

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240683

# 考虑相关性的配电网分布式光伏承载能力提升方法

赵洪山<sup>1</sup>, 胡 湏<sup>1</sup>, 魏 伟<sup>2</sup>, 温开云<sup>1</sup>

(1. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 国网湖北省电力有限公司营销服务中心(计量中心), 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 配电网中分布式光伏渗透率的不断提升对其充分消纳提出了更高的要求。针对配电网分布式光伏承载能力提升的问题, 提出一种考虑相关性的分布式光伏承载能力提升方法。首先, 利用 Frank-Copula 函数描述分布式光伏出力与负荷间的相关性, 基于 Nataf 变换得到各随机变量的相关性样本矩阵, 并进行概率潮流计算。然后, 以分布式光伏接入容量最大为目标, 电网运行安全指标为约束, 建立分布式光伏承载能力提升模型。最后, 提出采用非线性反向学习鲸鱼算法对模型进行求解, 以 IEEE 33 节点系统为算例进行仿真分析。结果表明, 所提方法能够有效提升配电网分布式光伏承载能力。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏; 相关性; 承载能力; 非线性反向学习鲸鱼算法

## A method to improve the carrying capacity of a distributed photovoltaic power distribution network considering correlation

ZHAO Hongshan<sup>1</sup>, HU Zhen<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>, WEN Kaiyun<sup>1</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center (Measurement Center), Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The increasing penetration rate of distributed PV in the distribution network entails higher requirements for its full absorption. To improve the carrying capacity of distributed PV in a distribution network, a method to achieve that considering correlation is proposed. First, the correlation between distributed PV output and load is described by the Frank-Copula function, and the correlation sample matrix of each random variable is obtained based on the Nataf transform, and the probabilistic power flow is calculated. Then, with the target of maximum distributed PV access capacity and the constraint of the power grid operation safety index, a distributed PV capacity enhancement model is established. Finally, the nonlinear reverse learning whale algorithm is proposed to analyze the model, and the IEEE33-node system is taken as an example for simulation analysis. The results show that the proposed method can effectively improve the distributed photovoltaic carrying capacity of the network.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5700-202255222A-1-1-ZN).

**Key words:** distribution network; distributed photovoltaic; correlation; carrying capacity; nonlinear reverse learning whale algorithm

## 0 引言

在环境污染和化石能源短缺的大背景下, 国家提出了“双碳”目标, 分布式光伏作为一种灵活的清洁能源得到了大力发展, 其在电网中的渗透率正

逐年攀升<sup>[1-3]</sup>。然而, 分布式光伏出力由于受外界气候环境的影响具有随机性和波动性, 且光伏出力与负荷之间存在一定的相关性, 在光伏渗透率不断提高的背景下会增加节点电压越限和线路过载等风险<sup>[4-6]</sup>, 限制分布式光伏接入配电网容量。因此, 研究考虑不确定因素影响的配电网分布式光伏承载能力具有重大意义<sup>[7]</sup>。

目前, 国内外学者已对配电网分布式光伏承载

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助(5700-202255222A-1-1-ZN)

能力评估进行了相关研究。分布式光伏承载能力通常是指电力系统在不影响电网稳定性和安全性的前提下,能够接入的光伏最大容量<sup>[8]</sup>。文献[9]建立了光伏选址定容双层规划模型,采用天牛须-粒子群算法进行求解。文献[10]提出了一种基于光伏重心理论的光伏最大准入容量新算法,在不同光伏接入场景下可实现最大准入容量的快速准确计算。文献[11]考虑新能源出力的随机性,以分布式新能源承载能力最大为目标,基于二阶锥松弛对承载能力求解模型进行转换。文献[12]构建太阳能光伏发电降阶动态模型,考虑电力系统小信号稳定性约束,采用动态仿真方法来估计分布式光伏的最大渗透水平。上述文献分别从不同角度对配电网分布式光伏承载能力进行研究,但未考虑光伏出力和负荷间相关性的影响。由于分布式光伏之间、分布式光伏与负荷间<sup>[13]</sup>以及负荷之间<sup>[14]</sup>往往存在一定的相关性,这些相关性会对电网稳定性和安全性产生影响,因此研究分布式光伏承载能力需要考虑相关性。

在分布式光伏承载能力评估的基础上,改进评估模型引入承载能力提升技术更具有实际意义。文献[15]考虑高渗透率分布式接入电网造成的节点电压越限问题,采用光伏逆变器功率因数调整措施,以提升配电网分布式光伏承载能力。文献[16]提出了一种用于静态同步补偿器的自适应控制器,通过调节稳态电压和动态电压提升光伏静态承载能力和动态承载能力。文献[17]建立了电池储能系统分层优化规划模型,通过在配电网中接入储能提升电网新能源消纳能力。文献[18]针对最小切换次数下满足每小时承载能力要求的多周期网络重构问题,提出了一种求解约束大规模非线性整数优化问题的四阶段求解方法,得到每个时间段的最优网络拓扑。然而,单独使用一种技术对分布式光伏承载能力的提升效果有限,需要对不同提升措施进行组合以适应实际配电网中的不同场景,更大程度地提升配电网分布式光伏承载能力。

本文提出一种考虑相关性的配电网分布式光伏承载能力提升方法。利用 Frank-Copula 函数描述光伏出力和负荷间的相关性,基于 Nataf 变换得到分布式光伏出力和负荷的相关性样本矩阵,并进行概率潮流计算。以分布式光伏接入容量最大为目标函数,电网运行安全指标为约束条件,并考虑多种分布式光伏承载能力提升措施,建立分布式光伏承载能力提升模型。提出采用非线性反向学习鲸鱼算法对模型进行求解,并在 IEEE 33 节点算例上进行了仿真,验证了模型的优越性。

