示为

$$\hat{v}_{i,a}^k = \begin{bmatrix} v_{1,1,0}^k + v_{1,1,1}^k \varepsilon_{1,1} & v_{1,2,0}^k + v_{1,2,1}^k \varepsilon_{1,2} & \cdots & v_{1,a,0}^k + v_{1,a,1}^k \varepsilon_{1,a} \\ v_{2,1,0}^k + v_{2,1,1}^k \varepsilon_{2,1} & v_{2,2,0}^k + v_{2,2,1}^k \varepsilon_{2,2} & \cdots & v_{2,a,0}^k + v_{2,a,1}^k \varepsilon_{2,a} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{i,1,0}^k + v_{i,1,1}^k \varepsilon_{i,1} & v_{i,2,0}^k + v_{i,2,1}^k \varepsilon_{i,2} & \cdots & v_{i,a,0}^k + v_{i,a,1}^k \varepsilon_{i,a} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\hat{x}_{i,a}^k = \begin{bmatrix} x_{1,1,0}^k + x_{1,1,1}^k \varepsilon_{1,1} & x_{1,2,0}^k + x_{1,2,1}^k \varepsilon_{1,2} & \cdots & x_{1,a,0}^k + x_{1,a,1}^k \varepsilon_{1,a} \\ x_{2,1,0}^k + x_{2,1,1}^k \varepsilon_{2,1} & x_{2,2,0}^k + x_{2,2,1}^k \varepsilon_{2,2} & \cdots & x_{2,a,0}^k + x_{2,a,1}^k \varepsilon_{2,a} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i,1,0}^k + x_{i,1,1}^k \varepsilon_{i,1} & x_{i,2,0}^k + x_{i,2,1}^k \varepsilon_{i,2} & \cdots & x_{i,a,0}^k + x_{i,a,1}^k \varepsilon_{i,a} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中： $v_{i,a,0}^k$ 和 $v_{i,a,1}^k$ 分别表示粒子 i 的第 a 维在第 k 代粒子更新速度的区间中点值和耦合误差半径；

$x_{i,a,0}^k$ 和 $x_{i,a,1}^k$ 分别表示粒子 i 的第 a 维在第 k 代粒子位置的区间中点值和耦合误差半径； $\varepsilon_{i,a}$ 为粒子 i 的第 a 维所对应的噪声元。

均方根误差可仿射化为

$$\hat{J}(\hat{x}) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{Q}_{si}(\hat{x}) - Q_{ri}(x))^2} \quad (23)$$

式中， $\hat{Q}_{si}(\hat{x})$ 表示仿射形式的仿真输出无功功率。

由式(23)可知，参数仿射辨识的适应度 $\hat{J}(\hat{x})$ 也为仿射形式，故为了比较不同适应度区间，本文采用均方根误差的区间积分，作为区间误差 E 判别准则，如式(24)所示。

$$E = \int_{\min(\hat{J}(\hat{x}))}^{\max(\hat{J}(\hat{x}))} \hat{J}(\hat{x}) d(\hat{J}(\hat{x})) \quad (24)$$

式中， $\max(\hat{J}(\hat{x}))$ 、 $\min(\hat{J}(\hat{x}))$ 分别表示适应度仿射区间的上下限。区间误差 E 越小说明参数辨识的仿真区间越贴合实测曲线。

4.2.2 综合区间满足度和区间误差的参数仿射辨识方法

由于区间误差仅代表辨识区间与实测曲线的离散程度，所以单纯以区间误差为目标，会过度压缩辨识区间宽度，造成仿真区间无法完全囊括实测曲线，导致辨识结果的准确性和完备性不平衡。为了在保证参数辨识准确性的前提下，进一步获得参数仿射辨识的完备结果，本文在采用前文所提区间误差的基础上，引入区间满足度作为评判指标，提出一种结合区间满足度和区间误差的 MMC-STATCOM 模型参数仿射辨识方法。

区间满足度是指辨识结果的仿真仿射区间能够囊括实测曲线的程度，区间满足度 C 可表示为

$$C = \frac{R(\hat{x})}{M} \quad (25)$$

式中， $R(\hat{x})$ 表示实测曲线落在仿真仿射区间的采样点总数。由于单一以区间满足度作为评判指标会使区间宽度过于保守，甚至导致优化结果无法收敛，所以本文采用熵权法来综合区间满足度和区间误差对参数仿射辨识结果进行分析。

由于区间满足度和区间误差是不同量纲的两种指标，所以需要对其进行归一化处理。同时区间满足度与区间误差分别为正向指标与反向指标，因此分别归一化为

$$C^* = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (26)$$

$$E^* = \frac{E_{\min} - E}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (27)$$

