

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236172

# 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

陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 陈红坤, 唐经广

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 针对风电场的参数准确辨识问题, 提出了一种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。首先, 阐述了风电场的系统结构与多机等值建模思路, 设计了混沌布谷鸟算法的改进方案。然后, 通过综合使用解析法与辨识法, 建立了基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数依次辨识流程。最后, 利用 Matlab 平台搭建了风电场多机等值仿真模型, 比较了所提依次辨识方法与同时辨识方法在风电场参数辨识中的效果, 分析了改进混沌布谷鸟算法与传统粒子群算法、布谷鸟算法的性能差异。结果表明: 所提方法将风机参数辨识平均误差由 11.07% 降低至 2.41%, 提高了风电场动态特性拟合度, 验证了其用于风电场多机等值参数辨识的有效性。

**关键词:** 风电场; 双馈风机; 多机等值; 参数辨识; 改进混沌布谷鸟算法

## Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm

CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, CHEN Hongkun, TANG Jingguang

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To solve the problem of accurate parameter identification of wind farms, an approach for identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm (CCSA) is proposed. First, the system structure of wind farms and its multi-machine equivalent modeling are described, and an improved scheme of the CCSA is designed. Then, by combining the analytical and identification methods, a sequential identification process of multi-machine equivalent parameters of wind farms based on the improved CCSA is established. Finally, a simulation model of the wind farms with multiple doubly-fed induction generators (DFIGs) is built using the Matlab platform, and the effects of the proposed sequential and simultaneous identification methods in identifying the wind farm parameters are compared. The performance differences among the improved CCSA, traditional particle swarm optimization (PSO), and cuckoo search algorithms (CSA) are analyzed. The simulation results show that the proposed identification method can reduce the DFIG's parameter identification average error from 11.07% to 2.41%, and more precisely imitate the dynamic characteristics of the wind farms. Therefore, the effectiveness of the proposed approach is well validated.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51877154).

**Key words:** wind farms; doubly-fed induction generator; multi-machine equivalence; parameter identification; improved chaotic cuckoo search algorithm

## 0 引言

随着风电技术和电力电子装备水平的不断提高, 电力系统中的风电装机容量大幅度提升<sup>[1-3]</sup>。为分析大规模风电场接入电网对安全稳定性的影响, 亟需建立准确反映风电场动态特性的模型<sup>[4]</sup>。

然而, 若对风电场中数十台、甚至上百台风电机组同时进行详细建模, 将面临“维数灾”问题<sup>[5-6]</sup>。研究风电场多机等值建模方法在不降低模型精度的前提下缩减建模范围、提升模型计算效率, 无疑具有重要的理论意义和实际价值。

目前, 国外内专家学者与科研机构针对风电场等值建模及参数辨识开展了基础研究, 在风机分群等值理论和控制参数辨识方面取得了初步成果。文

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (51877154)

献[7]将双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG)的定转子电流选取为分群指标,研究了风电系统的次同步振荡问题。文献[8]解析了双馈风机的故障暂态特性,采用支持向量机(support vector machine, SVM)对风机故障状态进行识别,实现了故障工况下的风电机组分群。文献[9]采用余弦相似度理论,研究了风电场中不同风机输出有功曲线之间的相似度,以此作为分群的主要指标。文献[10]分析了双馈风机变流器的传递函数特性,提出了适用于单台双馈风机的参数快速辨识方法。文献[11]设计了分类辨识和重点辨识相结合的风电场参数整体辨识策略,并基于粒子群优化算法实现辨识参数求解。结果表明,该策略对于降低辨识误差具有积极作用。

事实上,基于智能优化算法的风电场参数辨识方法具有良好的应用前景<sup>[12-14]</sup>。对于此类辨识方法,需要解决的难点主要有两个:(1)大规模风电场的多机等值参数众多,参数之间可能存在交互影响,同时准确辨识所有参数的难度较大,采取依次辨识理念是解决此问题的一条可行技术路径;(2)当风电场采用多机等值模型时,不同等值风机的变流器控制参数难以区分辨识,对智能优化算法的性能提出了更高要求,应用高性能的混合智能优化算法具有解决此问题的潜力。

针对上述问题,本文提出了一种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。首先,阐述了风电场结构与多机等值建模思路,为后续参数辨识提供理论依据;然后,设计了混沌布谷鸟算法(chaotic cuckoo search algorithm, CCSA)的改进方案,实现优化求解性能的进一步提升;通过综合使用解析法与辨识法,建立了基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数依次辨识流程;最后,在Matlab/Simulink中的算例分析验证了所提参数辨识方法的有效性。