## 1 概率建模和相关性建模

### 1.1 光伏出力的概率模型

太阳辐射强度是影响分布式光伏出力的主要因素,近似服从 Beta 分布<sup>[19]</sup>,分布式光伏出力与太阳辐射强度呈线性关系,其概率密度函数  $f(P_{PV})$  可表示为

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{P_{PV}}{P_{PVmax}} \right)^{\alpha-1} \cdot \left( 1 - \frac{P_{PV}}{P_{PVmax}} \right)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中:  $\Gamma$  为 Gamma 函数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为 Beta 分布的形状参数;  $P_{PV}$ 、 $P_{PVmax}$  分别为分布式光伏输出功率和最大输出功率。

### 1.2 负荷的概率模型

针对一般的日常负荷变化,采用正态分布<sup>[20]</sup>近似描述负荷概率模型的分布,其概率密度函数为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{PL}} \exp\left(-\frac{(P_L - \mu_{PL})^2}{2\sigma_{PL}^2}\right) \quad (2)$$

$$f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{QL}} \exp\left(-\frac{(Q_L - \mu_{QL})^2}{2\sigma_{QL}^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $P_L$ 、 $Q_L$  分别为负荷注入电网中的有功、无功功率;  $\sigma_{PL}$ 、 $\sigma_{QL}$  分别为负荷有功、无功功率的标准差;  $\mu_{PL}$ 、 $\mu_{QL}$  分别为负荷有功、无功功率的期望。

### 1.3 基于 Copula 函数的不确定性变量相关性建模

考虑到光伏出力、负荷各随机变量间存在一定的相关性,采用 Copula 函数描述其相关性,对于任意两个随机变量之间的相关性分析,具体步骤如下所述。

#### 1) 确定边缘分布

结合实测的历史功率数据,采用核密度估计法计算两随机变量的边缘分布,对于给定的数据样本  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  和  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 通过将每个数据点用一个核函数替换,并对所有核函数进行求和得到概率密度估计。

$$\hat{f}_X(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (4)$$

$$\hat{f}_Y(y) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{y-y_i}{h}\right) \quad (5)$$

$$u = \int_{-\infty}^x \hat{f}_X(t) dt \quad (6)$$

$$v = \int_{-\infty}^y \hat{f}_Y(t) dt \quad (7)$$

式中:  $\hat{f}_X(x)$ 、 $\hat{f}_Y(y)$  分别为在点  $x$ 、 $y$  处的概率密

度估计;  $n$  为样本数量;  $h$  为带宽(平滑参数), 控制平滑程度;  $K(\cdot)$  为高斯核函数;  $u$ 、 $v$  分别为随机变量边缘分布的累积分布函数值。

### 2) Copula 参数估计

采用 Copula 函数将两随机变量的边缘分布组合成一个多维分布, 从而描述它们之间的相关性。在众多 Copula 函数中, Frank-Copula 函数能够灵活描述从负相关到正相关的全范围, 对称性好且参数估计简单易于实现, 其表达式为

$$C(u, v; \theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right] \quad (8)$$

式中:  $C(u, v; \theta)$  为 Frank-Copula 的累积分布函数;  $\theta$  为相关性参数, 可以通过最大似然估计方法得出。

### 3) 相关性分析

根据得到的相关性参数  $\theta$ , 计算 Kendall 秩相关系数  $\rho$  来衡量两随机变量之间的相关性。

$$\rho = 1 - \frac{4}{\theta} + \frac{4}{\theta^2} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt \quad (9)$$

### 4) 相关性场景生成

利用拟合好的 Frank-Copula 函数, 从联合分布中采样生成新的样本  $(u'_i, v'_i)$ , 这些样本保持原有的相关性, 然后将  $(u'_i, v'_i)$  通过边缘分布的逆变换, 将采样数据转化为光伏出力 and 负荷场景。

## 2 基于 Nataf 变换的相关性样本矩阵构造

本节采用 Nataf 变换处理各随机变量之间的相关性, 得到分布式光伏出力和负荷的相关性样本矩阵, 具体过程如下。

1) 以配电网中各节点接入的分布式光伏电源和各节点负荷作为输入随机向量  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_m]$ ,  $m$  为随机变量的数量。通过对相关性场景数据拟合得到光伏出力 Beta 分布与负荷正态分布的参数。

2) 构建各相关随机变量的相关系数矩阵  $\rho$ , 如式(10)所示。

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3) 基于 Nataf 变换将相关的随机向量  $\mathbf{X}$  映射到独立标准正态随机向量  $\mathbf{Z}$ 。

首先根据式(11)得到标准正态分布随机向量  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]$ 。

$$Y_i = \Phi^{-1}(F(X_i)) \quad (11)$$

式中:  $Y_i$  为正态变量;  $\Phi^{-1}$  为标准正态分布的逆函数;  $F(X_i)$  为随机变量  $X_i$  的累积分布函数。

设  $\mathbf{Y}$  的相关系数矩阵为  $\omega$ , 根据 Nataf 变换,  $\rho_{ij}$ 、 $\omega_{ij}$  满足式(12)、式(13)。

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(X_i - \mu_i)}{\sigma_i} \cdot \frac{(X_j - \mu_j)}{\sigma_j} f_{ij}(X_i, X_j) dX_i dX_j \quad (12)$$

其中

$$f_{ij}(X_i, X_j) dX_i dX_j = \phi(Y_i, Y_j, \omega_{ij}) dY_i dY_j \quad (13)$$

式中:  $\mu_i$ 、 $\mu_j$  和  $\sigma_i$ 、 $\sigma_j$  分别为随机变量  $X_i$  和  $X_j$  的期望和标准差;  $\phi(Y_i, Y_j, \omega_{ij})$  为随机变量  $Y_i$  和  $Y_j$  的联合分布函数;  $\omega_{ij}$  根据数值积分和求根算法求取。

对  $\omega$  进行 Cholesky 分解获得下三角矩阵  $\mathbf{B}$  如式(14)所示。

$$\omega = \mathbf{B}\mathbf{B}^T \quad (14)$$

最后根据式(11)将  $\mathbf{Y}$  转换为一个新的独立标准正态随机向量  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_m]$ , 如式(15)所示。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{Y} \quad (15)$$

