

# 双馈风电场考虑动态无功补偿的连锁故障参数辨识研究

杨 志, 张 靖, 曹国强, 孙启宸, 黎舜瑀, 王志杨, 雷 爽

贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年12月7日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月6日

## 摘 要

随着新能源发电场的占比增加, 为满足系统的稳定要求, 新能源场站必须提供无功支撑, 配备静止无功发生器(SVG)。传统单一的电压骤变研究难以表征控制参数辨识的适用性, 为了获得更准确的SVG模型参数以满足双馈风电场并网系统安全稳定运行的规定, 提出了一种基于改进阿基米德优化算法的SVG控制模型的参数辨识方法。首先, 通过详细推导SVG的机电暂态特性并在Digsilent/factory平台建立其数学模型, 然后在实际双馈风电场获取SVG的连锁故障电压穿越实测数据, 最后基于SVG动态特性提出了一种基于考虑连锁故障的参数辨识方法, 对比仿真数据与实测数据, 结果显示, 所提辨识方法可有效提高SVG控制参数辨识精度。

## 关键词

静止无功发生器, 双馈风电场, 改进的阿基米德优化算法, 连锁故障, 参数辨识

# Research on Parameter Identification of Cascading Faults in Doubly Fed Wind Farms Considering Dynamic Reactive Power Compensation

Zhi Yang, Jing Zhang, Guoqiang Cao, Qichen Sun, Shunyu Li, Zhiyang Wang, Shuang Lei

School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 30<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 6<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

As the proportion of new energy power plants increases, in order to meet the stability requirements

文章引用: 杨志, 张靖, 曹国强, 孙启宸, 黎舜瑀, 王志杨, 雷爽. 双馈风电场考虑动态无功补偿的连锁故障参数辨识研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 20-30. DOI: 10.12677/mos.2025.141003

of the system, new energy plants must provide reactive power support and be equipped with static var generators (SVGs). Traditional single voltage sag research is difficult to characterize the applicability of control parameter identification. In order to obtain more accurate SVG model parameters to meet the requirements of safe and stable operation of doubly fed wind farm grid connected systems, a parameter identification method for SVG control model based on improved Archimedean optimization algorithm is proposed. Firstly, the electromechanical transient characteristics of SVG are derived in detail and its mathematical model is established on the Digsilent/factory platform. Then, the cascading fault voltage crossing test data of SVG is obtained in an actual doubly fed wind farm. Finally, a parameter identification method based on considering cascading faults is proposed based on the dynamic characteristics of SVG. Comparing simulation data with test data, the results show that the proposed identification method can effectively improve the identification accuracy of SVG control parameters.

## Keywords

Static Var Generator, Doubly Fed Wind Farm, Improved Archimedean Optimization Algorithm, Cascading Faults, Parameter Identification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着高比例新能源风力发电持续并入无穷大电网, 电力系统的安全稳定运行也将受到重大影响[1][2], 电网发生短路故障产生电压跌落时, 其深度难以控制, 所以在工程应用中要求新能源发电场站应具备完善的高、低电压故障穿越(HVRT, LVRT)能力[3], 并配备动态无功补偿装置。

双馈式风力机(Doubly fed Induction Generator, DFIG)自身无功调节能力有限, 当机组无法满足系统的无功调节需求时, 其余部分应由无功补偿装置来调节, 以提高并网电能质量。相比于前几代动态无功补偿装置, 静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)因响应时间短、采用全控半导体器件与并网电抗, 能实现双向无功(100%感性~100%容性)、不与系统阻抗发生谐振等优点而被广泛应用于风电场参与无功补偿。因此, 建立准确的 SVG 与 DFIG 协同无功控制模型以及 SVG 参数辨识方法具有重要工程实用价值。

在实际的新能源风力发电厂运行过程中只依靠 DFIG 自身的无功功率调节难以维持风机的并网稳定运行, 需要 SVG 的接入以提升电压故障穿越能力, 协同参与系统无功调节。文献[4]采用优化算法对 DFIG 和 SVG 无功参考值的比例积分(PI)控制参数进行优化, 建立了协同控制电压模型, 降低了二者的无功交换。文献[5]基于三相三电平 NPC 结构 SVG 的相间电流滞环空间矢量调制策略, 实现了直流侧的均压控制。文献[6]通过深入分析 SVG 与 DFIG 的容量匹配程度, 对负荷运行状态进行预测划分, 提出了一种稳定节点电压的无功控制方式。文献[7]基于非线性高阶自抗扰控制(ADRC)技术, 提升了高单元串联式 SVG 系统无功补偿能力, 但非线性环节约束过多, 计算复杂。文献[8]分析了 SVG 与电网的耦合关系, 提出了影响两并联 SVG 之间谐波环流的关键因素。