### 1 风电场多机等值模型

图1为本文研究的风电场示意图,其包括双馈风机阵列、升压变压器与集电线路。双馈风机由风力机、传动系统、发电机与变流器组成。风力机将风能转化为机械能 $P_m$ ,理论模型如式(1)所示。

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (1)$$

式中: $C_p$ 为风能捕获系数; $\rho$ 为空气密度; $A$ 为风轮桨叶面积; $v$ 为风速。

双馈风机传动系统基于单质块模型<sup>[15]</sup>,可表示为

$$H \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - D\omega_r \quad (2)$$

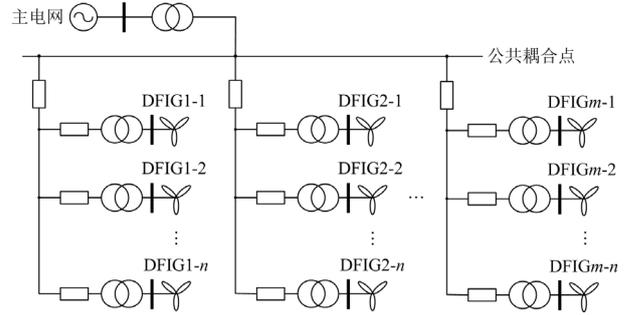


图1 风电场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind farms

式中: $H$ 为双馈风机的惯性时间常数; $\omega_r$ 为双馈风机的转子转速; $T_m$ 为输入机械转矩; $T_e$ 为发电机的电磁转矩; $D$ 为阻尼系数。

忽略发电机定子磁链暂态特性<sup>[16-17]</sup>,双馈风机电压和电流的数学表达式为

$$\begin{cases} v_{ds} = -\omega_s \psi_{qs} + R_s i_{ds} \\ v_{qs} = \omega_s \psi_{ds} + R_s i_{qs} \\ v_{dr} = \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L$ 、 $R$ 、 $v$ 、 $i$ 、 $\psi$ 、 $\omega$ 分别为电感、电阻、电压、电流、磁通和转速;下标 $d$ 、 $q$ 分别为 $d$ 轴和 $q$ 轴分量;下标 $s$ 、 $r$ 分别为定子和转子变量; $L_m$ 为励磁电感。对于双馈风机变流器控制模型,其转子侧变流器(rotor-side converter, RSC)采用电磁转矩控制与无功-端电压控制<sup>[18]</sup>,如图2所示。

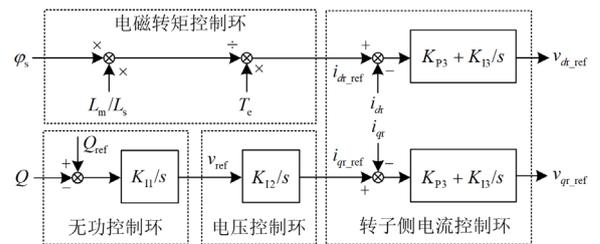


图2 双馈风机 RSC 控制策略

Fig. 2 RSC control block diagram of DFIG

RSC 控制方程如式(5)和式(6)所示。

$$\begin{cases} i_{dr\_ref} = \frac{T_c L_s}{\psi_s L_m} \\ \frac{dx_1}{dt} = K_{I3}(i_{dr\_ref} - i_{dr}) \\ v_{dr\_ref} = x_1 + K_{P3}(i_{dr\_ref} - i_{dr}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $i_{dr\_ref}$  为转子电流  $d$  轴分量参考值;  $v_{dr\_ref}$  为转子电压  $d$  轴分量参考值;  $x_1$  为转子电流控制环积分状态量;  $K_{P3}$  和  $K_{I3}$  为比例和积分系数。

$$\begin{cases} \frac{dv_{ref}}{dt} = K_{I1}(Q_{ref} - Q) \\ \frac{di_{qr\_ref}}{dt} = K_{I2}v_{ref} \\ \frac{dx_2}{dt} = K_{I3}(i_{qr\_ref} - i_{qr}) \\ v_{qr\_ref} = x_2 + K_{P3}(i_{qr\_ref} - i_{qr}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v_{ref}$  为网侧电压参考值;  $Q_{ref}$  为无功参考值;  $Q$  为无功功率;  $K_{I1}$  为无功控制积分系数;  $i_{qr\_ref}$  为转子电流  $q$  轴分量参考值;  $K_{I2}$  为端电压控制积分系数;  $x_2$  为转子电流控制环积分状态量;  $v_{qr\_ref}$  为转子电压  $q$  轴分量参考值。

双馈风机网侧变流器(grid-side converter, GSC) 采取电压电流双闭环控制方式, 其中电容电压外环与网侧电流内环如图 3 所示, 控制方程如式(7)一式(9)所示。