4) 对于每个变量  $Z_i$ , 采用三点估计法<sup>[21]</sup>(three-point estimate method, 3PEM)并结合矩匹配原理计算其采样值  $Z_{i,k}$  及相应的权重  $\theta_{Zi,k}$ 。

对于独立标准正态变量  $Z_i$ , 选择能够反映该变量的前四阶矩(均值、方差、偏度、峰度)的值作为采样值和相应的权重。

由于标准正态分布的前四阶矩为 0(均值)、1(方差)、0(偏度)和 3(峰度), 因此选择采样值  $Z_{i,k}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 分别为 0、 $\sqrt{3}$  和  $-\sqrt{3}$ , 采样值 0 即变量的均值, 采样值  $\sqrt{3}$  和  $-\sqrt{3}$  能较好地反映标准正态分布的尾部特性, 因此这 3 个采样点能够覆盖大部分的概率密度区域; 相应的权重  $\theta_{Zi,k}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 分别为 2/3、1/6 和 1/6, 该权重分配可以保障用这 3 个点来估计函数的期望和方差时, 得到的结果尽可能接近实际值。

5) 根据变量  $Z_i$  的采样点  $\mathbf{Z}_{i,k}$  构造  $2m+1$  个待评价向量, 建立评价矩阵  $\mathbf{M}$ 。

每个随机变量  $Z_i$  存在 3 个特定的采样点, 因此需要进行  $3m$  次评价, 但由于变量  $Z_i$  等于其均值时只需进行一次评价, 因此进行  $2m+1$  次评价即可, 建立评价矩阵  $\mathbf{M} = [\mathbf{Z}_{1,1}, \mathbf{Z}_{1,2}, \dots, \mathbf{Z}_{m,1}, \mathbf{Z}_{m,2}, \mathbf{Z}_{2m+1}]$ 。

6) 基于 Nataf 逆变换将待评价矩阵  $\mathbf{M}$  从标准正态空间反变换回原始变量空间形成评价矩阵  $\mathbf{N}$ , 即

分布式光伏出力和负荷的相关性样本矩阵。

### 3 考虑相关性的分布式光伏承载能力提升模型

本节以分布式光伏接入容量最大为目标，电网运行安全指标为约束，并考虑分布式光伏逆变器无功调节、附加无功补偿装置调节、有载调压变压器分接头调节等分布式光伏承载能力提升措施，利用机会约束规划<sup>[22]</sup>建立分布式光伏承载能力提升模型。

#### 3.1 目标函数

以配电网接入分布式光伏容量  $f$  最大为目标，具体数学表达式为

$$\max f = \sum_{i=1}^N S_{PV,i} \quad (16)$$

式中： $N$  为配电网节点总数； $S_{PV,i}$  为节点  $i$  处接入的分布式光伏总容量。

#### 3.2 约束条件

##### 3.2.1 电网运行安全约束

###### 1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{PV,i} - P_{L,i} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{PV,i} - Q_{L,i} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_{PV,i}$ 、 $Q_{PV,i}$  分别为节点  $i$  上光伏的有功、无功功率； $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$  分别为节点  $i$  上负荷的有功、无功功率； $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  间的线路电导、电纳； $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间的功率角。

###### 2) 分布式光伏安装容量约束

各个节点可接入的分布式光伏容量存在一个上限值。

$$\begin{cases} 0 \leq k_i P_{PV,i,0} \leq P_{PV,max,i} \\ -Q_{PV,max,i} \leq k_i Q_{PV,i,0} \leq Q_{PV,max,i} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $k_i$  为节点  $i$  处的分布式光伏数量； $P_{PV,i,0}$ 、 $Q_{PV,i,0}$  分别为节点  $i$  接入的单台分布式光伏有功、无功出力； $P_{PV,max,i}$ 、 $Q_{PV,max,i}$  分别为节点  $i$  接入的分布式光伏有功、无功出力上限。

###### 3) 节点电压机会约束

分布式光伏并入配电网时应确保不会导致电网电压在一定概率水平下超出预定的操作范围。

$$P_r \{U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max}\} \geq \beta_U \quad (19)$$

式中： $P_r$  为约束被满足的概率； $U_{i,max}$ 、 $U_{i,min}$  分别

为节点  $i$  电压幅值的最大、最小允许值； $\beta_U$  为满足节点电压约束的置信水平。

###### 4) 支路功率机会约束

分布式光伏并入配电网时应确保电网中支路功率在一定概率水平下不会超出其承受范围。

$$P_r \{S_{k,min} \leq S_k \leq S_{k,max}\} \geq \beta_S \quad (20)$$

式中： $S_{k,max}$ 、 $S_{k,min}$  分别为支路  $k$  功率的最大、最小允许值； $\beta_S$  为满足支路功率约束的置信水平。

##### 3.2.2 提升措施的约束条件

###### 1) 分布式光伏逆变器无功调约束

分布式光伏逆变器通过提供或吸收无功功率，能够有效地调节配电网中的电压水平以提升分布式光伏承载能力，分布式光伏无功调节的数学表达式为

$$P_{PV,i,0} \cdot \tan \phi_{min} \leq Q_{PV,i,0} \leq P_{PV,i,0} \cdot \tan \phi_{max} \quad (21)$$