以上关于 SVG 的研究都只将重点放在模型的控制策略上, 极少有学者开展 SVG 参数辨识研究。文献[9]首先通过构建双闭环控制的 SVG 模型, 然后基于差分算法给出了一种多方式混合参数辨识算法。文献[10]采用 PSD-BPA 暂态稳定程序中的数学模型, 再基于 RTDS 硬件在环测试对 SVG 模型控制参数进行辨识, 但 BPA 的模型过于简化, 主要时间常数 T 的调节较为困难。

上述关于 SVG 的辨识研究都是基于单一的电压骤变故障来开展辨识研究,各自方法都是基于各类优化算法建立目标函数来角逐数据拟合精度。而双馈风机在实际的运用过程中,母线并网点(Point of common Coupling, PCC)电压在急剧跌落时,系统需要补偿大量无功功率,若无功补偿不协调,则导致低电压穿越后发生电压骤升,出现连锁故障,单一的电压骤变研究难以表征控制参数辨识的适用性。

因此,针对以上问题,本文首先在贵州安顺某双馈风电场使用新能源高低电压测试装置在 SVG 于 DFIG 并网点产生不同连锁故障工况来获取实测数据;然后通过 Digsilent/factory 软件建立仿真控制策略模型,并提出一种基于改进阿基米德优化算法(IAOA)对 SVG 控制参数寻优的辨识方法,结果显示,在同种连锁故障工况下,对比现场实测故障穿越波形,所提控制策略以及算法能够满足国家标准中 SVG 与 DFIG 机组连续运行不脱网的要求,且具有更好的连锁故障穿越能力。

## 2. 静止无功发生器 SVG 数学模型

通常静止无功发生器采用双闭环的控制方式,采用电压外环、电流内环的主要控制结构,SVG 的交流侧一次回路通过串联电抗器与电网相连,直流侧为电容储能元件,可等效为一个相位与幅值可调的电压源,主电路结构图如图 1 所示。

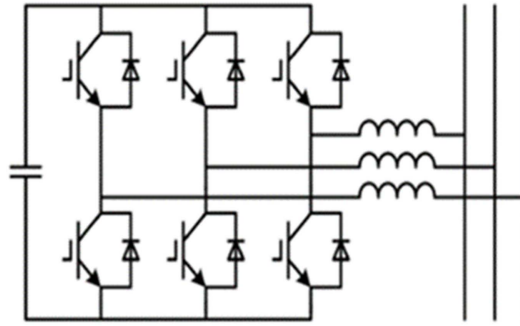


Figure 1. Main circuit structure diagram of voltage type dynamic reactive power compensation device

图 1. 电压型动态无功补偿装置主电路结构图

通过正交派克变换建立起在  $dq$  坐标系下的数学模型。令同步旋转坐标系  $d$  轴的电压  $u_{vd}$  和电网电压  $u_g$  一致,  $dq$  坐标系以电网同步转速  $\omega_s$  得到 SVG 的数学模型如下:

$$\begin{cases} L_v \frac{di_{vd}}{dt} = -R_v i_{vd} + \omega_s L_v i_{vq} + u_{vcd} - u_{vd} \\ L_v \frac{di_{vq}}{dt} = -R_v i_{vq} - \omega_s L_v i_{vd} + u_{vcq} - u_{vq} \\ C_{vdc} \frac{du_{vdc}}{dt} = -\frac{u_{vc} i_v}{u_{vdc}} \\ u_{vd} = u_g, u_{vq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

上式中,  $i_{vd}$ 、 $i_{vq}$ 、 $u_{vcd}$ 、 $u_{vcq}$ 、 $L_v$ 、 $R_v$  分别为 SVG 交流侧电流与电压的  $dq$  分量与电抗器滤波参数;  
 $u_{vd}$ 、 $u_{vq}$ 、 $\omega_s$  分别为 SVG 电抗器端口连接并网点电压的  $dq$  分量与同步转速;  $C_{vdc}$ 、 $u_{vdc}$  分别为 SVG 直流侧的电容与电压。

