

# 风光火打捆外送系统概率小干扰稳定优化控制研究

和 萍, 潘志文, 李从善, 陶玉昆, 刘泽萌, 刘欣妍

(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 郑州 450002)

**摘 要:** 为降低电力系统中风电出力波动、低频振荡和多控制器耦合等因素带来的危害, 提出一种多运行方式下多控制器参数协调优化策略。首先, 基于 Simulink 建立风光火打捆外送系统和控制器模型, 通过 Voronoi 分区采样法建立风电典型出力场景。然后, 利用概率论方法构造优化问题目标函数, 通过随机森林回归分析选取控制器关键优化参数。最后, 采用改进的混合蜣螂算法对多运行方式下的控制器关键参数进行协调优化设计。IEEE 4 机 2 区和 16 机 5 区系统仿真结果表明, 对提取出来的控制器参数进行优化, 能有效提高系统阻尼, 抑制低频振荡引起的系统有功、功角等的波动, 验证该概率优化方法的有效性。

**关键词:** 可再生能源; 小干扰稳定分析; 低频振荡; 人工智能方法; 参数优化

**中图分类号:** TM732

**文献标志码:** A

## 0 引 言

可再生能源的迅速发展为能源供应方式带来了机遇和挑战, 在国家“30·60”碳达峰碳中和的要求和构建“新型电力系统”目标的推动下, 新能源发电在电网中的占比仍将不断提升, 所引发的稳定性问题也成为大多数学者关注的热点<sup>[1-2]</sup>。风电和光电有着天然互补的特性, 但当不同类型的能源并入电网时, 能源与电网之间的相互作用变得更加复杂和强烈, 可能导致电网出现宽低频带振荡事故, 将风电、光电和火电联合外送可有效平抑风电输出波动, 提高系统稳定性<sup>[3]</sup>。

很多学者针对风光火打捆外送系统展开研究。文献[4]针对火电机组调峰能力以及源荷特性, 建立风光火耦合系统容量优化模型, 研究在已有火电机组的情况下风电和光电的容量优化配置方法; 文献[5]针对新能源高比例并网造成的送端惯量缺失问题, 在风光火打捆外送系统仿真模型中引入虚拟同步机控制策略, 有效改善了送端系统机组受扰后的响应; 文献[6]针对含高比例新能源的交直流混联电网产生的功角稳定性问题构建适用于功角稳定性研究的暂态仿真算例, 为研究提供了基础平台, 提高科研效率。此外, 风电出力具有的波动性相比传统电网更易引起不平衡潮流<sup>[7]</sup>, 提高风光火打捆外送系统阻尼特性显得尤为重要。

现有文献对电力系统小干扰稳定性和低频振荡特性展开研究, 加装柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)装置作为常见的抑制系统低频振荡方法已被广泛应用于不同能源出力稳定性控制中<sup>[8-9]</sup>。当远离发电

机处发生干扰时, 仅电力系统稳定器(power system stabilize, PSS)无法提供足够阻尼<sup>[10]</sup>, 文献[11]提出统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)附加功率振荡阻尼器(power oscillation damping, POD)协调控制, 以阻尼比最大化作为目标函数, 利用最陡下降算法协调优化控制器参数, 抑制局部和区域间低频振荡; 文献[12]提出一种新的快速变频控制器参数优化方法, 确保系统在大负载扰动下的小信号稳定和频率稳定; 针对光伏并网对系统小干扰稳定的影响, 文献[13]提出光伏接入系统的阻尼比灵敏度求解方法, 用来增强系统小干扰稳定性。控制器可改善系统稳定性, 但多个控制器之间的耦合作用可能会导致系统阻尼比降低, 带来更严重的稳定性问题<sup>[14]</sup>。这些文献聚焦于确定性系统的控制器参数协调优化, 并未考虑风电出力不确定性带来的多运行工况从而对系统带来的影响。

启发式智能算法常被用于解决目标函数优化问题, 很多学者将其用于协调电力系统中控制器参数<sup>[15-18]</sup>。文献[19]将灰狼优化算法(grey wolf optimizer, WOA)与粒子群优化算法、正弦余弦算法、乌鸦搜索算法相结合, 提出一种混合算法并将其应用 PSS 参数整定, 以改善系统低频振荡; 文献[20]给出了新的 WOA 改进策略, 在 IEEE 4 机 2 区系统上对 PSS 参数进行协调优化, 抑制电力系统中由不可预测扰动引起的低频振荡问题; 文献[21]提出一种新的基于混沌的向日葵优化算法对 PSS 控制器进行优化设计, 以提高机电振荡模式下的阻尼比。

本文在上述研究的基础上, 将启发式算法与电力系统稳

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(52377125); 河南省高校科技创新团队(26IRTSTHN037); 中原领军人才(科技创新领域)(264200510044)

通信作者: 和 萍(1980—), 女, 博士、教授, 主要从事高比例新能源电力系统稳定分析与控制方面的研究。hplkz@126.com

定性提升方法相结合,提出一种适应多运行方式的低频振荡阻尼特性优化策略,采用改进的混合蜣螂算法(hybrid dung beetle optimization, HDBO)对多运行方式下的控制器参数进行优化设计,并针对多控制器参数优化存在维度高、仿真运行速度慢等问题,采用随机森林回归分析选取控制器关键优化参数,对关键参数进行优化,改善系统功角稳定性和电压稳定性,提高系统抗干扰能力。

## 1 风光火打捆外送系统及控制器模型

### 1.1 风光火打捆外送系统模型

双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的优势在于单机容量大、风能利用率高,并网灵活性强。本文采用的双馈风电机组结构如图1所示,其数学模型主要由多个风力机、感应电机、变流器以及传动装置组成<sup>[22]</sup>。

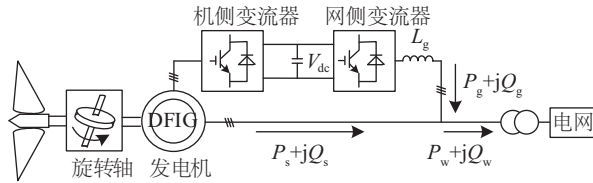


图1 双馈风机模型  
Fig. 1 Model of DFIG

图1中,  $V_{dc}$  为电容两端直流电压;  $L_g$  为电感值;  $P_w = P_s + P_g$ ,  $P_w$  为DFIG输入电网的有功功率,  $P_s$  和  $P_g$  分别为定子侧和网侧变流器输出的有功功率;  $Q_w = Q_s + Q_g$ ,  $Q_w$  为DFIG输入电网的无功功率,  $Q_s$  和  $Q_g$  分别为定子侧和网侧变流器输出的无功功率。

变流器动力学高度简化,因为它们相对于机电瞬态是快速的。因此,转换器被建模为一个理想的电流源,DFIG 的电压控制方案见附录中图 A1 所示。

光伏模型主要目的是预测光伏电力系统的输出和行为,通过光伏组件将光能转化为化学能<sup>[23]</sup>。本文采用的光伏电站数学模型为光伏组件的集总模型,其数学表达式和控制框图见附录 A。