式中： $\phi_{max}$ 、 $\phi_{min}$  分别为逆变器功率因数角的最大、最小允许值。

###### 2) 无功补偿装置调约束

无功补偿装置能够动态吸收或释放大功率，减少由于光伏发电波动引起的电压变化以维持电压在规定的安全范围内，同时无功调节可以改善功率因数以及减少线路损耗，其补偿无功功率的约束为

$$Q_{C,min} \leq Q_C \leq Q_{C,max} \quad (22)$$

式中： $Q_{C,max}$ 、 $Q_{C,min}$  分别为无功补偿装置补偿无功的上、下限； $Q_C$  为实际无功功率。

###### 3) 变压器分接头调约束

通过调整分接头位置可以降低变压器的输出电压，从而抵消分布式光伏发电对电网造成的电压升高效应，其调约束为

$$U_{ex} = U_{hi}(1 + \sigma k) \quad (23)$$

$$k_{min} \leq k \leq k_{max} \quad (24)$$

式中： $U_{ex}$  为变压器出口侧电压； $U_{hi}$  为变压器高压侧电压； $\sigma$  为分接头每调节一个挡位时匝数比改变的步长； $k$  为变压器分接头位置； $k_{max}$ 、 $k_{min}$  分别为有载调压变压器分接头可调节的最大、最小位置。

## 4 非线性反向学习鲸鱼优化算法求解模型

### 4.1 非线性多种群鲸鱼算法

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是Seyedali Mirjalili于2016年提出的一种模拟鲸鱼捕食行为的元启发式搜索算法<sup>[23]</sup>，已应用于无功调度<sup>[24]</sup>、路径规划<sup>[25]</sup>、风电预测<sup>[26]</sup>、电力故障诊断<sup>[27]</sup>等多个领域中，其求解流程可参考文献<sup>[28]</sup>。

针对传统 WOA 存在容易陷入局部最优解和收敛速度较慢的问题, 提出非线性反向学习鲸鱼优化算法(nonlinear opposition-based whale optimization algorithm, NOWOA), 通过非线性调控参数和引入反向学习策略以提高算法的灵活性和适应性。

#### 4.1.1 非线性调控机制

在传统 WOA 中, 控制参数  $a$  用于控制鲸鱼向最优解移动的强度, 随迭代次数线性从 2 递减到 0。为了增强其搜索能力, 采用非线性变换对  $a$  进行调整, 利用正弦函数引入周期性变化的特性。

$$a = 2 - 2 \sin\left(\frac{\pi t}{t_{\max}}\right) \quad (25)$$

式中:  $t$  为迭代次数;  $t_{\max}$  为最大迭代次数。

$a$  的调整依赖于迭代次数  $t$  的正弦函数, 在算法的早期和晚期阶段提供了较大的搜索范围, 而在中期则维持适中的搜索强度, 提高算法的性能。

#### 4.1.2 反向学习策略

传统 WOA 的多样性由初始种群和随机行为决定, 多样性较差, 因此引入反向学习策略<sup>[29]</sup>。

在每个迭代过程中, 对于种群中第  $i$  个鲸鱼第  $j$  维的解  $x_i^j(t)$ , 其反向解  $x_i^j(t)$  可以表示为

$$x_i^j(t) = l_i^j(t) + u_i^j(t) - x_i^j(t) \quad (26)$$

式中,  $u_i^j(t)$ 、 $l_i^j(t)$  分别为搜索空间的上、下限。

在每次更新后, 对于每个新位置的解, 计算其反向解, 并评估反向解的适应度, 如果反向解的适应度优于当前解, 那么用反向解替换当前解。通过引入反向学习策略, 可以增加种群的多样性, 降低算法陷入局部最优过早收敛的风险。

### 4.2 基于 NOWOA 求解模型

将 NOWOA 用于求解配电网分布式光伏承载能力提升模型, 其中优化变量为各节点接入的分布式光伏容量, 变量维数为配网中分布式光伏系统数量, 具体求解步骤如下所述。

1) 输入配电网参数, 对种群进行初始化, 同时初始化 NOWOA 参数。

2) 按标准 WOA 规则更新鲸鱼的位置, 更新算法参数, 其中对控制参数  $a$  采用 4.1 节提出的方法进行非线性调整。

3) 采用 Nataf 变换方法产生光伏出力 and 负荷的相关性样本矩阵。

4) 评估新位置的适应度。采用 3PEM 方法对种群内所有个体对应的分布式光伏接入方案进行概率

潮流计算, 检查每个方案是否满足 3.2 节所述的约束条件。计算每个个体所对应分布式光伏接入方案的适应度值, 对不满足约束的个体引入惩罚项。

5) 在每次更新后, 对于每个新位置的解, 计算其反向解, 并评估反向解的适应度。

6) 如果反向解的适应度优于当前解, 那么用反向解替换当前解。

7) 重复步骤 2)~步骤 6), 直至达到最大迭代次数, 输出最优分布式光伏容量配置。

## 5 算例仿真

本文在 IEEE 33 节点系统上进行仿真分析, 系统结构如图 1 所示, 包含 4 条馈线和 33 个节点, 电压等级为 12.66 kV, 系统支路阻抗数据见文献[30]。

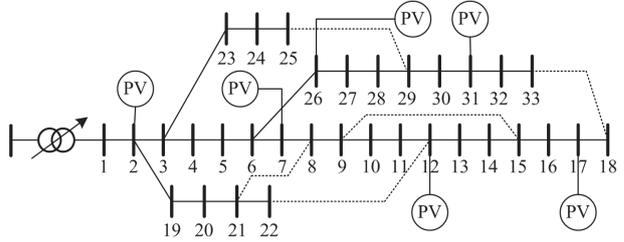


图 1 IEEE 33 节点系统结构

Fig. 1 Architecture of IEEE33-node system

分布式光伏的接入节点为 2、7、12、17、26 和 31, 即在各支路每隔 4 个节点均匀接入分布式光伏, 每个节点所允许的分布式光伏容量上限为 1 MW。节点电压幅值的允许范围为 0.93~1.07 p.u., 支路功率的最大允许值为 6 MW。分布式光伏功率因数调节范围为 -0.95~0.95 p.u.; 无功补偿装置安装在节点 17、30; 有载调压变压器的调压范围为 0.95~1.05 p.u., 分接头正、负可调节的最大位置为 4, 步进量为 1.25%。NOWOA 参数: 种群数量为 30, 最大迭代次数为 50。