考虑 SVG 电抗器的滤波作用, SVG 电抗器输出端口的电压和电流经过一阶惯性环节模拟的测量环节输入到控制环节后,可构建的微分方程如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{vdn} \\ i_{vqn} \\ u_{vdc} \\ u_{vqn} \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} i_{vd} \\ i_{vq} \\ u_{vd} \\ u_{vq} \end{bmatrix} - \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} i_{vdn} \\ i_{vqn} \\ u_{vdc} \\ u_{vqn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $i_{vdn}$ 、 $i_{vqn}$ 、 $u_{vdc}$ 、 $u_{vqn}$ 、 $\tau$  分别为电抗器输出端口电压电流的  $dq$  分量及一阶惯性常数。通过电网电压定向控制技术, 在双闭环控制下, 外环电压参考量需要引入 SVG 电抗器输出端的并网电压  $u_{pcc}$ 、直流侧电压  $u_{vdc}$ , 以及内环电流需要借助 SVG 交流侧输出电流  $i_v$  的  $dq$  分量来构建微分环节的状态方程, 然后通过引入中间变量  $Z = [z_1, z_2, z_3, z_4]$  得到状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = u_{vdcref} - u_{vdc} \\ \frac{dz_2}{dt} = i_{vdref} - i_{vd} \\ \frac{dz_3}{dt} = u_{pccref} - u_{pcc} \\ \frac{dz_4}{dt} = i_{vqref} - i_{vq} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)与式(3)代入式(1)得到 SVG 数学模型解耦下的 PI 调节控制方程如下:

$$\begin{cases} u_{vcd} = K_{p2} (i_{vdref} - i_{vdc}) + K_{i2} z_2 + u_{vdc} - \omega_s L_v i_{vqn} \\ u_{vcq} = K_{p4} (i_{vqref} - i_{vqn}) + K_{i4} z_4 + u_{vqn} + \omega_s L_v i_{vdc} \\ i_{vdref} = K_{p1} (u_{vdcref} - u_{vdc}) + K_{i1} z_1 \\ i_{vqref} = K_{p3} (u_{pccref} - u_{pcc}) + K_{i3} z_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_{vdc} - \omega_s L_v i_{vqn}$ 、 $u_{vqn} + \omega_s L_v i_{vdc}$  分别为 SVG 电抗器输出端电流  $dq$  分量的解耦控制与消除电网电压波动而引入的电压补偿量。  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{p3}$ 、 $K_{i3}$  为外环  $d$  轴 SVG 直流侧电压控制环节的比例和积分调节增益、外环  $q$  轴 SVG 交流侧电压控制环节的比例和积分增益;  $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_{p4}$ 、 $K_{i4}$  分别为内环  $dq$  分量 SVG 交流侧电流控制环节的比例和积分调节增益, 等式左边为 SVG 交流侧的电压电流参考量, SVG 具体控制模型如图 2 所示。

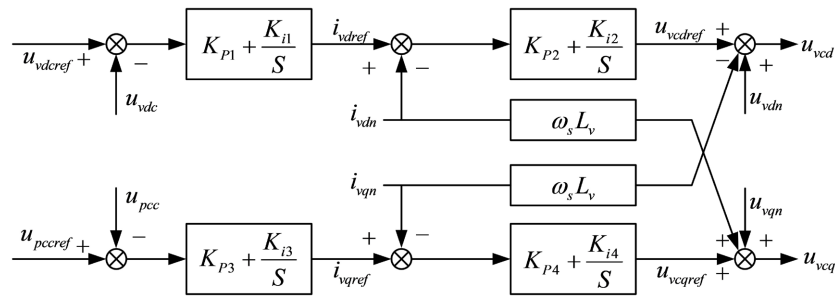


Figure 2. The control model of static var generator

图 2. SVG 控制模型

### 3. 阿基米德优化算法

阿基米德优化算法(Archimedes optimization algorithm, AOA)由 Hashim 等在 2021 年基于阿基米德原

理而提出的一种新型元启发式优化算法[11], AOA 算法中的种群个体为浸入液体或者流体中的任何物体, 随着浸入流体的这些物体发生相互碰撞时, 物体的碰撞程度会随时间的延迟而慢慢衰减, 适应度值优的种群个体加速度大, 并引导其他个体收敛至最优区域, 所有个体通过不断调节自身的体积与密度, 从而使得整个总群达到平衡状态, 达到寻优目的。阿基米德优化算法采用转移因子( $TF$ )控制物体相互碰撞以及平衡状态之间的变换(AOA 全局搜索变换到局部搜索)来获得问题的最优解, 转移因子定义如下:

$$TF = \exp\left(\frac{t - t_{\max}}{t_{\max}}\right) \quad (5)$$

式中,  $t$  表示当前迭代次数,  $t_{\max}$  代表设置的最大迭代次数。

AOA 的初始化阶段, 需要初始化物体的密度( $den$ )、体积( $vol$ )以及加速度( $acc$ ), 并对种群初始化进行评估而选择出当前最优适应度个体的位置( $x_{best}$ )、最优密度( $den$ )、体积( $vol$ )、加速度( $acc$ ), 从而实现下一代个体的更新。

$$\begin{cases} den_i^{t+1} = den_i^t + rand * (den_{best} - den_i^t) \\ vol_i^{t+1} = vol_i^t + rand * (vol_{best} - vol_i^t) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $N$  为种群规模,  $i=1,2,\dots,N$ 。  $rand$  为服从(0,1)分布的随机数。  $den_i^t$ 、 $den_i^{t+1}$ 、 $vol_i^t$ 、 $vol_i^{t+1}$  分别为个体在  $t$ 、 $t+1$  代的密度和体积。

当转移因子  $TF \leq 0.5$  时, AOA 进入全局搜索阶段, 此时个体加速度的更新方式如下:

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{mr} + vol_{mr} + acc_{mr}}{den_i^{t+1} + vol_i^{t+1}} \quad (7)$$

式中,  $acc_i^{t+1}$  为第  $i$  个个体在  $t+1$  代的加速度,  $den_{mr}$ 、 $vol_{mr}$ 、 $acc_{mr}$  为初始随机选择碰撞的个体加速度、密度以及体积。

转移因子  $TF > 0.5$  时, AOA 处于局部搜索阶段, 此时个体加速度更新方式变为:

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{best} + vol_{best} + acc_{best}}{den_i^{t+1} + vol_i^{t+1}} \quad (8)$$

AOA 在局部搜索阶段需要对加速度标准化处理从而更新个体的位置, 加速度标准化如下:

$$acc_{i-norm}^{t+1} = u * \frac{acc_i^{t+1} + \min(acc)}{\max(acc) + \min(acc)} + l \quad (9)$$

其中  $u$  和  $l$  为设置的任意常数。

算法在全局搜索阶段, 个体随机碰撞的位置更新公式为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + c_1 * rand * acc_{i-norm}^{t+1} * d * (x_{rand} - x_i^t) \quad (10)$$

式中,  $x_i^t$  和  $x_{rand}$  分别为第  $i$  个个体和随机个体在  $t$  次迭代过程中的位置向量,  $c_1$  为设置的任意常数,  $d$  是密度衰减因子, 其更新公式如下:

$$d^{t+1} = \exp\left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}\right) - \left(\frac{t}{t_{\max}}\right) \quad (11)$$

当转移因子变换到局部搜索阶段时, 个体位置更新公式为:

$$\begin{aligned} x_i^{t+1} = & x_{best}^t + F * c_2 * rand * acc_{i-norm}^{t+1} \\ & * d * (T * x_{best}^t - x_i^t) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $x_{best}$  代表全局最优个体,  $c_2$  为常数,  $T = c_3 * TF$ ,  $c_3$  为常数。  $F$  为改变碰撞个体移动时的方向标志, 决定个体碰撞时位置更新的方向, 定义如下:

$$F = \begin{cases} +1, p \leq 0.5 \\ -1, p > 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $p = 2 * rand - c_4$ ,  $c_4$  为设置的任意常数。

### 改进的阿基米德优化算法

由于动态无功补偿装置的高维性与非线性, 可能使得阿基米德优化算法在寻优的过程中出现早熟收敛等情况, 导致算法提前收敛到局部最优解。

本文首先将黄金正弦算子(Gold-SA)参与到个体的密度衰减因子更新过程, Gold-SA 根据正弦函数与单位圆之间的关系搜索正弦函数上所有个体, 保持原来的密度衰减因子自身信息以及性质, 加快算法收敛速度, 密度衰减因子更新过程如下:

$$d^{t+1} = \exp\left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}\right) * |\sin(R_1)| * d^t - R_2 * \sin(R_1) * \left(\frac{K_1 * t - K_2 * d^t}{t_{\max}}\right) \quad (14)$$

上式中,  $R_1 \in [0, 2\pi]$ ,  $R_2 \in [0, \pi]$ ;  $\tau = (\sqrt{5} - 1)/2$  为黄金分割系数,  $K_1 = -\pi\tau + \pi(1 - \tau)$  和  $K_2 = -\pi(1 - \tau) + \pi\tau$  是通过  $\tau$  计算的系数, 黄金分割系数不断缩小寻优范围, 保证了 AOA 的局部搜索能力。