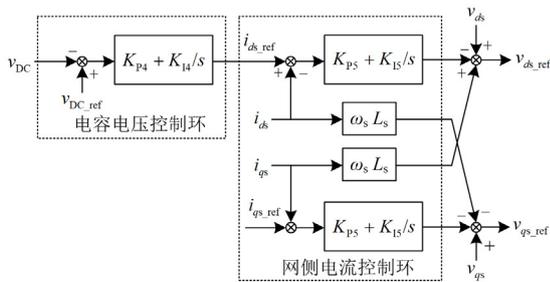


图 3 双馈风机 GSC 控制策略

Fig. 3 GSC control block diagram of DFIG

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = K_{I4}(v_{DC\_ref} - v_{DC}) \\ i_{ds\_ref} = x_3 + K_{P4}(v_{DC\_ref} - v_{DC}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $v_{DC\_ref}$  为电容电压参考值;  $v_{DC}$  为电容电压;  $K_{P4}$  和  $K_{I4}$  分别为电容电压控制比例和积分系数;  $x_3$  为电容电压控制环积分状态量;  $i_{ds\_ref}$  为定子电流  $d$  轴分量参考值。

$$\begin{cases} \frac{dx_4}{dt} = K_{I5}(i_{ds\_ref} - i_{ds}) \\ v_{ds\_ref} = v_{ds} + i_{qs}\omega_s L_s - [x_4 + K_{P5}(i_{ds\_ref} - i_{ds})] \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $x_4$  为定子电流控制环积分状态量;  $K_{P5}$  和  $K_{I5}$  分别为定子电流控制比例系数和积分系数;  $v_{ds\_ref}$  为定子电压  $d$  轴分量参考值。

$$\begin{cases} \frac{dx_5}{dt} = K_{I5}(i_{qs\_ref} - i_{qs}) \\ v_{qs\_ref} = v_{qs} - i_{ds}\omega_s L_s - [x_5 + K_{P5}(i_{qs\_ref} - i_{qs})] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x_5$  为定子电流控制环积分状态量;  $i_{qs\_ref}$  为定子电流  $q$  轴分量参考值。

在对含有多台双馈风机的风电场进行等值建模研究时, 其可等效为 2 台及以上的多机等值模型。本文采取(dynamic time warping, DTW)动态时间规整策略<sup>[11]</sup>, 基于不同双馈风机的受扰轨迹并考虑所建 RSC 和 GSC 控制策略进行同调分群, 由此建立风电场多机等值模型。需要注意的是, 倘若采取 2 机等值, 风电系统集成网络等值模型结构中存在机组间、机组与公共耦合点之间的阻抗, 各节点间还存在移相与对地导纳支路等, 多参数耦合将给风电场等值建模带来相当大的难度。为实现风电场多机等值模型参数的准确辨识, 下面提出了一种基于改进混沌布谷鸟算法的参数辨识方法。

## 2 风电场参数辨识方法

图 4 为风电场多机等值参数辨识方法流程图。使用解析法求取风电场多机等值参数, 由式(1)可推导双馈风机的等值风速  $v_{eq}$  为

$$\begin{cases} v_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{eq}} v_i^3} \\ S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  台风机的风速;  $n$  为待等值机群的机组总数;  $S_i$  和  $S_{eq}$  分别为第  $i$  台风机的额定容量和等值机容量。

使用容量加权法计算等值惯性时间常数, 有

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{eq}} H_i \quad (11)$$

式中,  $H_i$  和  $H_{eq}$  分别为第  $i$  台风机的惯性时间常数和等值机惯性时间常数。

使用容量加权法计算等值阻抗, 有

$$\begin{cases} R_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{eq}} R_i \\ L_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{eq}} L_i \end{cases} \quad (12)$$

式中： $R_i$  和  $L_i$  分别为第  $i$  台风机的电阻和电感； $R_{eq}$  和  $L_{eq}$  分别为等值机的电阻和电感。

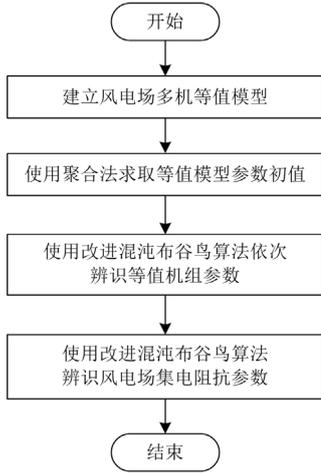


图 4 风电场多机等值参数辨识方法流程图

Fig. 4 Flowchart of identifying the multi-machine equivalent parameters of wind farms