式中: C^* 、 E^* 分别为区间满足度与区间误差的归一化值, 且 C^* 、 $E^* \in [0,1]$ 。由此可计算出两种指标比重分别为

$$Q_F = \frac{F^*}{C^* + E^*} \quad (28)$$

式中: Q_F 代表对应区间满足度与区间误差的指标比重; F 对应 C 、 E 。

对应区间满足度与区间误差的指标信息熵值 M_F 可表示为

$$M_F = -\frac{1}{\ln 2}(Q_F \ln Q_F) \quad (29)$$

由此可计算对应区间满足度与区间误差的指标权重 O_F 为

$$O_F = \frac{1 - M_F}{(1 - M_C) + (1 - M_E)} \quad (30)$$

根据对应指标权重, 可表示综合考虑区间满意度和区间误差的适应度函数值 D 为

$$D = \frac{O_C C + O_E E}{C + E} \quad (31)$$

由此, 本文提出一种基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法。其主要思路是将辨识参数仿射化, 并结合 PSO-TCS 实现考虑耦合误差的参数仿射辨识; 同时综合区间满足度和区间误差作为评价指标, 进一步实现平衡准确性和完备性的参数仿射辨识。

4.2.3 基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法流程

基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法流程如图 4 所示。

5 仿真算例分析

5.1 参数设置

根据我国西北地区某光伏电站的 MMC-STATCOM 场站信息和实物控制器仿真要求, 分别在 Matlab/Simulink 和 RT-LAB 半实物仿真平台中搭建如图 5 所示的电网仿真系统, 其中 RT-LAB 半实物仿真平台实物图和 MMC-STATCOM 系统参数分别如图 6 和表 1 所示, 模型待辨识参数的典型值分别为: $K_{dp} = 4$, $K_{di} = 400$, $K_p = 0.5$, $K_i = 20$ 。

将仿射化参数代入系统进行仿真, 获得对应 MMC-STATCOM 吸收或放出的无功功率仿射区间, 通过对比 RT-LAB 实测曲线完成迭代优化, 实现待辨识参数的仿射辨识, 获得最优参数区间。

5.2 参数仿射算法的准确性与有效性

为验证参数仿射算法的准确性, 本文采用蒙特卡洛抽样模拟带耦合误差的参数离散取值, 并以均方根误差作为适应度, 与参数仿射算法进行对比。

其中, 以参数典型值作为中点, 以典型值的 10% 作为仿射半径与蒙特卡洛抽样半径, 蒙特卡洛抽样次数为 2000 次。两种方法的误差解耦效果如图 7 所示。

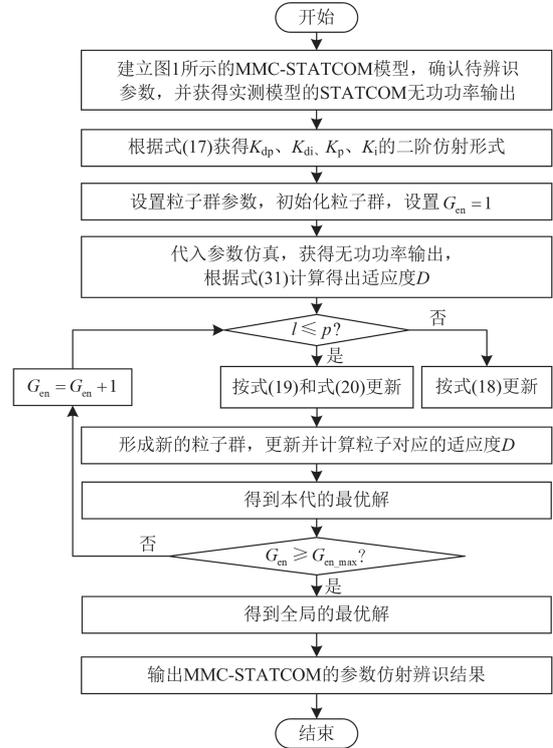


图 4 基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识方法流程图
Fig. 4 Flowchart of PSO-TCS based parameter affine identification method

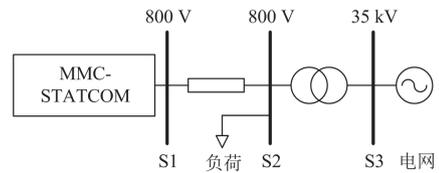


图 5 针对 MMC-STATCOM 无功补偿的电力系统
Fig. 5 Power system for MMC-STATCOM reactive power compensation



图 6 RT-LAB 半实物仿真平台实物图
Fig. 6 RT-LAB semi-physical simulation platform

表 1 MMC-STATCOM 模型参数设置

Table 1 MMC-STATCOM model parameter setting

参数	数值	参数	数值
线路等效电阻	0.1 mΩ	交流等效电阻	0.07 Ω
线路等效电感	14 mH	交流等效电感	1.56 mH
级联子模块个数	34	子模块电容值	0.0036 F
直流母线电压	900 V	子模块电容电压	900 V