然后将融合逆不完全  $\Gamma$  函数和  $B$  分布的惯性权值递减策略引入个体位置的更新阶段, 增加位置更新的多样性, 提高解的质量。

$$\begin{cases} \omega = \omega_{\min} + \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\lambda} \int_0^\lambda t^{a-1} e^{-t} dt + \sigma B(b_1, b_2) \\ a = 1 - t/T \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别是惯性权值的最大与最小值, 本文取  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $\omega_{\min} = 0.4$ ; 随机变量  $\lambda$  通常取 0.1;  $b_1 = 1, b_2 = 2$ , 惯性权重调整因子  $\sigma = 0.1$ , 用来控制  $\omega$  的偏移程度,  $t$  与  $T$  分别为当前和最大迭代次数; 结合式(15), 全局搜索阶段位置更新公式改进如下:

$$x_i^{t+1} = \omega * x_i^t + c_1 * rand * acc_{i-norm}^{t+1} * d * (x_{rand} - \omega * x_i^t) \quad (16)$$

局部搜索阶段的个体位置改进更新公式如下:

$$x_i^{t+1} = \omega * x_{best}^t + F * c_2 * rand * acc_{i-norm}^{t+1} * d * (T * x_{best}^t - \omega * x_i^t) \quad (17)$$

### 4. 基于改进阿基米德优化算法的参数辨识

SVG 参数辨识问题本质上是一个多维的非线性约束问题, 本文通过计算仿真数据与实测数据之间的偏差, 来考核风电场机电暂态模型的准确性, 测试与仿真偏差的主要电气参数为并网电压  $U$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、电流  $I$ 。

本文依据 NBT31075-2016《风电场电气仿真模型建模及验证规程》考核二者之间的平均偏差与最大误差, 计算误差时将连锁故障分割成单独低电压或者高电压穿越。



$$\begin{cases} F_1 = \left| \frac{\sum_{i=K_{m-start}}^{K_{m-end}} X_m(i)}{K_{m-end} - K_{m-start}} - \frac{\sum_{i=K_{s-start}}^{K_{s-end}} X_s(i)}{K_{s-end} - K_{s-start}} \right| \\ F_2 = \max_{i=K_{m-start} \dots K_{m-end}} |X_m(i) - X_s(i)| \end{cases} \quad (18)$$

式中  $X_s$ 、 $X_m$  分别为仿真数据与实测数据的标么值,  $K_{s-start}$ 、 $K_{m-start}$ 、 $K_{s-end}$ 、 $K_{m-end}$  为仿真与实测数据第一个和最后一个数据的序号。

本文主要通过对式(18)进行寻优, 在同一个激励情况下, 调用 IAOA 算法修正模型控制参数, 直到误差满足规程所规定的误差要求, 然后终止模型参数辨识程序。

利用本文所提辨识算法的 SVG 模型控制器参数辨识具体流程如下。

步骤 1、建立如图 3 所示的 DFIG 与 SVG 并网模型结构, 并确定控制器待辨识参数, 为式(4)中的  $\theta = [K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}, K_{p4}, K_{i4}]$ , 同时将待辨识参数初始化。

步骤 2、确定设备硬件参数、设置并网点与线路, 并固定模型判断电气量进入以及退出低电压、高电压穿越的阈值。

步骤 3、设置 IAOA 超参数, 初始化个体总群规模以及变量大小。初始化物体的密度( $den$ )、体积( $vol$ )以及加速度( $acc$ )。

步骤 4、将黄金正弦算子 Gold-SA 引入密度衰减因子的更新过程, 并确定每轮迭代需要计算的个体。

步骤 5、通过式(15)逆不完全  $\Gamma$  函数和  $B$  分布的惯性权值递减策略对全局搜索和局部搜索阶段的个体位置更新, 实现总群个体中位置更新的多样性。

步骤 6、调整辨识参数的上下限值, 利用式(18)计算平均偏差与最大误差, 记录全局最优个体对应的位置。

步骤 7、判断误差, 若不满足则重复步骤(4), 并通过加速度( $acc$ )缩小优化范围, 寻找局部最优个体的位置。

步骤 8、观察全局搜索与局部搜索变换前后的待辨识参数是否包含其边界值, 若包含则增加边界范围, 返回步骤(6)继续执行, 最终将最小误差对应迭代次数的最优个体作为最终辨识值。