图2为风光火打捆外送系统原理,送端系统由多个风电机组、火电机组和光伏电站组成,经交流、直流或交直流混联电路连接到受端电力系统。其中,  $\Delta P_b$  和  $\Delta Q_b$  分别表示风光火打捆外送系统总送出有功功率和无功功率;  $\Delta P_s$  和  $\Delta Q_s$  分别表示传统发电外送系统总送出有功功率和无功功率。

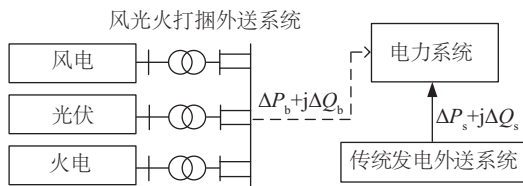


图2 风光火打捆外送系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of WPTB transmission system

### 1.2 STATCOM 模型

STATCOM 能提供可靠的无功补偿和电压控制,改善电网的稳定性、可靠性。本文采用 STATCOM 电流注入模型,如图 A3 所示,其节点注入无功功率  $Q$  和注入电流  $i_s$  可表示为:

$$\begin{cases} i_{sh} = [K_r(V_{ref} + V_s^{POD} - V_i) - i_s]/T_r \\ Q = i_s V_i \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_{sh}$ —— $i_s$  的一阶微分;  $K_r$ ——STATCOM 电压调节器增益,取标么值;  $V_{ref}$ ——参考电压, kV;  $V_s^{POD}$ ——POD 输出信号;  $V_i$ ——节点测量电压, kV;  $T_r$ ——STATCOM 电压调节器增益时间常数, s。

### 1.3 UPFC-POD 模型

UPFC 附加 POD 控制器可对系统低频或高频振荡起到抑制作用。将 POD 的输出信号附加在 UPFC 输入外环上,可提高区域间振荡模式的阻尼,UPFC-POD 控制框图如图3所示。其中,  $P_i$  表示输入信号,本文中选取接入 UPFC-POD 线路的有功功率作为输入信号;  $P_{ref}$  表示线路参考功率;  $P_{POD}$  表示 POD 的输出功率;  $T$  在图中表示相应控制器的时间常数;  $K$  表示相应控制器的增益;  $s$  表示微分算子。

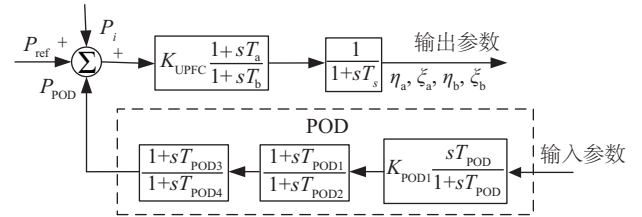


图3 UPFC-POD 结构框图

Fig. 3 UPFC-POD structure

## 2 算法改进与测试

### 2.1 混合蜣螂优化算法

蜣螂优化算法(dung beetle optimizer, DBO)是受到蜣螂滚球、繁殖、觅食和偷窃行为的启发从而开发的全新智能启发式算法<sup>[24]</sup>。考虑到滚球蜣螂在位置更新时无明确目标指引,为提高滚球蜣螂的局部搜索能力,将黄金正弦算法(golden sine algorithm, Gold-SA)引入滚球蜣螂在有障碍模式下的位置更新公式中<sup>[25]</sup>;繁殖和觅食蜣螂在位置更新时缺乏个体与个体间的交流,将鲸鱼优化算法<sup>[26]</sup>引入蜣螂繁殖和觅食的更新公式中;提高算法收敛速度;将三角形随机游走策略引入到蜣螂偷窃行为的更新公式中;增强算法跳出局部最优能力,并设置自适应  $t$  分布变异算子对蜣螂位置进行扰动,具体过程见附录 B。

### 2.2 算法测试

为测试 HDBO 算法在收敛速度以及寻优效果方面的表现,本文选取蜣螂优化算法、灰狼优化算法<sup>[27]</sup>和鲸鱼优化算

法<sup>[28]</sup>以及基于 Iterative 映射的改进灰狼算法<sup>[29]</sup>和基于混沌的正余弦鲸鱼优化算法<sup>[30]</sup>,共 3 种基本算法以及 2 种变体算法做对比,选取较为经典的 4 个测试函数如附录表 B1 所示。种群数量统一设置为 30,迭代次数 300,算法独立运行 30 次。测试效果如附录图 B1 所示,从中可看出 HDBO 算法在 4 个测试函数上的收敛速度明显快于其他 5 种算法。表 B2 给出了 6 种算法的实验结果平均值和标准差,从中可看出, HDBO 算法在 4 个测试函数上比其他 5 种算法接近最优值。与原 DBO 算法相比, HDBO 算法在测试函数  $f_3$  和  $f_4$  中达到了理论最优值 0,原 DBO 算法则陷入局部最优,最优值  $1.82 \times 10^{-6}$ 。在测试函数  $f_1$  和  $f_2$  中, HDBO 算法的种群平均值比原 DBO 算法更接近最优值。 HDBO 算法迭代时间相较于原 DBO 算法变化不大,但其收敛性有明显提高,说明 HDBO 算法在寻优效果上有良好表现,具备一定应用价值。

### 3 概率优化流程

#### 3.1 概率小干扰稳定分析方法

在确定电力系统基础运行工况后,通过蒙特卡洛仿真思想将抽样出的风力机出力依次代入电力系统进行仿真计算,获取系统在各运行方式下的特征值和阻尼比,具体计算流程见附录 C。

#### 3.2 控制器关键优化参数提取

为衡量 PSS、STATCOM 以及 UPFC-POD 参数与阻尼比的相关性强弱,提取控制器中共 40 个主要参数,如表 1 所示,利用 Matlab/Simulink 构建风光火打捆外送系统模型,在保证其他参数不变的情况下,计算系统低频振荡模式下关键阻尼比,可表示为:

$$\xi_0 = \min(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) \quad (2)$$

式中:  $N$ ——低频振荡模式的数量,在本文中  $N=5$ ;  $\xi_0$ ——关键阻尼比,取低频振荡模式下阻尼比最小值。

表 1 控制器及其主要参数

Table 1 Controller and its main parameters

| 控制器                | 主要参数                          |
|--------------------|-------------------------------|
| PSS <sub>1-5</sub> | $K_\omega, T_\omega, T_{1-4}$ |
| STATCOM            | $K_r, T_r$                    |
| UPFC               | $K_r, T_r$                    |
| POD                | $K_\omega, T_\omega, T_{1-4}$ |

风电出力的波动性导致系统存在多种运行方式,不同运行方式下特征重要性无法直接比较,本文引入随机森林重要性指数  $P_{RF}$  生成综合评价指标,提取仿真数据,采用随机森林回归分析对多运行方式下特征重要性排序,特征重要性指各控制器对系统关键振荡模式下阻尼比的影响程度,数值越大证

明该参数的变化导致的阻尼比波动越大,具体操作流程如下:

- 1) 构造  $M$  颗决策树( $k_1, k_2, \dots, k_M$ );
- 2) 当前决策树  $k_{tree}=1$  时,得到对应的袋外数据(out-of-bag, OOB);
- 3) 计算当前决策树对 OOB <sub>$k$</sub>  的预测误差  $B_i$ ;
- 4) 将 OOB <sub>$k$</sub>  中第  $i$  个特征变量的随机扰动记为 OOB <sub>$k$</sub>  <sup>$i$</sup> ,计算当前决策树对 OOB <sub>$k$</sub>  <sup>$i$</sup>  的预测误差  $B_i^i$ ;
- 5) 对于每一颗决策树  $k_{tree}=2, \dots, M$ ,重复步骤 2)~步骤 4);
- 6) 根据式(3)计算各特征的重要性指数  $P_{RF}$ 。

$$P_{RF} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (B_k^i - B_k) \quad (3)$$

式中:  $B_k^i$ ——添加扰动后的袋外数据在第  $k$  个决策树的预测误差;  $B^i$ ——未添加扰动的袋外数据在第  $k$  个决策树的预测误差。

7) 得到多运行方式下的评价矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{z1} & a_{z2} & \dots & a_{zn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $z$ ——控制器参数数量;  $n$ ——运行方式的数量。  $A$  的每一行表示一个控制器的一个参数,  $A$  的每一列表示一种运行方式。

#### 3.3 优化目标与约束条件

结合李雅普诺夫稳定准则和概率论方法,考虑将各运行工况下的所有低频振荡模式的特征根实部和阻尼比的均值相结合,利用权重系数将两者加权,进而构建目标函数,具体方法如下:

计算不同运行工况下各个低频振荡模式的特征根实部均值。

$$\min J_1 = \frac{\sum_{w=1}^W \text{mean}(\alpha_{1w}, \alpha_{2w}, \dots, \alpha_{mw})}{W} \quad (5)$$

式中:  $W$ ——运行工况的数量; mean——求平均值运算;  $m$ ——低频振荡模式数量。

计算不同运行工况下各低频振荡模式的阻尼比均值。

$$\min J_2 = \frac{-\sum_{n=1}^N \text{mean}(\xi_{1n}, \xi_{2n}, \dots, \xi_{mn})}{N} \quad (6)$$

目标函数综合考虑特征根实部和阻尼比,通过权重系数将两者加权得:

$$\min J = w_1 J_1 + w_2 J_2 \quad (7)$$

式中:  $w_1$  和  $w_2$ —— $J_1$  和  $J_2$  的权重系数,本文中取值都为 1。

约束条件为控制器待优化参数的取值范围,定义为:

$$\begin{cases} K_p^{\min} \leq K_{\omega-A} \leq K_p^{\max} \\ K_u^{\min} \leq K_{\omega-POD} \leq K_u^{\max} \\ T^{\min} \leq T_B \leq T^{\max} \\ C_p^{\min} \leq C_p \leq C_p^{\max} \end{cases} \quad (8)$$



式中:  $K_p^{\min}$  和  $K_p^{\max}$ —— $K_{\omega-A}$  的最小值和最大值, 本文中  $K_p^{\min}$  取 1,  $K_p^{\max}$  取 50;  $K_{\omega-A}$ —— $A$  的增益常数;  $A=[PSS_1, PSS_3, PSS_4, PSS_5]$ ;  $K_u^{\min}$  和  $K_u^{\max}$ —— $K_{\omega-POD}$  的最小值和最大值, 本文中  $K_u^{\min}$  取 -1,  $K_u^{\max}$  取 1;  $K_{\omega-POD}$ ——POD 的增益常数;  $T^{\min}$  和  $T^{\max}$ —— $T_B$  的最小值和最大值, 本文中  $T^{\min}$  取 0.01,  $T^{\max}$  取 1 s;  $B=[PSS_1, PSS_3, PSS_4, PSS_5, POD, UPFC]$ 。

### 3.4 概率优化求解流程

本文将 HDBO 种群数量设置为 200, 迭代 100 次, 保留控制器的初始参数, 其余蛭螂位置由 HDBO 算法随机生成。具体优化流程如图 4 所示。优化步骤如下:

1) 生成初始种群, 一个蛭螂的位置就代表一组控制器参数。

2) 代入系统数据和风电出力数据。

3) 计算各运行方式下系统特征值, 通过特征值虚部固定低频振荡模式。

4) 根据式(7)计算目标函数。

5) 确定当前迭代次数中最佳位置。

6) 根据分类规则更新蛭螂位置。

7) 重新计算目标函数值。

8) 对比更新前后目标函数值, 若位置更新后目标函数值小于更新前, 则更新蛭螂位置, 否则不更新。

9) 迭代次数+1。

判断是否达到最大迭代次数, 若是, 则输出目标函数值以及控制器参数; 否则, 返回 2)。

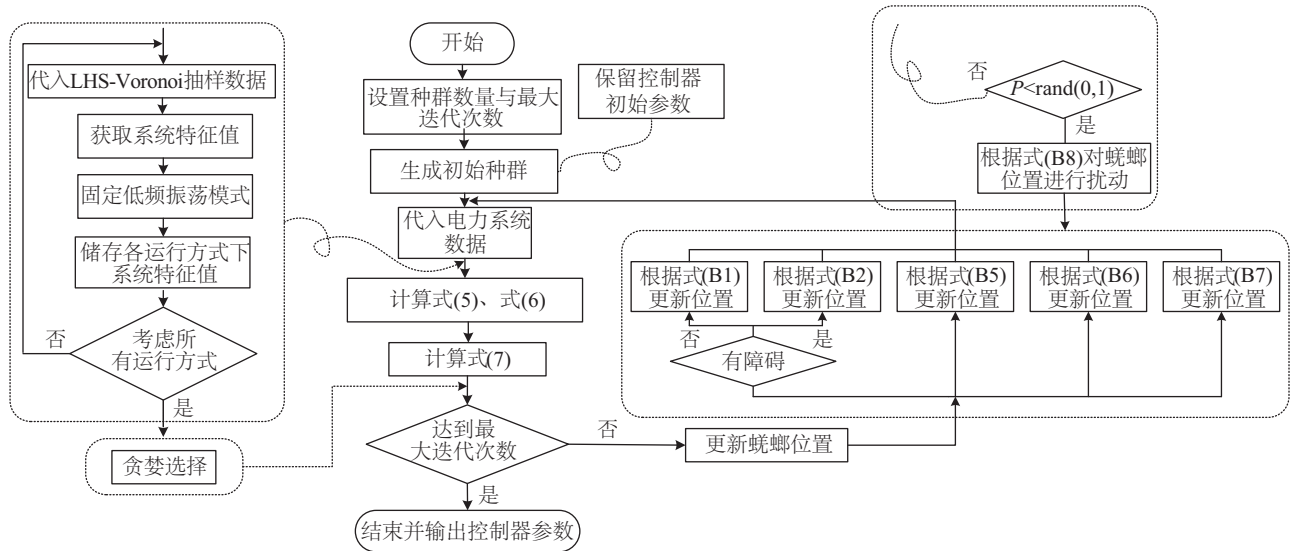


图4 概率优化流程

Fig. 4 Flowchart of probabilistic optimization

## 4 数据处理及算例仿真

### 4.1 数据采样

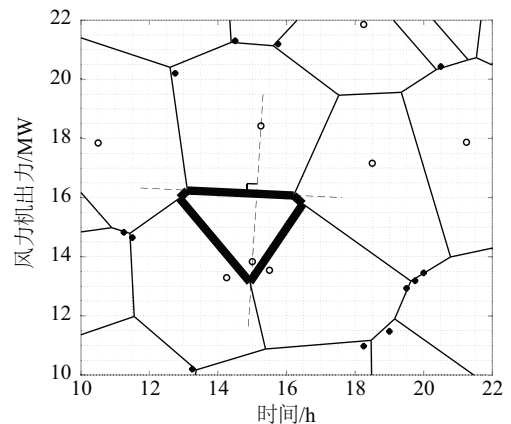
拉丁超立方采样虽然能均匀地覆盖参数空间, 但对于风电出力数据的抽取来说缺少一定的适用性。本文在拉丁超立方获取采样点的基础上通过 Voronoi 分区法寻找新的样本点, 在减少计算量的同时保证抽样数据更好地捕捉原数据信息。以某地一年的风电出力为原始数据, 按时间分层进行拉丁超立方抽样, 获取初始样本点。

将初始样本点通过 Voronoi 分区法进行分区, Voronoi 分区法是一种能将空间分割成分别属于当前样本点的不规则多边形区域, 认为该区域的特性可以由该样本点代表, 多边形边界由相邻样本点的垂直平分线绘制而成, 定义为:

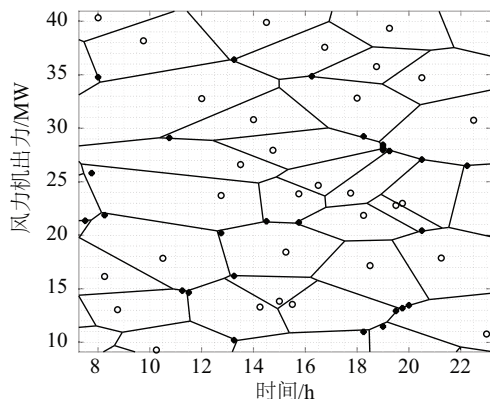
$$V(p_i, p_j) = \{p \in S \mid \|p - p_i\| \leq \|p - p_j\|, \forall j \neq i\} \quad (9)$$

式中:  $V(p_i, p_j)$ ——被点  $p_i$  和  $p_j$  连线的垂直平分线分割的平面, 如图 5a 所示。

在分属于原采样点的各区域内选取距离原采样点距离



a. Voronoi 平面分割



b. Voronoi 分区结果

图5 Voronoi 分区采样

Fig. 5 Voronoi partition sampling

最远的作为新采样点,如图 5b 所示。假设初始采样点有  $m$  个,新的采样点定义为:

$$p_{m+1} = \arg \max_{p \in S_i} \|p - p_i\| \quad (10)$$

将新的采样点加入已有采样点中,共得到  $2 \times m$  个采样点,如图 6 所示,以此作为风力机出力大小,能使采样数据均匀遍布样本空间,捕捉特殊样本点,更好地模拟实际风力机出力数据。

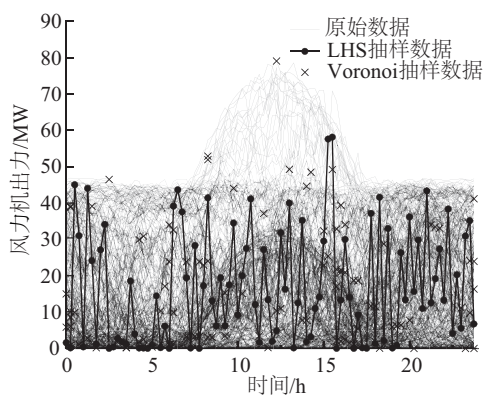


图6 采样结果

Fig. 6 Sampling results

## 4.2 四机二区测试系统仿真

将风光火打捆外送系统经交流输电线路接入标准 IEEE 4 机 2 区系统,详细参数见参考文献[31]。本文使用 Matlab/Simulink 构建模型,用风电和光电的单机模型代替集总模型,如图 7 所示。其中,风电、光电和火电打捆后接入母线 06, STATCOM 并联接入母线 08, UPFC-POD 接入母线 08 与 09 之间。发电机基准容量为 100 MVA,频率 50 Hz,风力机出力按照 LHS-Voronoi 采样结果依次代入,光伏出力 40 MW,火电机组出力 300 MW。本文选取反馈响应时间较短的联络线有功功率作为反馈信号。

取 3.2 节评价矩阵  $A$  每一列均值,得到控制器各参数平均得分情况,如附录表 D1 所示,表 D1 中负值表示该特征在

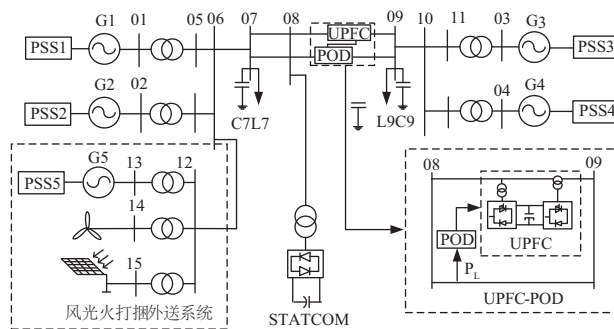


图7 风光火打捆接入 IEEE 4 机 2 区

Fig. 7 WPTB accessing to IEEE 4 machine 2 area system

模型中起到负面作用,该参数变化可能对阻尼比大小产生不利影响。本文选取重要性正向排序前 19 的参数作为关键参数进行优化。

通过计算优化前后的特征值和阻尼比可直观看出系统小干扰稳定性程度,对于多工况下的系统采用其均值来表示,利用特征值虚部划分低频振荡模式。计算结果如表 2 所示。

表2 优化前后特征值均值

Table 2 Mean of eigenvalues before and after optimization

|     | 模式 | 特征值实部均值 | 阻尼比均值  | 振荡机组       |
|-----|----|---------|--------|------------|
| 优化前 | 1  | -1.2382 | 0.1894 | G1, G2     |
|     | 2  | -1.4251 | 0.2486 | G3, G4     |
|     | 3  | -0.8541 | 0.1991 | G1, G2, G5 |
|     | 4  | -0.2897 | 0.0848 | G3, G4, G5 |
|     | 5  | -0.2828 | 0.4031 | ALL        |
| 优化后 | 1  | -2.3171 | 0.2637 | G1, G2     |
|     | 2  | -1.4668 | 0.2511 | G3, G4     |
|     | 3  | -1.2974 | 0.3046 | G1, G2, G5 |
|     | 4  | -0.8408 | 0.2776 | G3, G4, G5 |
|     | 5  | -0.2893 | 0.4156 | ALL        |