选取我国福建某地区配电网中 32 个负荷节点和 6 个光伏站点的实测数据, 采样周期为 1 h, 时间跨度为 2024 年 4 月 19 日至 2024 年 7 月 16 日, 各光伏出力以 PV1, PV2, ..., PV6 表示, 各负荷以 L1, L2, ..., L32 表示。拟合得到考虑相关性 with 不考虑相关性的各光伏出力的 Beta 分布参数  $\alpha$ 、 $\beta$ , 以及各负荷的正态分布参数  $\mu$ 、 $\sigma$ 。图 2 为光伏出力 PV3 在考虑与不考虑相关性时一天 24 h 的 Beta 分布参数  $\alpha$ 、 $\beta$ , 图 3 为负荷 L2 在考虑与不考虑相关性时一天 24 h 的正态分布参数  $\mu$ 、 $\sigma$ 。

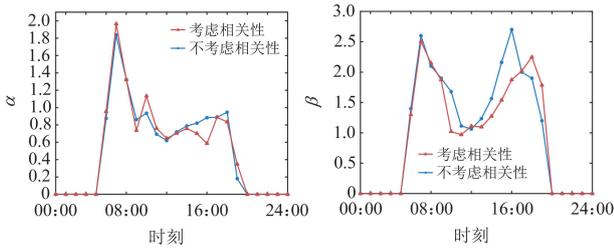


图2 考虑与不考虑相关性光伏出力的 Beta 分布参数  
Fig. 2 Beta distribution parameters of PV output with and without considering correlation

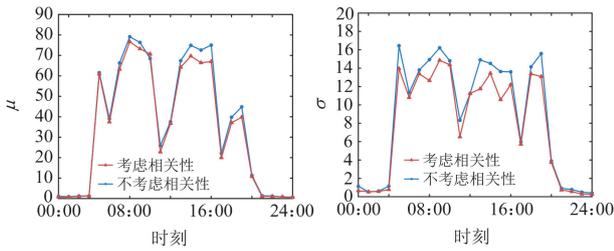


图3 考虑与不考虑相关性负荷出力的正态分布参数  
Fig. 3 Normal distribution parameters of load output with and without considering correlation

5.1 随机性和相关性对承载能力的影响

5.1.1 随机性对承载能力的影响

为体现节点电压机会约束和支路功率机会约束中的置信水平  $\beta_U$ 、 $\beta_S$  对分布式光伏承载能力的影响, 选取不同置信水平  $\beta_U$ 、 $\beta_S$ , 仿真计算配电网分布式光伏承载能力, 结果如图 4 所示。

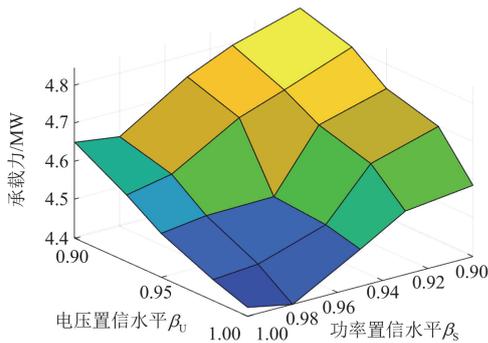


图4 不同置信水平下的承载能力  
Fig. 4 Carrying capacity at different confidence levels

由图 4 可知, 随着  $\beta_U$ 、 $\beta_S$  的增大, 分布式光伏承载能力逐渐减小, 在  $\beta_U$  取值为 0.95 的情况下,  $\beta_S$  从 0.9 变化到 1 时, 分布式光伏承载能力由 4.7361 MW 降低到 4.5126 MW, 在  $\beta_S$  取值为 0.95 的情况下,  $\beta_U$  从 0.9 变化到 1 时, 分布式光伏承载能力由 4.7431 MW 降低到 4.4947 MW。这是因为随

着置信水平的增大, 对约束条件中的电压质量和功率质量要求越严格, 使得承载能力计算结果偏向保守。因此, 为更准确评估分布式光伏承载能力需要充分考虑随机性的影响。

5.1.2 相关性对承载能力的影响

根据实测光伏出力、负荷数据, 可以计算得出各随机变量间在 24 h 各时刻的 Kendall 秩相关系数  $\rho$ , 图 5 为 PV3 与 L2 的 Kendall 秩相关系数在 24 h 内的变化情况。

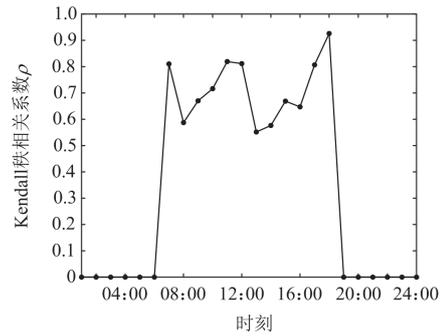


图5 24 h Kendall 秩相关系数变化情况  
Fig. 5 The 24 h change of Kendall rank correlation coefficient

由图 5 可知, 光伏出力与负荷在 06:00—19:00 时段内的  $\rho$  均大于 0.5, 具有较强的相关性。

图 6 为在 13:00 时各随机变量的 Kendall 秩相关系数, 其中变量 1—6 为光伏出力, 7—38 为负荷。

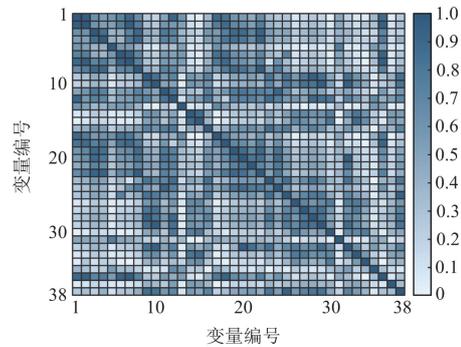


图6 13:00 时各随机变量的 Kendall 秩相关系数  
Fig. 6 Kendall rank correlation coefficient of each random variable at 13:00