辨识流程图如下图 3 所示。

## 5. 仿真算例分析

通过新能源电网适应性测试装置在贵州某装机容量为 56 MW 的双馈风力发电场升压变二次侧与动态无功补偿装置 SVG 并网 35 kV 处产生短路故障, 双馈风电场包含 28 台额定功率为 2 MW 的风机, 额定电压为 690 V, SVG 容量为  $\pm 17.5$  Mvar, 额定电流为 289 A, 风电场经主升压变接入 110 kV 电网。在测试中采用 MK3015DB 动态无功补偿特性测试系统便携式电量(波形)记录软件分析多组连锁故障在 PCC 的测试数据, 并选取实际测试工况在高负荷 36%  $Un$ –122%  $Un$  的低–高连锁故障电压穿越进行辨识验证, 整个连锁故障持续约 1.5 秒, 在 0.42 s 时低电压开始, 持续约 0.23 s 以后开始进入高电压阶段, 然后在 1.2 s 左右开始恢复至额定状态。利用 Digsilent/factory 平台搭建 DFIG 与 SVG 并网机电暂态等值模型, 并网系统等效结构如图 4 所示。

采用本文所提辨识算法基于实测数据进行辨识, 依据测试工况在 Digsilent/factory 及辨识模型中设置相关参数, 利用改进的阿基米德优化算法(IAOA)、粒子群优化算法(PSO)、遗传算法(GA)、灰狼优化算法(GWO)算法同时对图 2 中电压外环、电流内环控制模型的 SVG 控制参数进行辨识。

不同优化算法在同一连锁故障电压穿越下的辨识仿真结果与实测数据对比如图 5 所示。

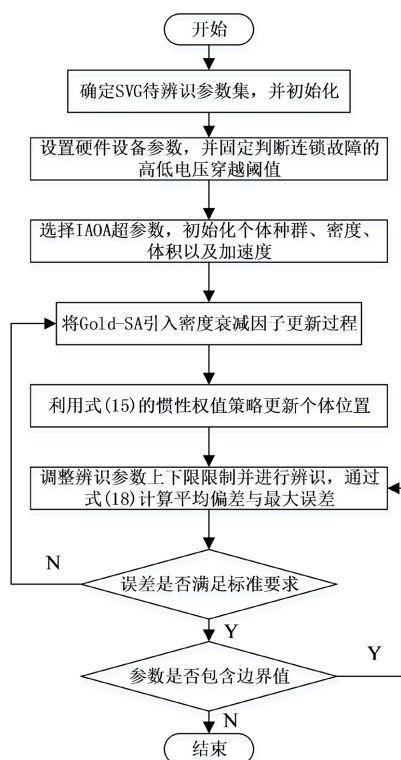


Figure 3. IAOA identification flow chart

图 3. IAOA 辨识流程图

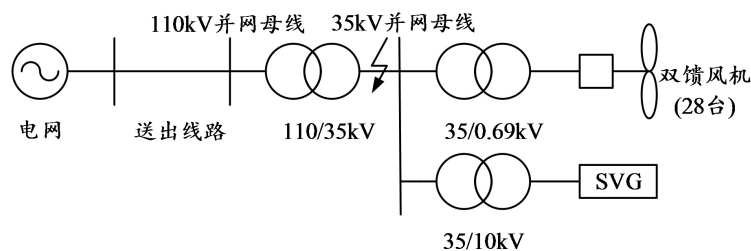
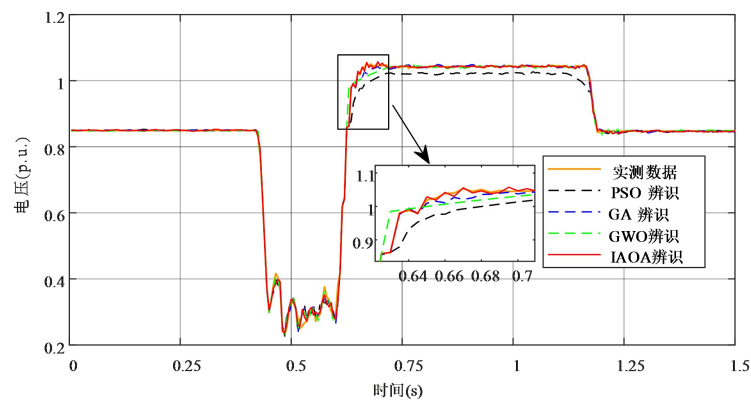