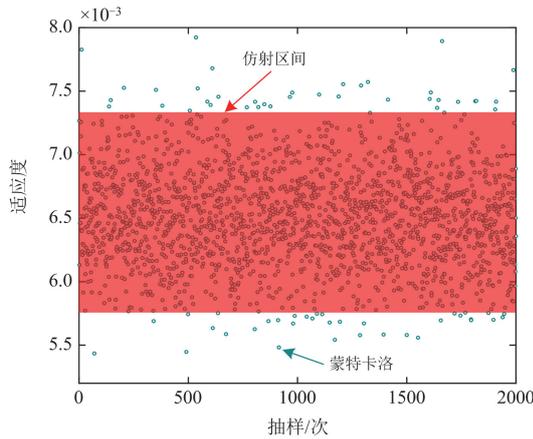


图 7 仿射算法对误差的解耦效果

Fig. 7 Decoupling effect of affine identification on errors

由图 7 可知，模型参数采用仿射算法计算得到的适应度区间为 $[0.0057, 0.0075]$ ，而采用蒙特卡洛抽样得到的适应度分布在 $[0.0054, 0.0079]$ 。通过统计，蒙特卡洛抽样得到的适应度 98.75%都落在仿射算法的适应度区间内，而仿射算法的适应度区间宽度仅为蒙特卡洛抽样适应度分布区域的 72%，这是因为参数之间的耦合关系在复杂的仿真传递过程中会导致结果表现出高随机性，且其长尾效应尤为明显，而仿射算法通过跟踪耦合误差对系统的影响，实现了参数解耦，规避了长尾效应的影响，剔除了 1.25%的极端情况，使参数之间的关系获得了更准确的表达。

5.3 不同算法模型对比

为验证 PSO-TCS 在参数仿射辨识方面的可行性与优越性，本文在 0 s 时控制 MMC-STATCOM 为电网吸收 0.1 p.u. 的无功功率，在 0.25 s 时为电网提供 0.22 p.u. 的无功功率，利用 PSO-TCS 算法和其他智能算法(遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、模拟退火算法(SA))对模型进行参数仿射辨识，并求出对应算法的运行时间、作为适应度的区间误差值和辨识仿真结果进行对比。其中算法的基本参数设置为：种群规模为 20，迭代次数为 50 次，遗传算法交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05；退火算法冷却系数为 0.99；PSO-TCS 算法学习系数 c_1 和 c_2 分别为 0.3 和 0.5，被捕获概率 p 为 0.35，黑洞更新概率 b 为 0.4，

黑洞半径 r 取 0.01。各算法的迭代曲线和迭代时间见图 8 和表 2。

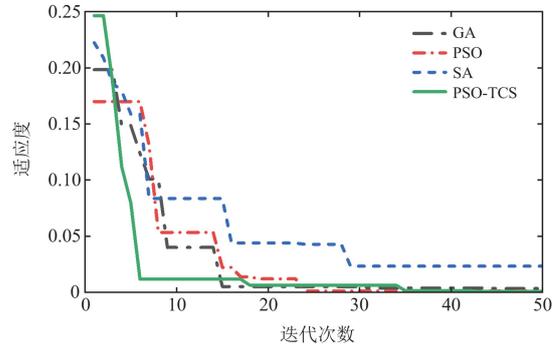


图 8 各算法迭代曲线

Fig. 8 Iteration curve of different algorithms

表 2 各算法迭代时间

Table 2 Iteration time of different algorithms

算法	迭代时间/s
GA	4261.3
PSO	8873.8
SA	188.9
PSO-TCS	8558.1

由图 8 和表 2 可知，PSO-TCS 较其他智能算法在参数仿射辨识方面具有较大的优势。SA 算法花费的时间最少，但收敛到全局最优的速度慢，且受算法参数影响极易陷入局部最优，最终辨识结果明显劣于其他算法。GA 算法花费时间较少，但算法参数配置较严格，易陷入早熟收敛，算法的全局搜索能力较低，最终辨识误差较高。PSO 和 PSO-TCS 都能得到较好的结果，但因为 PSO-TCS 中最优粒子具有较 PSO 更强的引领作用，PSO-TCS 获得了更快的迭代速度，迭代早期便获得较优辨识结果，且整个迭代过程花费时间相对 PSO 较少。另外 PSO-TCS 中黑洞粒子能不断更新自身位置，增强了算法的全局搜索能力，规避了 PSO 算法早期易陷入局部最优的问题。各算法的参数辨识结果和辨识仿真区间对比如图 9 和表 3 所示。

由表 3 可知，采用 PSO-TCS 算法求得的区间误差为 0.0010，小于其他算法的适应度，且各参数辨识区间宽度整体小于其他算法。从图 9 可以看出，虽然不同算法都能得到不错的辨识结果，但根据图 9(b)，不同算法的参数辨识结果所对应的无功功率仿射区域有明显不同，PSO-TCS 算法辨识得到的无功功率仿射区间要远窄于其他算法，造成以上结果的原因便是 PSO-TCS 具有更强的全局搜索能力，更有可能挖掘出全局最优解，这与从图 8 中得到的分析结果一致。