由图 6 可知, 光伏出力、负荷各随机变量之间存在一定的相关性, 地理位置相近的光伏与光伏之间的 Kendall 秩相关系数大部分在 0.5 以上, 光伏与负荷、负荷与负荷之间也存在一定的强相关。

为分析所提相关性方法的有效性, 分别考虑相关性与不考虑相关性生成光伏与负荷场景, 采用 ES 指标<sup>[31]</sup>判断生成的场景与历史数据的贴合程度。

表 1 为考虑及不考虑相关性的 ES 指标计算结果, 以光伏出力 PV3 与负荷 L2 为例进行计算。

表 1 考虑相关性与不考虑相关性的 ES 指标计算结果

Table 1 Calculation results of ES index with and without considering correlation

场景生成方式	ES 指标	
	光伏出力	负荷
考虑相关性	1.0886	2.1201
不考虑相关性	1.6569	2.4781

由表 1 可知, 考虑相关性时光伏与负荷的 ES 指标均小于不考虑相关性时的 ES 指标值, 说明考虑相关性生成的场景更符合实际情况, 由此也验证了本文所提相关性方法的有效性。

为分析光伏、负荷各随机变量间的相关性对光伏承载能力的影响, 设置以下 4 个场景进行对比分析。表 2 为各场景下的光伏承载能力计算结果。

场景一: 不考虑光伏与光伏之间的相关性, 不考虑光伏与负荷之间的相关性;

场景二: 考虑光伏与光伏之间的相关性, 不考虑光伏与负荷之间的相关性;

场景三: 考虑光伏与负荷之间的相关性, 不考虑光伏与光伏之间的相关性;

场景四: 同时考虑光伏与光伏之间以及光伏与负荷之间的相关性。

表 2 不同场景下的配网分布式光伏承载能力

Table 2 Distributed photovoltaic carrying capacity of distribution network under different scenarios

节点	不同场景下的承载能力/MW			
	一	二	三	四
2	0.7836	0.8467	0.8717	0.8636
7	0.8261	0.8293	0.8576	0.8442
12	0.9732	0.9437	1.0000	0.9626
17	0.3149	0.2693	0.3209	0.2906
26	0.8879	0.8084	0.9453	0.9355
31	0.7449	0.7203	0.7687	0.7586
总和	4.5306	4.4177	4.7642	4.6551

由表 2 可知, 场景二各个节点的光伏承载能力总和为 4.4177 MW, 相比于场景一减少了 0.1129 MW, 这是由于当多个光伏系统出力存在相关性时, 在太阳辐射强度大的时刻各个光伏出力叠加, 容易出现电网电压波动大的问题, 限制了光伏接入容量, 如果忽略光伏与光伏间的相关性, 将使得承载能力计算结果偏向乐观。场景三各个节点的光伏承载能力计算结果大部分相对其他方案更高, 总和为 4.7642 MW, 相比于场景一增加了 0.2336 MW, 这是由于当接入的光伏系统与负荷存在相关性时, 光

伏发电能够满足一定的负荷需求, 被即时就地消纳, 减少其对电网的压力, 从而电网可以接入更多光伏, 如果忽略光伏与负荷间的正相关性, 将使得承载能力计算结果偏向保守。场景四计算得出各节点光伏承载能力总和为 4.6551 MW, 相比于场景二增加了 0.2374 MW, 相比于场景三减少了 0.1091 MW, 这是由于在同时考虑光伏与光伏、光伏与负荷之间相关性的情况下, 光伏承载能力将取决于这两种相关性的平衡。

由以上分析可知, 光伏承载能力在一定程度上受光伏、负荷各随机变量之间相关性的影响, 为合理规划光伏系统的布局和规模, 需要充分考虑光伏、负荷的相关性, 从而提高电网的可靠性和效率。

## 5.2 不同方案承载能力提升效果比较

在考虑相关性影响的基础上, 为分析本文模型中不同调节措施对配电网分布式光伏承载能力的提升效果, 设置以下 4 个方案进行对比分析。表 3 为各方案的配电网分布式承载能力计算结果对比。

方案一: 不考虑任何调节措施的基础场景;

方案二: 仅考虑光伏逆变器无功调节;

方案三: 仅考虑附加无功补偿装置调节;

方案四: 仅考虑有载调压变压器分接头调节;

方案五: 同时考虑光伏逆变器无功调节、附加无功补偿装置以及有载调压变压器分接头调节。

表 3 不同方案下的配网分布式光伏承载能力

Table 3 Distributed photovoltaic carrying capacity of distribution network under different schemes

节点	不同方案下的承载能力/MW				
	一	二	三	四	五
2	0.8636	0.9679	1.0000	1.0000	1.0000
7	0.8442	0.8297	0.8672	0.9163	0.9538
12	0.9626	0.9127	0.8991	0.8405	1.0000
17	0.2906	0.3369	0.3838	0.5683	0.6746
26	0.9355	0.9625	1.0000	0.8874	1.0000
31	0.7586	0.8840	0.8246	0.8251	0.9208
总和	4.6551	4.8937	4.9747	5.0376	5.5492

由表 3 可知, 方案二考虑分布式光伏逆变器无功调节, 分布式光伏在节点 2、7、12、17、26、31 输出的无功功率分别为 -80 kvar、30 kvar、60 kvar、90 kvar、50 kvar、110 kvar, 分布式光伏承载能力总和为 4.8937 MW, 相比于方案一提升了 5.1%。方案三考虑附加无功补偿装置调节, 其在节点 17、30 输出的无功功率分别为 200 kvar、500 kvar, 得到的分布式光伏承载能力总和为 4.9747 MW, 相比于方案一提升了 6.9%。方案四考虑有载调压变压器分接头调节, 分接头位于最低档位处, 得到的分布式