考虑到集电阻抗的取值将直接影响等值机的动态特性<sup>[19-20]</sup>，本文采用并联化方法计算集电阻抗，即将连接双馈风机的线路阻抗  $Z_{line}$  进行分解，然后接入相对应风机的支路中<sup>[21]</sup>，如图 5 所示。

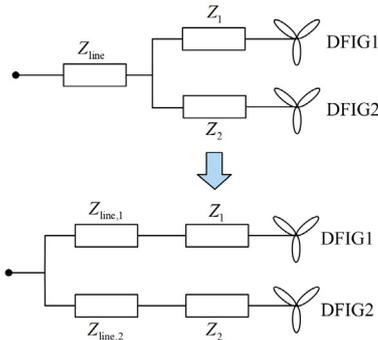


图 5 风电系统集电阻抗并联化示意图

Fig. 5 Schematic of impedance transformation for wind farms

$$\begin{cases} Z_{line,1} = \frac{Z_{line} Z_1}{Z_1 \parallel Z_2} \\ Z_{line,2} = \frac{Z_{line} Z_2}{Z_1 \parallel Z_2} \end{cases} \quad (13)$$

本文将解析法的计算结果作为辨识法的初值，

设置两阶段参数辨识。第一阶段参数辨识的目标是保障等值机组输出功率与详细电磁暂态模型机组输出功率一致。针对风电场参数间的耦合作用，文献[11,22-23]通过灵敏度分析方法，得出双馈风机中定转子电感、励磁电感和变流器控制参数具有较大灵敏度。因此，本文将其选定为待辨识参数，按照等值机额定容量由大到小进行排序，采用改进混沌布谷鸟算法进行依次辨识。辨识算法目标函数  $f$  为

$$f = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (|P_{sim}(t) - P_{real}(t)| + |Q_{sim}(t) - Q_{real}(t)|) \quad (14)$$

式中： $P_{real}$  和  $Q_{real}$  分别为风电机组详细模型在受扰工况下的有功和无功； $P_{sim}$  和  $Q_{sim}$  分别为依次辨识法取得的有功与无功； $t$  为仿真时间； $T$  为仿真总时长。

对于第二阶段参数辨识，其目标是风电场等值模型输出功率与详细模型输出功率一致。考虑到风电场的输出功率还取决于集电阻抗参数，本文将集电阻抗选定为待辨识参数，同样采用改进混沌布谷鸟算法进行优化求解。

### 3 改进混沌布谷鸟算法

#### 3.1 传统布谷鸟搜索算法原理

传统布谷鸟搜索算法(cuckoo search algorithm, CSA)通过模拟布谷鸟的寄生育雏与果蝇的莱维飞行实现优化<sup>[24-26]</sup>。莱维飞行的计算公式为

$$n_i(k+1) = n_i(k) + \alpha \times L(\beta) \quad (15)$$

式中： $n_i(k)$  为第  $k$  次迭代，下标  $i$  为第  $i(i=1,2,\dots,N)$  个巢穴， $N$  为巢穴总数； $L(\beta)$  为莱维飞行步长，满足式(16)； $\alpha$  为莱维飞行步长控制参数，满足式(17)。

$$L(\beta) = \left( \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi \times \beta / 2)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{1/\beta} \times \frac{r_1}{|r_2|^{1/\beta}} \quad (16)$$

式中： $\Gamma(-)$  为伽马函数； $\beta=1.5$ ； $r_1$  和  $r_2$  为满足标准高斯分布的随机数。

$$\alpha = \alpha_0 \times [n(k) - n_{best}] \quad (17)$$

式中： $n_{best}$  为迭代过程中适应度最优的巢穴； $\alpha_0$  为控制步长搜索范围的参数。

$$n_i(k+1) = n_i(k) + r_3 \times [n_s(k) - n_t(k)] \quad (18)$$

式中： $r_3$  为满足高斯分布的随机数；下标  $s$  与  $t$  为  $1 \sim N$  的随机整数，满足  $s \neq t$ 。

#### 3.2 Logistic 混沌映射

CSA 在可行域内随机生成初始解，可能导致初始解直接陷入局部最优，引发早熟<sup>[24]</sup>。通过引入

Logistic 混沌映射, 利用混沌系统的高度随机特点对 CSA 进行改良, 即为混沌布谷鸟算法。

$$s = \frac{n_0 - n_{0,\min}}{n_{0,\max} - n_{0,\min}} \quad (19)$$

$$s_1 = \mu \times s \times (1 - s) \quad (20)$$

$$n = n_{0,\min} + s_1(n_{0,\max} - n_{0,\min}) \quad (21)$$

式中:  $n_0$  为随机生成的初始解;  $n_{0,\min}$  与  $n_{0,\max}$  分别为  $n_0$  的最小值与最大值;  $s$  与  $s_1$  为混沌映射产生的中间量;  $n$  为 Logistic 映射处理后的解;  $\mu$  为混沌映射参数。