从表 2 中可看出,系统在 5 种振荡模式下的特征值实部均值和阻尼比均值在优化后均有相应改善,其中模式 1 的改善效果最明显,特征值实部均值左移 0.5511,阻尼比均值增加了 19.28%。其余 4 种模式下的特征值实部均值分别左移 1.0789、0.0417、0.4433 和 0.0065。阻尼比均值分别增加 7.43%、0.25%、10.55% 和 1.25%。表明经过优化后的系统抗干扰能力更强,有助于提高系统小干扰稳定运行能力。

概率密度图反映了事件在取值范围内发生的概率,在本文中指多工况下特征值实部值和阻尼比的值,可直观看出优化前后的概率分布情况,如图 8 和图 9 所示。从中可看出,5 种振荡模式的特征值实部在优化后均左移,更加远离 0,且阻尼比在优化后均存在右移,表明优化后的系统更加稳定。

### 4.2.1 改变光伏出力下的仿真

为进一步验证优化效果,通过改变光伏出力对相同控制

器参数下的系统进行仿真。光伏出力设置为 30、50 和 60 MW。特征值分析结果如附录表 D2 所示。从表 D2 中可看出,优化后 5 种模式下系统特征值实部均左移,且阻尼比均右移,模式 4 的优化效果明显,特征值实部左移 0.5421,阻尼比右移 19.12%。其余 4 种模式下特征值实部分别左移 1.0929、0.043、0.4377 和 0.0069。阻尼比分别右移 7.46%、

0.28%、10.46% 和 1.26%,保证了系统稳定性。

累积分布函数是概率密度函数的积分,能完整描述随机变量的分布。本文利用累积分布函数图对优化前后的特征根实部和阻尼比的值进行可视化处理,结果如图 10 所示,从图 10 中可直观看出系统优化前后特征值实部和阻尼比在坐标轴上的变化情况,说明系统稳定性得到改善。

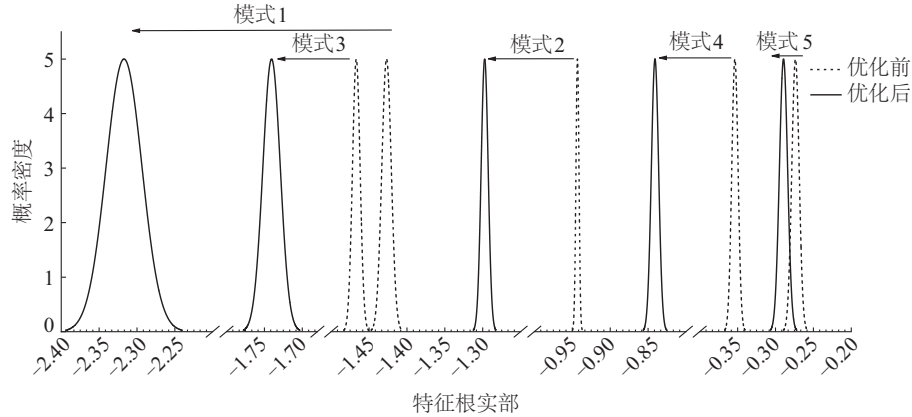


图 8 优化前后特征根实部概率分布

Fig. 8 Probability distribution of real part of feature root before and after optimization

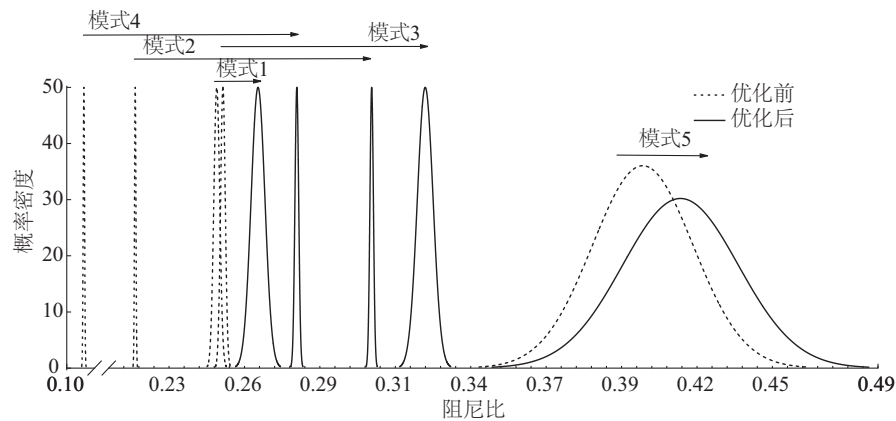
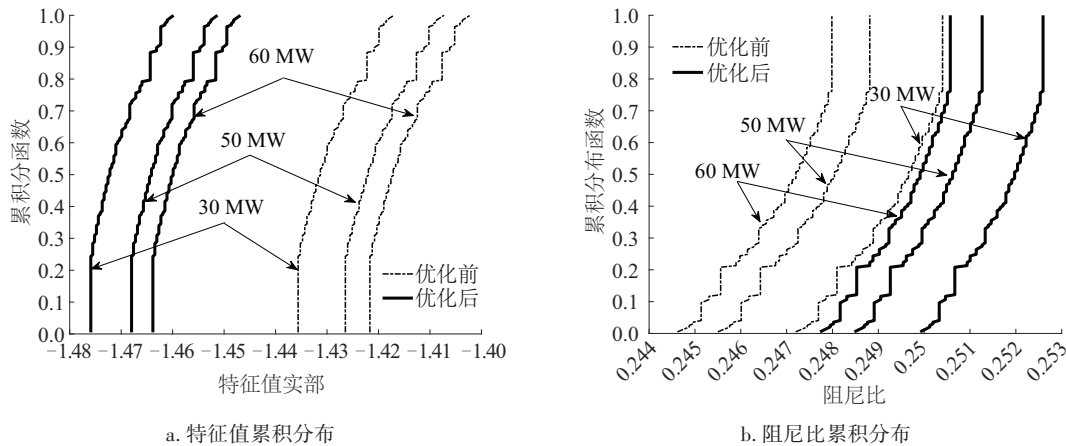


图 9 优化前后阻尼比概率分布

Fig. 9 Probability distribution of damping ratio before and after optimization



a. 特征值累积分布

b. 阻尼比累积分布

图 10 振荡模式 2 下的累积分布函数

Fig. 10 Plot of cumulative distribution function in oscillation mode 2

#### 4.2.2 改变负荷功率下的仿真

为进一步验证系统优化后的稳定性,优化后控制器参数不变,固定光伏出力为 40 MW,负荷功率随机波动,对比优化前后效果,其特征值分析结果如附录表 D3 所示。同时通过时域仿真对系统功角曲线和有功动态响应曲线进行分析。在母线 06 处设置三相短路故障,故障开始时间为 1.2 s,故障清除时间为 1.3 s,仿真时间 20 s。对比优化前后系统响应曲线变化情况。以负荷功率为 960 和 1100 MW 为例,时域仿真结果如图 11 所示。从图 11 中可看出,负荷功率为 960 MW 时,优