光伏承载能力总和为 5.0376 MW，相比于方案一提升了 8.2%。

方案五同时考虑了分布式光伏逆变器无功调节、附加无功补偿装置调节和有载调压变压器分接头调节，分布式光伏在节点 2、7、12、17、26、31 输出的无功功率分别为-70 kvar、40 kvar、30 kvar、50 kvar、30 kvar、100 kvar，无功补偿装置在节点 17、30 输出的无功功率分别为 230 kvar、400 kvar，有载调压变压器分接头位于最低档位处，得到的分布式光伏承载能力达到了 5.5492 MW，相比于方案一提升了 19.2%。方案五通过对不同提升措施进行组合适应具体的网络条件和需求，相比于方案二、三、四进一步提升了配电网分布式光伏承载能力。

为进一步探究无功补偿装置容量及接入点对光伏承载能力的影响，首先将无功补偿装置安装在节点 17、30 处，将其容量以步长 0.05 Mvar 作为取值间隔，得到不同无功补偿容量取值下的的光伏承载能力，如图 7 所示。

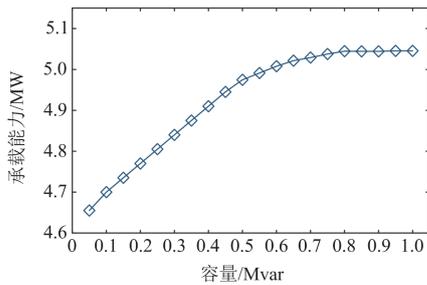


图 7 无功补偿装置容量对承载能力的影响

Fig. 7 Influence of capacity of reactive power compensation device on carrying capacity

由图 7 分析可知，当无功补偿装置容量在 0.05~0.5 Mvar 范围内时，光伏承载能力随着无功补偿容量的增加几乎呈线性增长，继续增加无功补偿容量则承载能力增长缓慢，当无功补偿容量大于 0.8 Mvar 时，承载能力几乎不再增长。一方面是由于光伏承载能力增加到一定值时可能会导致配电网线路过载，即使无功补偿装置容量再大，也无法突破线路额定电流等物理限制，因此不能无限制地提升光伏承载能力；另一方面是由于无功补偿装置主要通过调节无功功率来稳定配电网的电压水平，当电压已经被调节到合理范围时，再增加无功补偿容量对电压的调节效果有限，进而对光伏承载能力的提升也有限。

接着，将容量为 0.5 Mvar 的无功补偿装置分别接入节点 7、9、17、22、25 和 30，得到不同无功补偿接入点下的光伏承载能力，如图 8 所示。

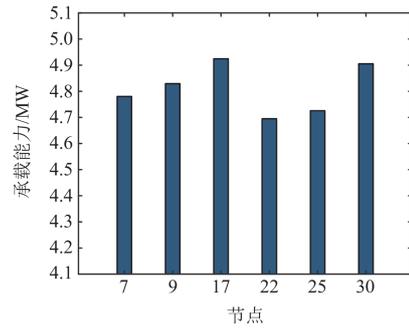


图 8 无功补偿装置接入点对承载能力的影响

Fig. 8 Influence of access point of reactive power compensation device on carrying capacity

由图 8 分析可知，无功补偿装置接入节点 17 或节点 30 时的光伏承载能力比无功补偿接入节点 7 或节点 9 的光伏承载能力要更高，这是由于节点 17 和节点 30 更靠近线路末端。当分布式光伏出力较大时会向电网注入大量有功功率，沿线电压逐渐下降，如果无功功率不足可能会导致线路末端电压偏差越下限，无功补偿装置可以提供所需的无功功率，减小电压下降幅度，进一步提升光伏承载能力。同时，无功补偿装置接入节点 7 时的光伏承载能力比无功补偿接入节点 22 或节点 25 的光伏承载能力要更高，这是由于节点 7 为分布式光伏接入点，当分布式光伏接入容量过大可能会导致电压抬升的问题，无功补偿装置通过补偿感性无功来降低电压水平，减小电压越上限的概率，从而提升光伏承载能力。因此，通过合理配置无功补偿装置的接入点及容量，可以更大化提升配电网的分布式光伏承载能力。

### 6 结论

本文考虑分布式光伏出力、负荷各变量之间的相关性，建立了考虑相关性的分布式光伏承载能力提升模型。采用 Frank-Copula 函数描述光伏出力和负荷间的相关性，基于 Nataf 变换得到分布式光伏出力和负荷的相关性样本矩阵，利用 NOWOA 对模型进行求解，得到以下结论。

1) 在研究配电网分布式光伏承载能力时需要考虑随机性和相关性的影响。由于光伏电源间的相关性，光伏出力叠加会增加模型约束越限概率，减小分布式光伏承载能力；由于光伏与负荷间的相关性，光伏被就地消纳从而减少其对电网的压力，增大分布式光伏承载能力。