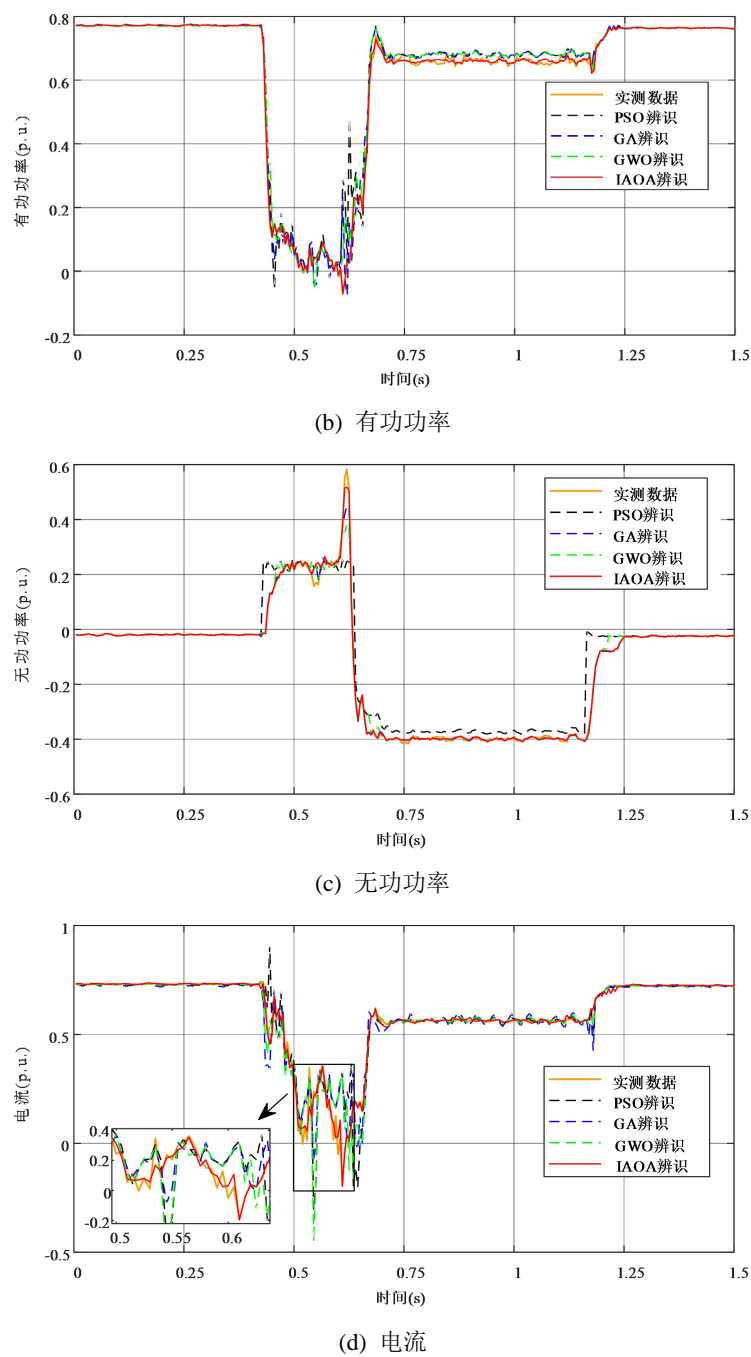
Figure 4. Topological structure diagram of simulated grid connected system

图 4. 仿真并网系统拓扑结构图



(a) 电压





**Figure 5.** Identification results of SVG cascading fault parameters for various algorithms

**图 5.** 各算法 SVG 连锁故障参数辨识结果

通过图 5 可知, 采用本文所提出的控制模式以及改进的阿基米德优化算法(IAOA)可对 SVG 控制参数进行准确辨识, 未进入故障时, 各算法辨识曲线基本与实测曲线保持一致, 但在 0.42 s 进入低穿以后, IAOA 辨识曲线能够很好拟合, 其余算法均会出现较大的超调现象, 使得暂态区间的幅值增加; 0.75 s 进入高穿阶段的稳态区间时, 其余算法对电流 I 的辨识曲线波动较大, 电压 U、有功和无功 Q 的均偏离实测曲线(表 1)。

**Table 1.** Comparison of parameter identification results under different optimization algorithms**表 1.** 不同优化算法下参数辨识结果对比