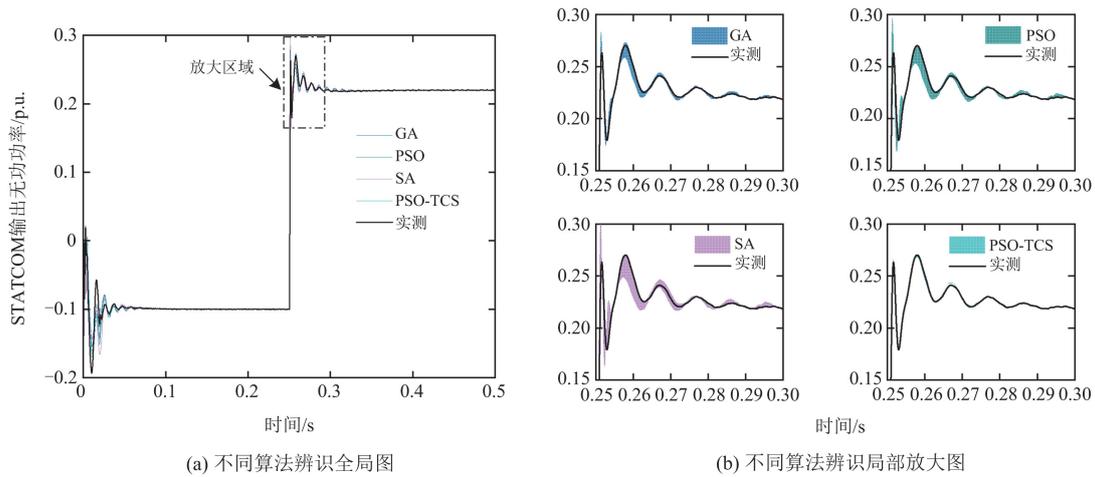


图9 各算法辨识结果对比

Fig. 9 Identification results comparison of different algorithms

表3 不同算法的辨识结果

Table 3 Identification results of different algorithms

算法	区间误差/p.u.	参数仿射辨识结果			
		K_{dp}	K_{di}	K_p	K_i
GA	0.0034	[4.0000 4.2110]	[398.895 402.927]	[0.4690 0.6330]	[19.8690 20.6140]
PSO	0.0013	[3.6000 4.9060]	[400.000 400.626]	[0.5000 0.7330]	[20.0000 20.2590]
SA	0.0233	[2.5726 4.3900]	[399.259 400.000]	[0.4754 0.8215]	[19.2490 20.1820]
PSO-TCS	0.0010	[3.9590 4.0170]	[397.569 409.969]	[0.4977 0.5153]	[19.8070 20.3290]

同时, 为验证参数仿射辨识方法在多参数辨识过程中相较于传统分步辨识方法的优势, 本文采用

两种方法分别进行参数辨识对比。算法的基本参数设置不变, 两种方法的辨识结果对比如表4所示。

表4 参数仿射辨识与传统分步辨识结果对比

Table 4 Results comparison of parametric affine identification and traditional stepwise identification

参数	典型值	传统分步辨识方法		参数仿射辨识方法		
		辨识结果	辨识误差/%	辨识结果	辨识误差/%	误差的二阶仿射/%
K_{dp}	4	4.2053	5.13	[3.9590 4.0170]	[-1.025 0.425]	-0.30±0.725
K_{di}	400	364.186	-8.95	[397.569 409.969]	[-0.608 2.490]	0.94±1.549
K_p	0.5	0.5354	7.08	[0.4977 0.5153]	[-0.460 3.060]	1.30±1.760
K_i	20	21.5771	7.88	[19.8070 20.3290]	[-0.965 1.645]	0.34±1.305

由表4可知, 采用参数仿射辨识方法得到的各参数辨识误差均在3.060%以内, 而传统分步参数辨识误差最大达到了8.95%, 原因在于传统分步辨识方法没有考虑非辨识参数的误差, 导致整体误差由单参数承担, 并连锁导致后续辨识结果准确性下降, 使最小辨识误差也达到5.13%。同时根据辨识误差的二阶仿射形式, 仿射算法辨识得到的参数误差在1.3%以内, 耦合误差控制在1.76%以内, 参数的辨识误差均匀地分散在所有参数中, 使所有参数获得更高的辨识准确性。文献[24]的仿射算法没有考虑到高次噪声项对辨识效果的影响, 导致仿射区间表现出极端的长尾效应, 致使其辨识误差均高于本文。