### 3.3 改进混沌布谷鸟算法

为提升混沌布谷鸟算法的优化求解性能, 本文对  $\alpha_0$  与  $p_a$  进行了自适应调整, 使得在算法迭代初期  $\alpha_0$  与  $p_a$  取值较大, 能够更好地跳出局部解, 并保障迭代后期  $\alpha_0$  与  $p_a$  取值较小, 加快收敛速度。

$$\alpha_0 = \left(1 - \frac{k}{k_{\max}}\right) \alpha_{0,\max} + \frac{k}{k_{\max}} \alpha_{0,\min} \quad (22)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $k_{\max}$  为最大迭代次数;  $\alpha_{0,\max}$  与  $\alpha_{0,\min}$  为常数, 满足  $\alpha_{0,\max} > \alpha_{0,\min}$ 。

$$p_a = \left(1 - \frac{k}{k_{\max}}\right) p_{a,\max} + \frac{k}{k_{\max}} p_{a,\min} \quad (23)$$

式中,  $p_{a,\max}$  与  $p_{a,\min}$  为常数, 满足  $p_{a,\max} > p_{a,\min}$ 。

图 6 为改进混沌布谷鸟算法的优化求解流程图。

## 4 仿真验证

为验证所提参数辨识方法的有效性和适应性, 在 Matlab/Simulink 中搭建风电场的详细电磁暂态仿真分析模型, 风电场由 9 台 DFIG 组成, 每台机

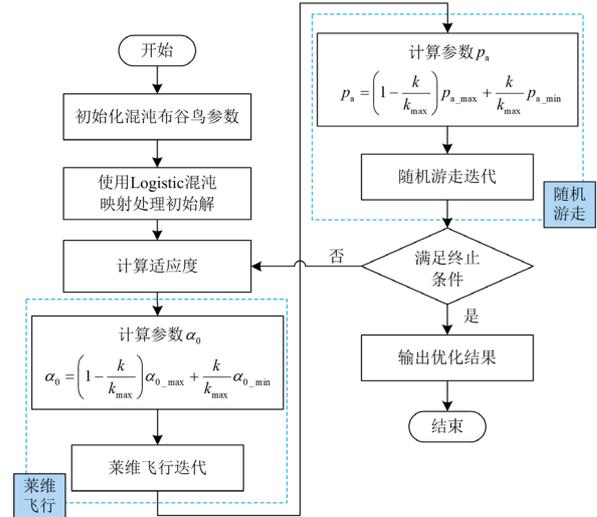


图 6 改进混沌布谷鸟算法的优化求解流程图

Fig. 6 Flowchart of the improved CCSA

组由机端变压器(575 V/35 kV)与集电阻抗连接至 PCC, 再经过主变压器(35 kV/110 kV)与传输线连接到外部电网。机组在风电场中均匀分布, 行间距和列间距均为 750 m。

通过将双馈风机的变流器控制参数、定转子电感与励磁电感设为待辨识参数, 采用改进 CCSA 与 PSO 算法、CSA 分别进行了参数辨识, 具体辨识结果见表 1。可以看出, 采用改进 CCSA 时, 各参数的平均辨识误差为 2.41%, 其中定子电感参数的辨识误差最小, 为 0.44%; 采用 CSA 时, 各参数的平均辨识误差为 9.28%, 其中 RSC 电流控制积分参数的辨识误差最小, 为 4.27%; 采用 PSO 算法时, 各参数的平均辨识误差为 11.07%, 其中 RSC 电流控制积分参数的辨识误差最小, 为 3.86%。

表 1 基于不同算法的双馈风机参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results of DFIG by different algorithms

参数类型	参考值	改进 CCSA		CSA		PSO 算法	
		辨识值	误差/%	辨识值	误差/%	辨识值	误差/%
定子电感 $L_s$	0.18 p.u.	0.1808 p.u.	0.44	0.17 p.u.	5.56	0.164 p.u.	8.89
转子电感 $L_r$	0.16 p.u.	0.1629 p.u.	1.81	0.17 p.u.	6.25	0.173 p.u.	8.13
励磁电感 $L_m$	2.9 p.u.	2.9917 p.u.	3.16	3.0426 p.u.	4.92	2.7711 p.u.	4.44
RSC 无功控制 $K_{11}$	0.05	0.0509	1.80	0.0526	5.20	0.0404	19.20
RSC 端电压控制 $K_{12}$	20	20.7	3.50	21.3298	6.65	16.4361	17.82
RSC 电流控制 $K_{P3}$	0.6	0.62	3.33	0.6965	16.08	0.5708	4.87
RSC 电流控制 $K_{I3}$	8	7.96	0.50	8.3415	4.27	7.6915	3.86
GSC 电容电压控制 $K_{P4}$	8	8.1	1.25	9.2461	15.58	8.9095	11.37
GSC 电容电压控制 $K_{I4}$	400	419.32	4.83	468.4532	17.11	353.6014	11.60
GSC 电流控制 $K_{P5}$	0.83	0.806	2.89	0.9277	11.77	0.7421	10.59
GSC 电流控制 $K_{I5}$	5	4.85	3.00	5.4335	8.67	6.0502	21.00