参数	PSO	GA	GWO	IAOA
$K_{p1}$	0.9201	0.8986	0.9470	0.9685
$K_{i1}$	95.8829	97.9937	96.2450	98.9500
$K_{p2}$	0.3363	0.4500	0.4606	0.4773
$K_{i2}$	8.2309	8.1054	7.8961	7.9905
$K_{p3}$	1.1122	1.2278	1.2099	1.2397
$K_{i3}$	299.3256	289.4760	296.9721	297.4300
$K_{p4}$	0.3999	0.4087	0.4400	0.4467
$K_{i4}$	8.1333	8.0808	7.9158	7.9901

**Table 2.** Calculation results of voltage deviation for cascading faults**表 2.** 连锁故障电压偏差计算结果

优化算法	偏差	U	P	Q	I
PSO	F <sub>1</sub>	0.0557	0.0678	0.0459	0.0822
	F <sub>2</sub>	0.2547	0.1720	0.1900	0.2054
GA	F <sub>1</sub>	0.0854	0.0957	0.0987	0.0363
	F <sub>2</sub>	0.1000	0.2350	0.1723	0.1520
GWO	F <sub>1</sub>	0.0568	0.03367	0.2340	0.0665
	F <sub>2</sub>	0.1956	0.2245	0.1268	0.1198
IAOA	F <sub>1</sub>	0.0202	0.0319	0.0207	0.0100
	F <sub>2</sub>	0.0915	0.1141	0.1025	0.0827

通过表 2 可以看出, 本文所提改进的阿基米德优化算法对 SVG 并网点电压  $U$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、电流  $I$  在各个暂态期间辨识曲线的平均偏差与最大误差均小于粒子群优化算法(PSO)、遗传算法(GA)、灰狼优化算法(GWO)辨识曲线的平均误差与最大误差。仿真结果表明, 本文所提辨识策略以及优化算法的最大误差均小于 0.2, 最大误差均小于 0.1, 满足规程所规定的误差要求, 具有更好的辨识效果, 辨识精度方面较为优越。

## 6. 总结

1) 基于 Digsilent/factory 平台构建了双馈风力发电机与动态无功补偿装置的并网系统模型, 详细推导了 SVG 电压外环、电流内环的模型控制结构。

2) 本文分析了 DFIG 与 SVG 的连锁故障穿越以及稳态控制的机电暂态模型, 并提出了一种基于改进的阿基米德优化算法参数辨识算法, 对模型采用指定电压与电流控制模式, 可实现对电压、有功、无功、电流在指定控制模式下的 SVG 控制参数有效辨识, 当 DFIG 机组与 SVG 并网点发生连锁短路故障时, 采用电压外环、电流内环的控制方式, 通过对比其他优化算法, 在所有静止无功发生器控制参数辨识的过程中, 本文所提辨识方法使得仿真曲线与实测曲线拟合度更好, 满足国家标准中平均误差及最大误差规定, 具有一定实用价值。

## 参考文献

- [1] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一): 模型结构[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1378-1389.
- [2] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(二): 机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2190-2202.
- [3] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T36995-2018 风电机组故障电压穿越测试[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [4] Zhou, Z., Mastoi, M.S., Wang, D., *et al.* (2023) Control Strategy of DFIG and SVG Cooperating to Regulate Grid Voltage of Wind Power Integration Point. *Electric Power Systems Research*, **214**, Article ID: 108862. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108862>
- [5] 李毅, 何英杰, 段文岩, 等. 一种三电平静止无功发生器滞环 SVPWM 电流控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6700-6707.
- [6] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
- [7] 于雁南, 杨荣峰, 严继池, 等. 考虑时滞因素时单元串联式静止无功发生器的非线性自抗扰控制[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3950-3957.
- [8] Chen, J., Shao, H., Cheng, Y., *et al.* (2020) Harmonic Circulation and DC Voltage Instability Mechanism of Parallel-SVG System. *IET Renewable Power Generation*, **14**, 793-802. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0513>
- [9] 郭强, 孙华东, 高磊, 等. 计及风电场随机特性的 SVG 模型参数智能辨识方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7950-7958.
- [10] 夏天华, 马骏超, 黄弘扬, 等. 基于 RTDS 硬件在环测试的 SVG 控制器参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 110-116.
- [11] Hashim, F.A., Hussain, K., Houssein, E.H., *et al.* (2021) Archimedes Optimization Algorithm: A New Metaheuristic Algorithm for Solving Optimization Problems. *Applied Intelligence*, **51**, 1531-1551. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>