综上所述, 本文提出的基于 PSO-TCS 的参数仿射辨识算法在 MMC-STATCOM 模型的参数仿射辨识方面有较优越的辨识性能, 但作为算法优化目标的区间误差表示的是实测曲线与仿真区间的拟合程度, 对曲线超调部分跟踪能力差, 难以表征仿真区间是否完全囊括实测曲线, 导致辨识结果的完备性较差。如图10所示, 左侧超调量较大部分的拟合效果要远小于右侧, 单一采用区间误差作为适应度函数难以平衡参数仿射辨识要求, 严重影响参数辨识的最终效果。因此, 本文在利用 PSO-TCS 算法的基础上, 采用基于区间满足度与区间误差的参数仿射辨识方法对模型参数进行辨识。

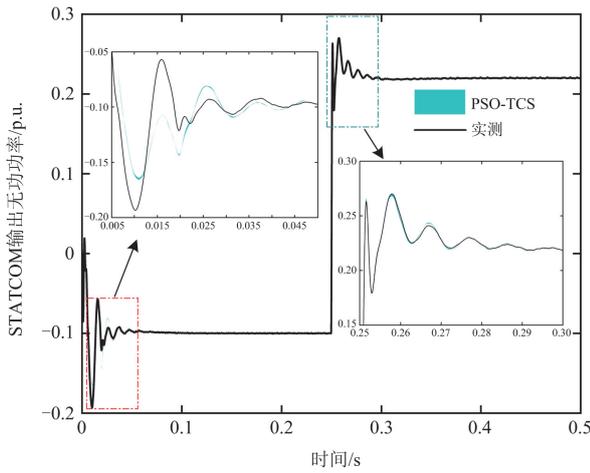


图 10 参数仿射辨识仿真区间

Fig. 10 Simulation intervals of parameter affine identification

5.4 考虑区间满足度和区间误差的辨识方法的有效性和准确性

为验证综合考虑区间满足度和区间误差的辨识方法的有效性，在 0 s 控制 MMC-STATCOM 为电网吸收 0.1 p.u. 的无功功率，在 0.25 s 时为电网提供 0.22 p.u. 的无功功率，并利用 PSO-TCS 算法，综合考虑区间满足度与区间误差进行 MMC-STATCOM 参数仿射辨识。其中 PSO-TCS 算法的基本参数设置不变，辨识过程分别考虑 3 种评判指标：只考虑区间满足度、只考虑区间误差和采用熵权法综合考虑区间满足度和区间误差。最终的仿真结果与参数辨识区间分别如图 11 和表 5 所示。

由图 11 和表 5 可知，综合考虑区间满足度和区间误差的参数仿射辨识方法，相较于只考虑区间误差和只考虑区间满足度的方法具有较大的优势。当只考虑区间满足度时，优化过程以保证仿真区间囊括实测曲线为主，所以仿真区间要远大于实际要求，丧失了参数辨识的准确性。当只考虑区间误差时，优化算法完全以区间误差最小为目标，区间的选择过于保守，对曲线的跟踪能力弱，辨识结果丧失了准确性。当采用熵权法综合考虑区间满足度和区间误差时，优化过程综合考虑区间满足度和区间误差结果，并根据式(26)一式(31)计算得到对应指标权重

分别为： $O_C = 0.51$ 、 $O_E = 0.49$ ，以此为基础进行仿真，进一步根据式(24)和式(25)可计算出区间误差为 0.063，区间满足度为 88.76%，算法在保证跟踪性能的前提下提高了辨识区间的准确性，获得了较单一目标更优的参数仿射辨识效果。另外，图 12 和图 13 分别从区间误差与区间满足度进一步明确了本文所提方法的综合性能。

如图 12 所示，在仿真初期，单纯考虑区间满足度与区间误差，仿真误差都要高于采用熵权法综合考虑的仿真结果，而在仿真中期则是只考虑区间误差拥有最低的区间误差。如图 13 所示，在仿真初期，只考虑区间误差仿真结果无法囊括实测曲线，区间满足度始终落后于其他指标，而在仿真中期，3 种评判指标的仿真结果均能囊括实测曲线，区间满足度的上升速率大致相同。这是因为在仿真初期系统超调较严重，对辨识曲线跟踪性能要求较高，只考虑区间满足度或区间误差都不能保证足够的跟踪性能，而在仿真中期，超调量跟踪性能要求降低，此时 3 种指标均能满足辨识要求，但只考虑区间满足度无法挖掘辨识更优解，反而影响了辨识准确性。