基于参数辨识结果，开展了双馈风机的故障暂态仿真特性模拟。假设公共耦合点在  $t=1\text{s}$  时发生三相金属性短路故障，故障持续时间为  $150\text{ms}$ 。双馈风机在不同辨识算法下的功率输出特性，如图 7 所示。分析了改进 CCSA 与 PSO 算法、CSA 的性能差异，改进 CCSA 的参数辨识效果更好，基于该参数的仿真模型可更准确地反映风机动态特性。

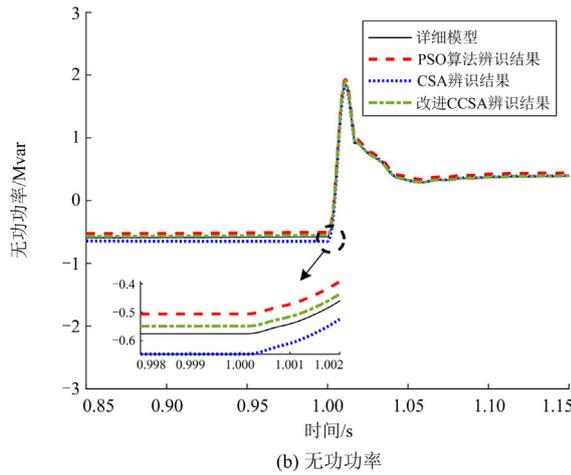
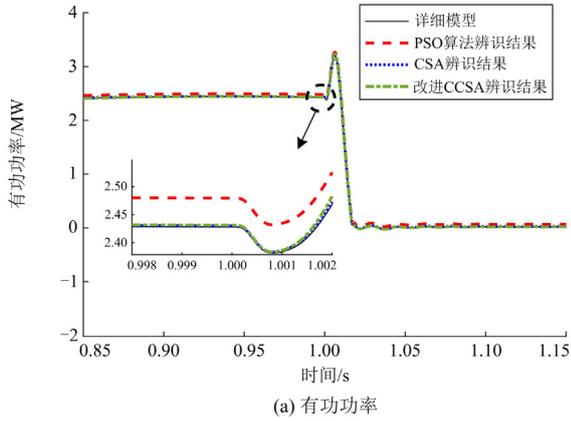


图 7 双馈风机在不同辨识算法下的功率输出特性  
Fig. 7 Power output characteristics of DFIG under different identification algorithms

图 8 为改进 CCSA 与 PSO 算法、CSA 的适应度收敛曲线。传统粒子群算法在第 46 代收敛，适应度为  $0.025$ ；布谷鸟算法在第 45 代收敛，适应度为  $0.024$ 。本文所提改进混沌布谷鸟算法在第 41 代收敛，适应度为  $0.022$ 。由于收敛速度和寻优性能的提升，改进 CCSA 算法更适用于解决风电场多机等值参数辨识问题。

为进一步验证本文所提依次参数辨识思路的可行性和正确性，将本文所提参数辨识方法与采用解析法的同时参数辨识方法进行了比较，实现了对风电场的整体参数辨识。图 9 给出了风电场在不同辨

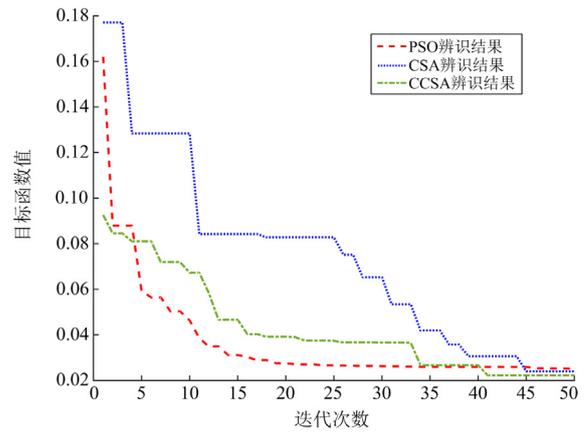


图 8 不同智能优化算法的性能对比  
Fig. 8 Performance comparison of different intelligent algorithms