化后的系统功角振荡幅值分别减少 0.04 和 0.055 pu,恢复稳定所需时间分别减少 7 和 9 s。发电机有功响应曲线恢复稳定时间所需时间减少 2 s。负荷功率为 1100 MW 时,优化后的系统功角振荡幅值分别减少 0.03 和 0.05 pu,恢复稳定所需时间分别减少 6 和 8 s。发电机有功响应曲线变化不大。

#### 4.3 新英格兰-纽约输电系统仿真

将本文所提概率稳定性优化策略应用于更复杂的 16 机 5 区测试系统,即新英格兰-纽约输电系统(New York power system-New England test system, NYPS-NETS),如图 12 所示。

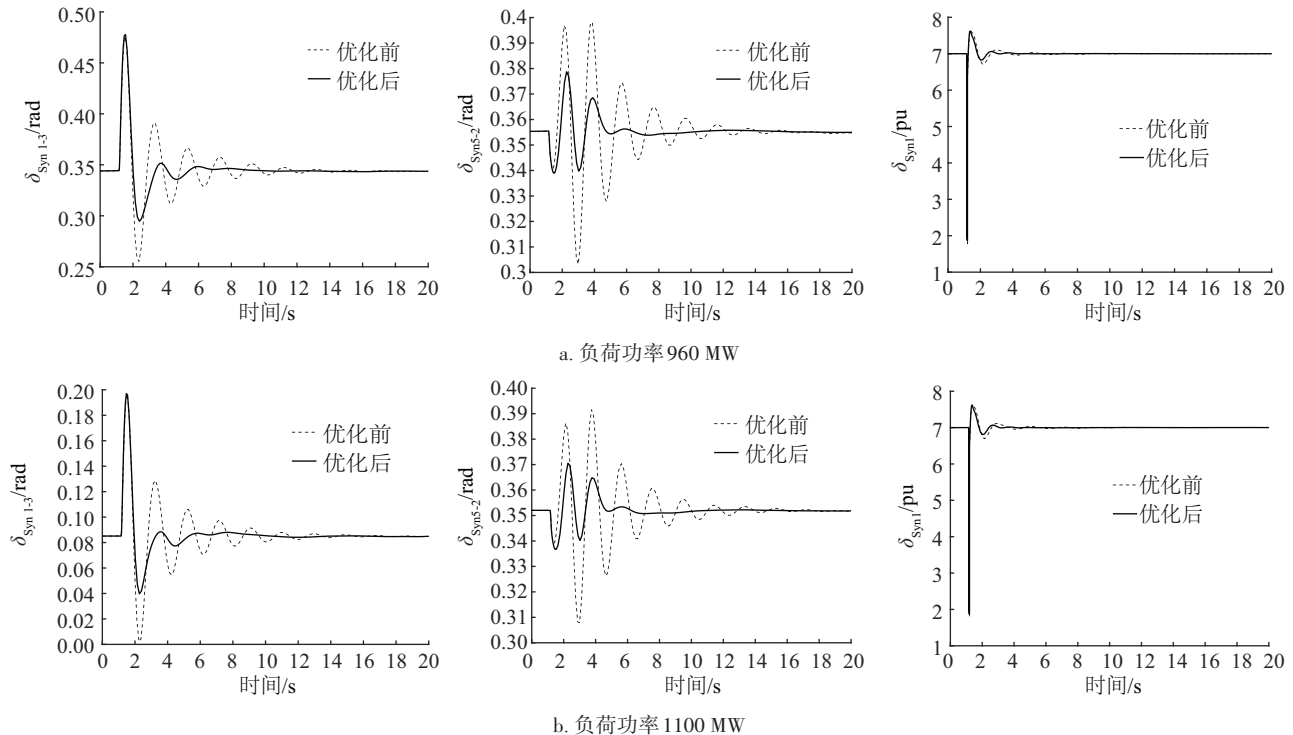


图 11 改变负荷下的时域仿真分析结果

Fig. 11 Results of time domain simulation analysis under varying load

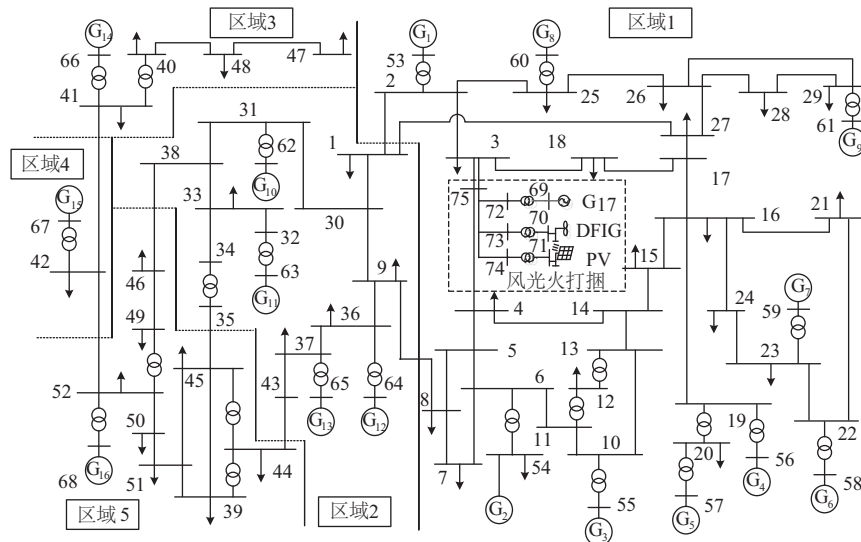


图 12 风光火打捆接入新英格兰-纽约输电系统

Fig. 12 WPTB connecting to NYPS-NETS transmission system

在该系统中,发电机  $G_1 \sim G_9$  位于新英格兰,发电机  $G_{10} \sim G_{16}$  位于纽约及其附近地区。WPTB 系统连接到总线 03,  $G_{13} \sim G_{16}$  配备 PSS。STATCOM 安装到总线 1, UPFC-POD

并联安装到总线 75 到总线 03 之间。此时光伏和火电出力分别为 40 和 200 MW。系统优化前后结果如图 13、图 14 所示。

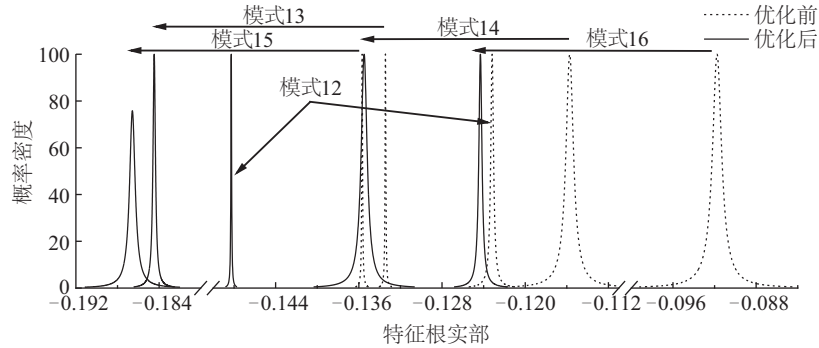


图 13 新英格兰-纽约输电系统优化前后特征根实部概率分布

Fig. 13 Real part probability distribution of feature root before and after optimization of NYPS-NETS