此外为验证本文方法参数辨识结果的准确性，其参数辨识仿射值对比典型值的误差如表 6 所示。

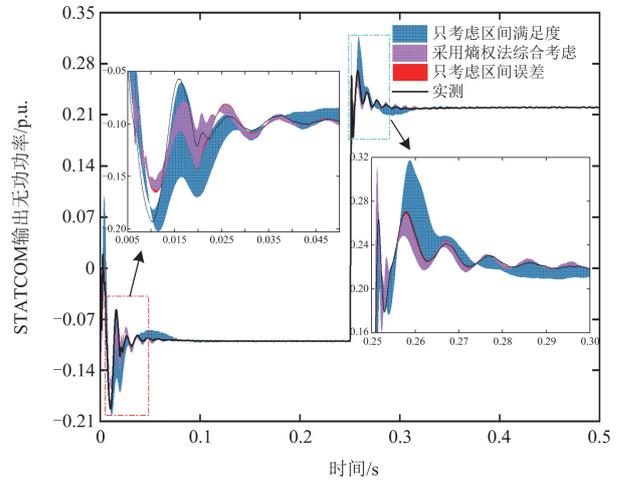


图 11 不同评判指标的辨识结果对比

Fig. 11 Comparison of identification results for different metrics

表 5 不同评判指标的参数辨识结果

Table 5 Parameter identification results for various metrics

评判指标	区间误差/p.u.	区间满足度/%	参数仿射辨识结果			
			K_{dp}	K_{di}	K_p	K_i
只考虑区间误差	0.0010	56.44	[3.9590 4.0170]	[397.5690 409.9690]	[0.4977 0.5153]	[19.8070 20.3290]
采用熵权法综合考虑	0.0630	88.76	[3.9539 4.1310]	[396.7228 402.9464]	[0.4885 0.5220]	[19.7326 20.0076]
只考虑区间满足度	0.1421	92.91	[2.9410 5.1078]	[396.5846 407.8653]	[0.2412 0.5625]	[19.4048 21.6981]

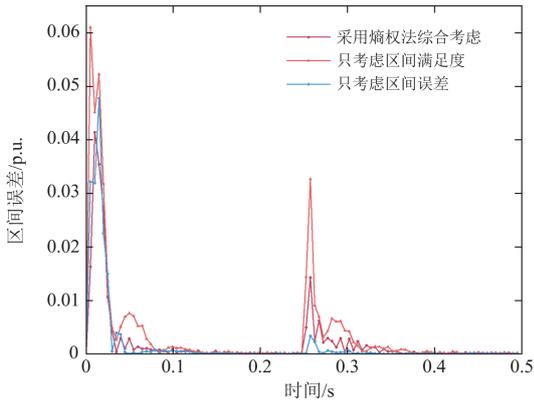


图 12 不同评判指标的时间误差对比

Fig. 12 Comparison of interval errors for different metrics

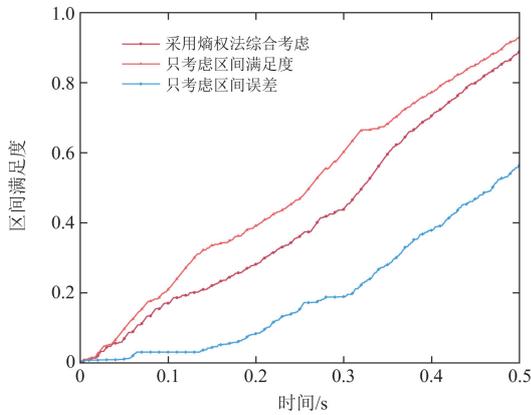


图 13 不同评判指标的区间满足度对比

Fig. 13 Comparison of interval satisfaction for different metrics

表 6 MMC-STATCOM 模型参数辨识误差

Table 6 MMC-STATCOM parameter identification errors

参数	辨识区间	误差/%	二阶仿射形式/%
K_{dp}	[3.9539 4.1310]	[-1.153 3.275]	1.06±2.214
K_{di}	[396.5728 403.1464]	[-0.857 0.786]	-0.04±0.822
K_p	[0.4885 0.5180]	[-2.30 3.60]	0.65±2.950
K_i	[19.7326 20.0076]	[-1.337 0.038]	-0.65±0.688

由表 6 可知, 将区间满足度纳入评判指标, 削弱了辨识算法跟踪性能对辨识结果的影响, 参数仿射辨识结果误差范围均在 3.6% 以内, 且参数误差在 1.06% 以内, 耦合误差也控制在 2.95% 以内, 同时结合表 4, 综合考虑区间满足度和区间误差的参数仿射辨识方法的辨识误差虽然高于只考虑区间误差的辨识方法, 且耦合误差要比只考虑区间误差增大了 1.17%, 但最大参数误差减小了 0.24%, 这是因为综合考虑区间满足度和区间误差后, 算法实现了耦合误差的再分配。文献[24]中的参数最高误差虽然低于本文最高误差, 但其余参数辨识效果均弱于本文,

本文将耦合误差分配给灵敏度较低参数承担, 实现了整体辨识效果的进一步提高。最后, 将辨识结果代入 RT-LAB 半实物仿真系统中验证。

如图 14 所示, 尽管本文所提方法摒弃了耦合误差, 但最终辨识仿真曲线均位于仿真区间中, 辨识结果没有丧失其完备性, 且相对于区间边界更接近于实测曲线, 均方根误差计算结果仅为 0.0068 p.u., 同样满足辨识准确性要求, 由此可以说明本文提出的综合考虑区间满足度和区间误差的参数仿射辨识方法在满足参数辨识准确性要求的前提下, 保证了 MMC-STATCOM 模型参数辨识的完备性。