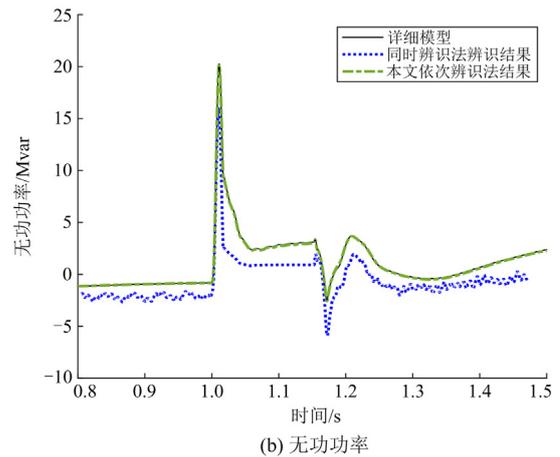
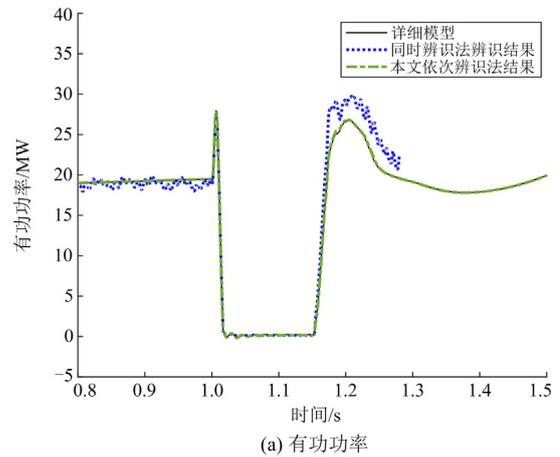


图 9 风电场在不同辨识方法下的功率输出特性  
Fig. 9 Power output characteristics of wind farms under different identification methods

识方法下的有功功率和无功功率特性。由图 9 可知，基于改进 CCSA 算法的依次参数辨识结果更为准确，其模型输出结果与详细模型的输出结果更具一

致性。相比而言,同时参数辨识法的有功功率和无功功率在稳态/暂态时的误差均较明显,证明了本文方法对于风电场多机等值参数辨识的适应性。

## 5 结论

本文在建立风电场多机等值模型的基础上,提出了一种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。通过详细阐述所提参数辨识方法的架构流程和改进混沌布谷鸟算法的优化原理,并结合电磁暂态仿真分析,验证了所提辨识方法的先进性和有效性。本文所提方法使用了依次辨识思路,优于参数同时辨识方法,与传统粒子群算法和布谷鸟算法相比,改进混沌布谷鸟算法能够更迅速有效地获取风电场参数辨识最优解,明显降低了辨识误差,提高了风电场动态特性拟合度。

在后续研究中,将考虑变流器引入主动限流和电压支撑控制策略,深入探索不同高低压穿越工况下的风电场多机等值参数辨识方案,综合评估所提参数辨识方法在风电场遭遇复杂故障下的适用性,为进一步推动其应用奠定坚实的理论基础。

## 参考文献

- [1] 张天翼,王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 177-187.  
ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 177-187.
- [2] HAMMADI L, AHMED E, TAMOU N. Coordinated control by ADRC strategy for a wind farm based on SCIG considering low voltage ride-through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 82-99.
- [3] ABDELWAHAB D B, ABDELFATTAH A E, GABR M A, et al. Internal electrical fault detection techniques in DFIG-based wind turbines: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 265-286.
- [4] 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.  
SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (part I): model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1378-1389.
- [5] 王玉鹏, 严干贵, 穆钢, 等. 交流电流控制尺度下的并网 VSC 聚合建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2900-2910.  
WANG Yupeng, YAN Gangui, MU Gang, et al. Research on aggregation modeling of grid connected VSC under AC current control scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2900-2910.
- [6] 吴志鹏, 裴建华, 李银红. 基于低电压穿越功率特性的双馈风电场多机等值方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 95-103.  
WU Zhipeng, PEI Jianhua, LI Yinhong. Multi-machine equivalent method for dfig-based wind farm based on power characteristic of low voltage ride-through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 95-103.
- [7] 韩平平, 王欢, 王希, 等. 基于指标降维及集电系统辨识的双馈风电场次同步振荡等值[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8465-8475.  
HAN Pingping, WANG Huan, WANG Xi, et al. Subsynchronous oscillation equivalence of doubly-fed wind farms based on index dimension reduction and collector system identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8465-8475.
- [8] 吴志鹏, 曹铭凯, 李银红. 计及 Crowbar 状态改进识别的双馈风电场等值建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 603-614.  
WU Zhipeng, CAO Mingkai, LI Yinhong. An equivalent modeling method of DFIG-based wind farm considering improved identification of crowbar status[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 603-614.
- [9] WANG T, GAO M, MI D, et al. Dynamic equivalent method of PMSG-based wind farm for power system stability analysis[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14: 3488-3497.
- [10] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.  
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [11] 潘学萍, 戚相威, 梁伟, 等. 综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 124-132.  
PAN Xueping, QI Xiangwei, LIANG Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 124-132.
- [12] ZHU L, ZHANG J, ZHONG D T, et al. A study of dynamic equivalence using the similarity degree of the equivalent power angle in doubly fed induction generator wind farms[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88584-88593.
- [13] 陈剑, 王海风. 模型-数据混合驱动的直驱风机 VSC 等效