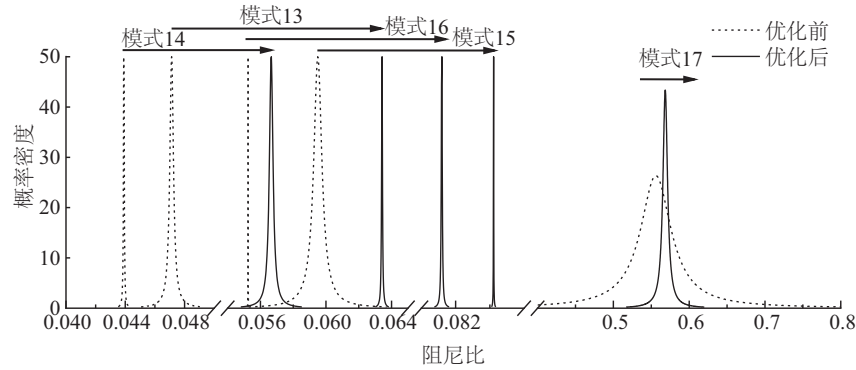


图 14 新英格兰-纽约输电系统优化前后阻尼比概率分布

Fig. 14 Probability distribution of damping ratio before and after optimization of NYPS-NETS

从图 13 和图 14 的概率分布可看出,优化前差异明显,不同运行方式、不同低频振荡模式下系统特征根实部的值在坐标轴上左移、阻尼比右移,系统在多运行方式下的稳定性得到提升。

此时固定风电出力 50 MW,在总线 52 处添加三相短路

故障,故障时间  $t_s = 2$  s,故障持续时间 0.1 s,优化前后系统时域仿真结果如图 15 所示。从中可看出,优化后的系统相对功角、母线电压和同步机有功偏差值得到了明显改善,缩短了系统恢复稳定所需时间,系统的鲁棒性得到了增强。

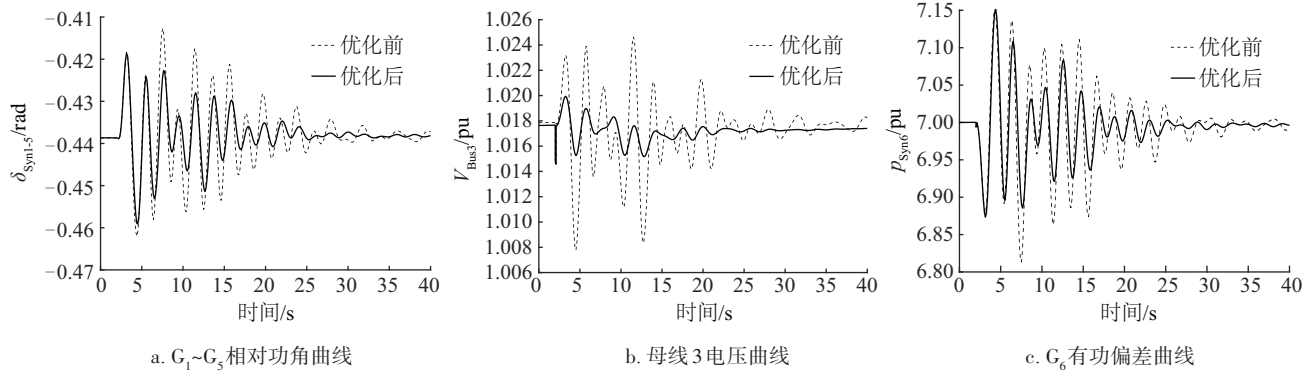


图 15 新英格兰-纽约输电系统优化前后时域仿真结果

Fig. 15 Time domain simulation results before and after optimization of NYPS-NETS



## 5 结 论

本文旨在考虑风电出力波动的情况下改善风光火打捆外送系统稳定性。将混合改进策略引入到蜣螂优化算法中并用于控制器参数优化,在多工况进行仿真验证所提方法的有效性,主要结论如下:

1) 基于李雅普诺夫稳定准则和概率论方法构造系统稳定性目标函数,考虑了风电出力波动性对系统稳定性带来的影响,利用 HDBO 对多控制器参数进行优化可以有效提高系统阻尼比,维持系统稳定运行。

2) 将改进策略与 DBO 算法本身特点相结合得到的 HDBO 算法可有效改善 DBO 算法易陷入局部最优和收敛速度慢等问题,并在测试函数和其他改进算法对比中具有良好表现。

3) 随机森林袋外数据分析可通过运行数据识别出对系统稳定性影响较大的控制器参数,只对这些参数进行优化可增加计算效率并具有良好效果。

附录网盘地址: [https://pan.baidu.com/s/1p2ffHgMcVpA\\_k2-GpQKkcg](https://pan.baidu.com/s/1p2ffHgMcVpA_k2-GpQKkcg), 提取码: pwd=gxfc

### [参考文献]

- [1] 王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 152-163.  
WANG H X, LIU M Q, DONG H N, et al. Review on analysis and suppression of low-frequency oscillation in power system with high penetration of renewable energy sources [J]. Electric power automation equipment, 2023, 43(9): 152-163.
- [2] 程静, 苏乐, 岳雷. 新能源接入电力系统的宽频振荡风险识别与抑制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 565-574.  
CHENG J, SU L, YUE L. Power system broadband oscillation risk identification and suppression for new energy access [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(11): 565-574.
- [3] 和萍, 方祺元, 武小鹏, 等. 风光火打捆外送系统 STATCOM-POD协调优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 78-87.  
HE P, FANG Q Y, WU X P, et al. Coordinated optimization design of STATCOM-POD for a wind-PV-thermal-bundled power transmission system [J]. Power system protection and control, 2022, 50(1): 78-87.
- [4] 夏芹芹, 罗永捷, 王荣茂, 等. 考虑新能源爬坡的风光火耦合系统源荷匹配性分析及容量优化配置[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(1): 69-81.  
XIA Q Q, LUO Y J, WANG R M, et al. Source-load matching analysis and optimal planning of wind-solar-thermal coupled system considering renewable energy ramps [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(1): 69-81.
- [5] 余明昊, 顾雪平, 李少岩. 风光火打捆系统暂态稳定性及其虚拟同步机策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 10-18.  
YU M H, GU X P, LI S Y. Research on transient stability of bundled wind-photovoltaic-thermal system and its virtual synchronous generator strategy [J]. Journal of North China Electric Power University (natural science edition), 2023, 50(5): 10-18.
- [6] 徐式蕴, 李宗翰, 赵兵, 等. 新型电力系统标准算例(一): 功角稳定 CSEE-RAS[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5973-5984.  
XU S Y, LI Z H, ZHAO B, et al. Benchmark for AC-DC hybrid system with high penetration of renewables ( I ): rotor angle stability CSEE-RAS [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5973-5984.
- [7] 侯恺, 刘泽宇, 贾宏杰, 等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2697-2710.  
HOU K, LIU Z Y, JIA H J, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy [J]. High voltage engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.
- [8] KAMARPOSHTI M A, COLAK I, IWENDI C, et al. Optimal coordination of PSS and SSSC controllers in power system using ant colony optimization algorithm [J]. Journal of circuits, systems and computers, 2022, 31(4): 2250060.
- [9] DEVARAPALLI R, SINHA N K, GARCÍA MÁRQUEZ F P. A review on the computational methods of power system stabilizer for damping power network oscillations [J]. Archives of computational methods in engineering, 2022, 29(6): 3713-3739.
- [10] BEZA M, BONGIORNO M. A modified RLS algorithm for online estimation of low-frequency oscillations in power systems [J]. IEEE transactions on power systems, 2016, 31(3): 1703-1714.
- [11] NIU Y T. Coordinated optimization of parameters of PSS and UPFC-PODCs to improve small-signal stability of a power system with renewable energy generation [C]//2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). Shiga, Japan, 2021: 249-254.
- [12] HUANG J K, YANG Z F, YU J, et al. Optimization for DFIG fast frequency response with small-signal stability