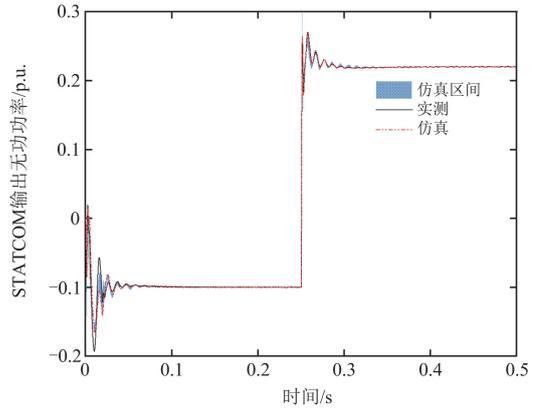


图 14 仿射辨识 RT-LAB 仿真结果

Fig. 14 Affine identification RT-LAB simulation results

6 结论

本文分析了 MMC-STATCOM 参数耦合误差对辨识效果的影响, 发现参数辨识效果会强关联耦合误差, 同时参数的耦合误差对辨识效果的影响呈现出高复杂性特征, 但传统粒子群算法难以高效利用耦合误差扩充算法搜索范围。在此基础上, 本文提出了一种基于改进粒子群算法 MMC-STATCOM 参数仿射辨识方法, 利用仿射算法对控制环节的跟踪特性, 将耦合参数问题转化为参数和耦合误差联合辨识问题, 间接实现参数的解耦辨识。将所提方法进行仿真验证, 发现在相同耦合误差的情况下, 该算法能实现参数与耦合误差的解耦计算, 在保证 98.75% 运算精准度的同时, 将运算区间缩减到 72%。与传统辨识方法进行对比, 在综合考虑区间满足度与区间误差的前提下, 该算法能更准确地辨识出参数仿射区间, 参数和耦合误差的辨识误差分别在 1.06% 和 2.95% 以内。值得一提的是, 所提方法无须明确参数之间的耦合特性即可实现参数和耦合误差的联合辨识, 不会增加参数阶数, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献

- [1] 林朋辉. 级联 H 桥 STATCOM 直流侧电压波动分析及控制策略研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
LIN Penghui. Research on DC side voltage fluctuation analysis and control strategy of cascaded H-bridge STATCOM[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [2] ZHU Jingsong, LI Lei, PAN Min. Study of a novel STATCOM based on modular multilevel inverter[C]// 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2012), October 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada: 1428-1432.
- [3] 戴珂, 徐晨, 丁玉峰, 等. 改进型 MMC-STATCOM 的建模及分层控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 44-51, 59.
DAI Ke, XU Chen, DING Yufeng, et al. Research on modeling and hierarchical control for an improved MMC-STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 44-51, 59.
- [4] 班国邦, 郭贤朝, 黄辉, 等. 基于直接功率控制的 STATCOM 研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(4): 6-9, 19.
BAN Guobang, GUO Xianchao, HUANG Hui, et al. Research on STATCOM based on direct power control[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(4): 6-9, 19.
- [5] 孙伟莎, 程启明, 程尹曼, 等. 不平衡电网电压下 MMC 滑模变结构控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 310-317.
SUN Weisha, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. MMC control strategy based on sliding mode variable structure under unbalanced grid voltage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(9): 310-317.
- [6] 方桂花, 王鹤川, 高旭. 基于动态遗忘因子递推最小二乘法的永磁同步电机参数辨识算法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(1): 280-283.
FANG Guihua, WANG Hechuan, GAO Xu. Parameter identification algorithm of permanent magnet synchronous motor based on dynamic forgetting factor recursive least square method[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(1): 280-283.
- [7] 李丹, 秦世耀, 李少林, 等. 基于混沌粒子群的双馈风电机组 LVRT 实测建模及暂态参数辨识[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 75-84.
LI Dan, QIN Shiyao, LI Shaolin, et al. LVRT measurement model and transient parameter identification of wind turbine based on chaotic particle swarm[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 75-84.
- [8] 刘世林, 李德俊, 姚伟, 等. 基于核极限学习机与容积卡尔曼滤波融合的锂电池荷电状态估计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(10): 51-59.
LIU Shilin, LI Dejun, YAO Wei, et al. Estimation on state of charge of lithium battery based on fusion of kernel extreme learning machine and cubature Kalman filter[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(10): 51-59.
- [9] 陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 等. 基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 99-106.
CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, et al. Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 99-106.
- [10] GAO Huimin, DIAO Ruisheng, HUANG Zhuo, et al. Parameter identification of SVG using multilayer coarse-to-fine grid searching and particle swarm optimization[J]. IEEE Access, 2022, 10: 77137-77146.
- [11] 聂永辉, 张春雷, 高磊, 等. 基于改进鸡群算法的静止无功补偿器模型参数辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 731-738.
NIE Yonghui, ZHANG Chunlei, GAO Lei, et al. Research on parameter identification of static var compensator model based on improved chicken swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 731-738.
- [12] 徐恒山, 朱士豪, 孙磊杰. 计及双馈风机故障特性的控制参数分区间辨识方法[J]. 供用电, 2023, 40(12): 97-106.
XU Hengshan, ZHU Shihao, SUN Leijie. Divided interval identification method for control parameters with considering fault characteristics of doubly fed induction generator[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 97-106.
- [13] 徐恒山, 李颜汝, 李文昊, 等. 融合寻优算法的双馈风力机控制参数分步辨识方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 247-256.
XU Hengshan, LI Yanru, LI Wenhao, et al. Stepwise identification method of control parameters for DFIG based on composite optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(4): 247-256.
- [14] 马睿聪, 邹世豪, 曹永吉, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 26-37.
MA Ruicong, ZOU Shihao, CAO Yongji, et al. Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 26-37.