2) 通过分布式光伏逆变器无功调节、附加无功补偿装置和有载调压变压器分接头调节可以有效提升配电网分布式光伏承载能力，对不同提升措施进

行组合相对于单独采用一种措施的提升效果更好。

3) 本文提出的考虑相关性的光伏承载能力提升模型与无提升措施的模型相比, 计算得出的光伏承载能力提升了 19.2%, 体现了本文模型的优越性。

### 参考文献

- [1] SHARMA V, AZIZ S M, HAQUE M H, et al. Effects of high solar photovoltaic penetration on distribution feeders and the economic impact[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 131: 110021.
- [2] 但扬清, 王蕾, 郑伟民, 等. 高比例可再生能源接入背景下电网承载能力鲁棒提升策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 104-111.  
DAN Yangqing, WANG Lei, ZHENG Weimin, et al. Robust improvement strategy for power grid hosting capacity with integration of high proportion of renewable energy[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 104-111.
- [3] 袁昌昊, 朱金大, 倪建富. 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 74-82.  
YUAN Changhao, ZHU Jinda, NI Jianfu. Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 74-82.
- [4] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(4): 801-813.
- [5] 曹敬, 金玉龙, 郑涛, 等. 计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 155-166.  
CAO Jing, JIN Yulong, ZHENG Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation cluster[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 155-166.
- [6] 欧奕昊, 姜彤, 张一航, 等. 考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 105-118.  
OU Yihao, JIANG Tong, ZHANG Yihang, et al. Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's reactive power regulation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 105-118.
- [7] 凡鹏飞, 李宝琴, 侯江伟, 等. 配电网分布式电源经济可承载力评估[J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 196-202.  
FAN Pengfei, LI Baoqin, HOU Jiangwei, et al. Economic capacity assessment of renewables in distribution networks[J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 196-202.
- [8] 国家能源局. 分布式电源接入电网承载力评估导则: DL/T 2041—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.  
National Energy Administration. Guidelines for evaluation of capacity of distributed power supply in grid: DL/T 2041—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [9] 杨志淳, 朱炳兆, 操燕春, 等. 提高配电网承载力的分布式光伏双层规划方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(7): 69-75.  
YANG Zhichun, ZHU Bingzhao, CAO Yanchun, et al. Distributed photovoltaic bilevel programming method for improving carrying capacity of distribution networks[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(7): 69-75.
- [10] 魏欣荣, 吴俊勇, 丁然, 等. 基于光伏重心理论的配电网分布式光伏最大准入容量计算[J]. *电网技术*, 2023, 47(11): 4533-4549.  
WEI Xinrong, WU Junyong, DING Ran, et al. Distributed PV hosting capacity calculation of distribution network based on PV barycenter theory[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4533-4549.
- [11] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 23-33.  
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 23-33.
- [12] EL-SHIMY M, SHARAF A, KHAIRY H, et al. Reduced-order modelling of solar-PV generators for small-signal stability assessment of power systems and estimation of maximum penetration levels[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(8): 1838-1847.
- [13] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4): 56-61.  
ZHOU Liangxue, ZHANG Di, LI Canbing, et al. Access capacity analysis considering correlation of distributed photovoltaic power and load[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 56-61.
- [14] 陈飞雄, 郭奕鑫, 邵振国, 等. 计及新能源出力相关性的多能源微网仿射实时优化调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3248-3257.  
CHEN Feixiong, GUO Yixin, SHAO Zhenguo, et al. Affine real-time optimal dispatching for multi-energy microgrid with renewable energy output correlation[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3248-3257.

- [15] YAO Yiyun, DING Fei, HOROWITZ K, et al. Coordinated inverter control to increase dynamic PV hosting capacity: a real-time optimal power flow approach[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(2): 1933-1944.
- [16] ASTERO P, SÖDER L. Improving PV dynamic hosting capacity using adaptive controller for STATCOMs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 34(1): 415-425.
- [17] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 23-32.  
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 23-32.
- [18] FU Yangyang, CHIANG H D. Toward optimal multiperiod network reconfiguration for increasing the hosting capacity of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2294-2304.
- [19] 陈朝宽, 张靖, 何宇, 等. 基于 Cornish-Fisher 级数和半不变量法的含光伏配电系统风险评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 91-96.  
CHEN Chaokuan, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 91-96.
- [20] 杨晓萍, 王李瑾. 基于概率潮流的含分布式电源配电网优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 71-76.  
YANG Xiaoping, WANG Lijin. Optimization of distributed power distribution network based on probabilistic load flow[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 42(8): 71-76.
- [21] 高明, 陈家豪, 王丽晓, 等. 考虑光伏不确定性因素的电力系统概率潮流三点估计法[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 1-10.  
GAO Ming, CHEN Jiahao, WANG Lixiao, et al. A three-point probabilistic load flow estimation algorithm for the power system considering photovoltaic uncertainties[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 1-10.
- [22] 王强强, 姚良忠, 盛万兴, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 132-141.  
WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, SHENG Wanxing, et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 132-141.
- [23] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [24] ZHANG Jinzhong, ZHANG Tan, ZHANG Gang, et al. Using the whale optimization algorithm to solve the optimal reactive power dispatch problem[J]. Processes, 2023, 11(5): 1513.
- [25] CHEN Jiaoliao, ZHUO Xingai, XU Fang, et al. A novel multi-classifier based on a density-dependent quantized binary tree LSSVM and the logistic global whale optimization algorithm[J]. Applied Intelligence, 2020, 50: 3808-3821.
- [26] DING Yunfei, CHEN Zijun, ZHANG Hongwei, et al. A short-term wind power prediction model based on CEEMD and WOA-KELM[J]. Renewable Energy, 2022, 189: 188-198.
- [27] XU Feifei, LIU Yang, WANG Lei. An improved ELM-WOA-based fault diagnosis for electric power[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1135741.
- [28] 韩永明, 王新鲁, 耿志强, 等. 基于 AMOWOA 的区域综合能源系统运行优化调度[J]. 自动化学报, 2024, 50(3): 576-588.  
HAN Yongming, WANG Xinlu, GENG Zhiqiang, et al. Optimal scheduling for integrated energy system operation in commercial and residential areas based on AMOWOA algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(3): 576-588.
- [29] TIZHOOSH H R. Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence[C] // International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06), 2005, Vienna, Austria: 695-701.
- [30] DING Tao, LI Fangxing, LI Xue, et al. Interval radial power flow using extended DistFlow formulation and Krawczyk iteration method with sparse approximate inverse preconditioner[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1998-2006.
- [31] PINSON P, GIRARD R. Evaluating the quality of scenarios of short-term wind power generation[J]. Applied Energy, 2012, 96: 12-20.

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-07-08

作者简介:

赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统动态分析与控制、主动配电网以及故障预测等; E-mail: zhaohshcn@126.com

胡 涔(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网运行和配电网规划。E-mail: hzhouzh@163.com

(编辑 张颖)