- constraint [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2021, 36(3): 2452-2462.
- [13] 马燕峰, 景雪, 赵书强, 等. 光伏接入系统的小干扰稳定灵敏度分析及其应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 70-75.
- MA Y F, JING X, ZHAO S Q, et al. Analysis and application of small disturbance stability sensitivity of photovoltaic accessed system [J]. Electric power automation equipment, 2021, 41(8): 70-75.
- [14] BHUKYA J, MAHAJAN V. Parameter tuning of PSS and STATCOM controllers using genetic algorithm for improvement of small-signal and transient stability of power systems with wind power [J]. International transactions on electrical energy systems, 2021, 31(7): e12912.
- [15] HE P, JIN H R, PAN Z W, et al. Optimal strategy for enhancing probabilistic small-signal stability in a power system with wind-PV-thermal bundled transmission [J]. Journal of energy engineering, 2023, 149(3): 04023014.
- [16] 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 H S, LI Y R, LI W H, et al. Stepwise identification method of control parameters for DFIG based on composite optimization algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(4): 247-256.
- [17] 李东东, 罗丁, 孙梦显, 等. 适用于 VSC-HVDC 和 PMSG 并网系统的宽频振荡稳定性判据及阻尼优化控制[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 110-117.
- LI D D, LUO D, SUN M X, et al. Broadband oscillation stability criteria and damping optimization control for VSC-HVDC and PMSG grid-connected system [J]. Electric power automation equipment, 2025, 45(4): 110-117.
- [18] 朱介北, 黄闽杰, 俞露杰, 等. 基于马尔科夫转换场与深度确定性策略梯度算法的 VSC-HVDC 系统控制参数优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(5): 1821-1832.
- ZHU J B, HUANG M J, YU L J, et al. The optimization method of control parameters for VSC-HVDC system based on Markov transition field and deep deterministic policy gradient algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(5): 1821-1832.
- [19] DEVARAPALLI R, BHATTACHARYYA B, SINHA N K, et al. Amended GWO approach based multi-machine power system stability enhancement [J]. ISA transactions, 2021, 109: 152-174.
- [20] DEVARAPALLI R, BHATTACHARYYA B. A hybrid modified grey wolf optimization-sine cosine algorithm-based power system stabilizer parameter tuning in a multimachine power system [J]. Optimal control applications and methods, 2020, 41(4): 1143-1159.
- [21] ALSHAMMARI B M, GUESMI T. New chaotic sunflower optimization algorithm for optimal tuning of power system stabilizers [J]. Journal of electrical engineering & technology, 2020, 15(5): 1985-1997.
- [22] 熊浩清, 何鹏飞, 孙冉, 等. 双馈风电场无串补并网振荡场景及关键影响因素研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 670-685.
- XIONG H Q, HE P F, SUN R, et al. Oscillation scenarios of grid integrated wind farm with DFIGs without series compensation and effects of key factors [J]. High voltage engineering, 2024, 50(2): 670-685.
- [23] 董存, 王铮, 白捷予, 等. 光伏发电功率超短期预测方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2938-2951.
- DONG C, WANG Z, BAI J Y, et al. Review of ultra-short-term forecasting methods for photovoltaic power generation [J]. High voltage engineering, 2023, 49(7): 2938-2951.
- [24] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. The journal of supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [25] 席磊, 彭典名, 曹伟, 等. 数据驱动算法的电力信息物理系统 FDIA 定位检测[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7110-7122.
- XI L, PENG D M, CAO W, et al. FDIA location detection for data-driven algorithms in cyber-physical power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7110-7122.
- [26] 葛晓琳, 章国耀, 符杨, 等. 基于改进鲸鱼算法的含风电电力系统动态安全预防控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 98-110.
- GE X L, ZHANG G Y, FU Y, et al. Dynamic security preventive control strategy for wind power systems based on improved whale algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 98-110.
- [27] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in engineering software, 2014, 69: 46-61.
- [28] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. 2016, 95(C): 51-67.
- [29] 赵如意, 王晓辉, 郑碧煌, 等. 基于特征优化和混合改进灰狼算法优化 BiLSTM 网络的短期光伏功率预测[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 209-222.
- ZHAO R Y, WANG X H, ZHENG B H, et al. Short-term photovoltaic power prediction based on feature optimization and hybrid improved grey wolf algorithm-optimized BiLSTM network [J]. Power system technology, 2025, 49(1): 209-222.
- [30] 刘杰, 从兰美, 夏远洋, 等. 基于 DBO-VMD 和 IWOA-

BILSTM神经网络组合模型的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 123-133.

LIU J, CONG L M, XIA Y Y, et al. Short-term power load prediction based on DBO-VMD and an IWOA-BILSTM

neural network combination model [J]. Power system protection and control, 2024, 52(8): 123-133.

[31] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

## PROBABILISTIC SMALL DISTURBANCE STABILITY OPTIMIZATION CONTROL OF WPTB POWER TRANSMISSION SYSTEM

He Ping, Pan Zhiwen, Li Congshan, Tao Yukun, Liu Zemeng, Liu Xinyan

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To mitigate the adverse effects of wind power output fluctuations, low-frequency oscillations, and multi-controller coupling in power systems, this paper proposes a coordinated optimization strategy for multi-controller parameters under diverse operating conditions. Firstly, a Simulink model of the wind-PV-thermal bundled power transmission system and its controllers is established. Typical wind power output scenarios are generated using the Voronoi partition sampling method. Subsequently, the objective function for the optimization problem is formulated based on probabilistic methods, and critical controller parameters for optimization are identified via random forest regression analysis. Finally, an improved hybrid dung beetle optimizer is employed to coordinately optimize these key controller parameters across multiple operating scenarios. Simulation results on the IEEE 4-machine 2-area system and the 16-machine 5-area system demonstrate that optimizing the extracted controller parameters effectively enhances system damping. This significantly suppresses fluctuations in active power, power angles, and other system variables caused by low-frequency oscillations, thereby validating the efficacy of the proposed probabilistic optimization approach.

**Keywords:** renewable energy; small interference stability analysis; low-frequency oscillations; artificial intelligence methods; parameter optimization