- [15] TSAI S H, CHEN Y W. A novel fuzzy identification method based on ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3747-3756.
- [16] 吴振军, 刘震坤, 郭磊磊, 等. 基于抗频率偏移电感辨识的并网逆变器模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 99-107.
WU Zhenjun, LU Zhenkun, GUO Leilei, et al. Model predictive control for a grid-connected inverter based on inductance identification resistant to frequency deviation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 99-107.
- [17] 刘明宇, 姚芳, 李志刚, 等. 风电机组功率模型参数辨识及风资源利用率评估[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 305-315.
LIU Mingyu, YAO Fang, LI Zhigang, et al. Power model parameter identification and wind resource utilization evaluation of wind turbine[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2020, 41(12): 305-315.
- [18] CHEN Yang, LU Zixing, YANG Zhenyu. Robust optimal sensor placement for uncertain structures with interval parameters[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 2031-2041.
- [19] WANG Xiaoguang, HE Weiliang, ZHAO Linggong. Novel interval parameter identification method using augmented Fourier series-based polynomial surrogate model[J]. IEEE Access, 2019, 7: 70862-70875.
- [20] WEI Shuheng, WU Zaijun, XU Junjun, et al. Multiarea probabilistic forecasting-aided interval state estimation for FDIA identification in power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(3): 4271-4282.
- [21] 潘学萍, 许一, 赵天骐, 等. 考虑系统稳定边界的同步调相机励磁与升压变参数联合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 45-54.
PAN Xueping, XU Yi, ZHAO Tianqi, et al. Joint optimization of parameters of synchronous condenser excitation and step-up transformer considering the stability boundary of the power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 45-54.
- [22] 何松涛, 邵振国, 郑文迪, 等. 计及 SVG 动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5158-5170.
HE Songtao, SHAO Zhenguo, ZHENG Wendi, et al. Bi-level uncertain reactive power planning of distribution network considering SVG dynamic voltage regulation strategy[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5158-5170.
- [23] 汪兆栋, 胡瑄, 梅立雪, 等. 基于仿射算法的永磁同步电机参数在线辨识[J/OL]. 电源学报: 1-14[2024-07-07].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230505.1512.004.html>.
- WANG Zhaodong, HU Xuan, MEI Lixue, et al. Parameter identification of surface mounted permanent magnet synchronous machines based on affine projection algorithm[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-14[2024-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230505.1512.004.html>.
- [24] 祝顺才, 蔡金锭. 改进仿射粒子群算法在电路参数估计的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1958-1966.
ZHU Shunca, CAI Jinding. Application of improved affine particle swarm optimization algorithm in parameter estimation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1958-1966.
- [25] 刘星. 基于模块化多电平变流器的 STATCOM 控制策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LIU Xing. Research on the control strategy for MMC based STATCOM[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [26] 程杉, 左先旺, 杨堃, 等. 基于改进仿射算法的主动配电网区间调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 40-48.
CHENG Shan, ZUO Xianwang, YANG Kun, et al. Interval scheduling of active distribution network based on improved affine arithmetic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 40-48.
- [27] JIN Yuqing, LU Chongjiang, JU Ping, et al. Probabilistic preassessment method of parameter identification accuracy with an application to identify the drive train parameters of DFIG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 1769-1782.
- [28] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.

收稿日期: 2024-07-07; 修回日期: 2024-08-31

作者简介:

黄耀宣(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电建模及参数辨识等; E-mail: 741515563@qq.com

程杉(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统调度与控制等。E-mail: hpucquyzyu@ctgu.edu.cn

(编辑 周金梅)