- 建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 10-17.  
CHEN Jian, WANG Haifeng. A model-data hybrid driven method of VSC equivalent modeling of a permanent magnetic synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 10-17.
- [14] 薛飞, 李宏强, 李旭涛, 等. 基于 LSTM 神经网络的双馈风机控制参数辨识方法[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 31-39.  
XUE Fei, LI Hongqiang, LI Xutao, et al. Identification method for control parameters of doubly-fed induction generator based on LSTM neural network[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 31-39.
- [15] 胥心怡, 武家辉, 姚磊, 等. 基于协同惯量控制的双馈风机并网系统稳定性分析[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 59-67.  
XU Xinyi, WU Jiahui, YAO Lei, et al. Stability analysis of DFIG grid-connection system applying cooperative inertia control[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 59-67.
- [16] 伍双喜, 谭嫣, 李宇骏, 等. 基于最大转子储能的风电场风机变利用率的有功功率分配策略优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 152-161.  
WU Shuangxi, TAN Yan, LI Yujun, et al. Optimization of a variable utilization level scheme for load sharing control of a wind turbine in a wind farm based on maximum rotor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 152-161.
- [17] CHEN L, LI G, CHEN H, et al. Combined use of a resistive SFCL and DC-link regulation of a SMES for FRT enhancement of a DFIG wind turbine under different faults[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 56-67.
- [18] PRIYAMVADA I R S, DAS S, CHAUDHURI B. Method to quantify modal interactions between converter interfaced generators and synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 4753-4765.
- [19] 甘繁欣, 郭春义, 程浩, 等. 双馈风电场等值阻抗模型在高频振荡研究中的适用性分析与评价[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2022-12-20]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221016.  
GAN Fanxin, GUO Chunyi, CHENG Hao, et al. Analysis and evaluation of the applicability of doubly-fed wind farm equivalent impedance model in high frequency resonance research[J]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2022-12-20]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221016.
- [20] 孙超强, 潘学萍, 潘生云, 等. 风电场集电网络等值模型结构分析及参数辨识[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 85-91.  
SUN Chaoqiang, PAN Xueping, PAN Shengyun, et al. Equivalent model structural analysis and parameter identification of wind farm collector network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 85-91.
- [21] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 34-41.  
JIN Yuqing, HUANG Hua, JU Ping, et al. Collector network transformation methods for wind farm aggregated modeling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 34-41.
- [22] CHAO P, LI W, LIANG X, et al. An analytical two-machine equivalent method of DFIG-based wind power plants considering complete FRT processes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3657-3667.
- [23] HAN J, MIAO S H, LI Y W, et al. Improved equivalent method for large-scale wind farms using incremental clustering and key parameters optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8: 172006-172020.
- [24] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于布谷鸟搜索和模拟退火算法的两电压等级配网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 84-91.  
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Reconfiguration of two-voltage distribution network based on cuckoo search and simulated annealing algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 84-91.
- [25] 赵帅旗, 肖辉, 刘忠兵, 等. 基于 CSA-IP&O 的局部遮阳下光伏最大功率点追踪[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 26-32.  
ZHAO Shuaiqi, XIAO Hui, LIU Zhongbing, et al. Photovoltaic maximum power point tracking under partial shading based on CSA-IP&O[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 26-32.
- [26] 徐渊. 改进粒子群算法在含分布式电源配电网优化重构中的应用[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 98-104.  
XU Yuan. Application of improved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration with distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 98-104.

收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2023-07-09

作者简介:

陈磊(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障分析与稳定控制; E-mail: chen\_lei@whu.edu.cn

郑燊聪(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源等值建模与暂态特性分析. E-mail: whu\_zsc@163.com

(编辑 许威)