

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2409310

基于 CART 决策树的 110 kV 供电区域分布式 光伏承载能力测算模型

代守乐¹, 李 萍²

(1. 河南平煤神马聚碳材料有限责任公司, 河南省 平顶山市 467000;
2. 河南神马尼龙化工有限责任公司, 河南省 平顶山市 467000)

摘要: 分布式光伏受天气影响较大, 测算 110 kV 供电区域的分布式光伏承载能力, 对区域供电来说意义重大。基于此, 提出基于分类与回归树 (classification and regression tree, CART) 的 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力测算模型。该模型以分布式电源输出功率、区域分布式电源发电量占比、局部分布式电源线路损耗增量等数据为基础, 利用 CART 决策树建立 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力测算模型, 并使用改进鲸鱼优化算法求解测算结果。经实验测试发现, 该模型对分布式光伏承载能力的测算精准度较高, 可有效测算不同实验区域在不同季节时的分布式光伏承载能力, 具有较高的应用价值。

关键词: 分类与回归树 (CART); 110 kV 供电区域; 分布式光伏; 承载能力

中图分类号: TK 01; TM 61 文献标志码: A

Calculation Model of Distributed Photovoltaic Carrying Capacity for 110 kV Power Supply Area Based on CART Decision Tree

DAI Shoule¹, LI Ping²

(1. Henan Pingmei Shenma Polycarbon Material Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan Province, China;
2. Henan Shenma Nylon Chemical Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan Province, China)

ABSTRACT: Distributed photovoltaics are greatly affected by weather conditions, and calculating the carrying capacity of distributed photovoltaics in 110 kV power supply areas is of great significance for regional power supply. A calculation model of distributed photovoltaic carrying capacity for 110 kV power supply areas based on classification and regression trees (CART) is proposed to address this issue. This model is based on the output power of distributed power sources, the proportion of regional distributed power generation, and the incremental line loss of local distributed power sources, etc. Using the CART decision tree, a calculation model of the distributed photovoltaic carrying capacity for 110 kV power supply areas is established, and the improved whale optimization algorithm is used to solve the calculation results. After experimental testing, it is found that the model has higher accuracy in calculating the distributed photovoltaic carrying capacity. This indicates that the method can effectively calculate the distributed photovoltaic carrying capacity of different experimental areas in different seasons, and has high application value.

KEY WORDS: classification and regression trees (CART); 110 kV power supply area; distributed photovoltaic; carrying capacity

0 引言

近年来,在绿色能源理念下光伏能源被广泛应用,这在一定程度上缓解了中国电力资源紧张状况^[1-3]。110 kV 供电是中国普遍的电压供应等级,

可有效提升电力资源的输送效率和用户使用效率。分布式光伏受阴雨天气环境影响较大,容易出现光伏承载能力无法满足区域用电需求的问题^[4]。因此,对分布式光伏承载能力进行精准测算,对完善区域供电意义重大。

文献[5]提出了分布式光伏承载能力评估方法,利用电源装机数量、短路电流、电能质量等数据,通过层次分析方式得到测算结果;文献[6]提出了需求响应的光伏承载能力评估方法,该方法通过计算分布式光伏集群不同时段的用户侧需求,以光伏供电的价格弹性系数描述承载能力负荷的需求变化,以销售电量最大收益作为目标建立模型,通过粒子群算法求解测算结果。以上2种方法均存在测算精度不高的情况,应用效果不佳。文献[7]以频率稳定约束条件为基础,利用频率响应模型对光伏承载能力进行评估。在建立电力系统频率响应模型后,使用电磁暂态仿真对有效性进行验证;最后,设定频率稳定约束条件为最大频率变化率和频率跌落最低值。该评估方法同时涉及多种新能源,对光伏承载能力的测算缺乏针对性。

分类与回归树(classification and regression tree, CART)是在已知情况发生概率的基础上,通过建立决策树,分析期望值大于等于0的概率,为决策提供判断的一种决策分析方法^[8]。该方法属于一种监督学习算法,容易被理解和实现,运算较简便,测算精度较高^[9]。CART 决策树算法的优势在于针对缺失值的处理,并且可兼顾连续值和离散值;在面对大型数据或多个输出变量时具有较高效率;同时,CART 决策树算法不易受噪声影响,可有效提高模型的容错能力和泛化能力^[10]。

本文以 CART 决策树为基础,研究基于 CART 决策树的 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力测算模型,以提升光伏承载能力测算技术水平。

1 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力测算模型

1.1 分布式光伏承载能力相关数据计算

影响 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力的因素众多,如分布式电源输出功率、电源渗透率、发电量占比等^[11],为获取较为准确的测算结果需要多因素综合分析。结合《分布式电源接入电网承载力评估导则》(DL/T 2041—2019),综合考虑了发电能力、电网规模、运行效率、互动关系等内容,计算分布式光伏承载能力相关数据,将分布式电源输出功率、区域分布式电源渗透率、区域分布式电源发电量占比、区域分布式电源利用率、局部分布式电源返送概率、局部分布式电源返送电力占比、局部分布式电源线损增量等作为衡量分布式光伏承载能

力的指标。

(1) 分布式电源输出功率计算。

在分布式光伏供电区域,光照强度直接影响电能产生效率。以概率密度函数的形式描述太阳光照强度为

$$f(u) = \gamma(\varphi + z) \frac{\left(\frac{\eta}{\eta_{\max}}\right)^{A-1}}{\gamma(\varphi)\gamma(z)} \left(1 - \frac{\eta}{\eta_{\max}}\right)^{B-1} \quad (1)$$

式中: u 为太阳辐射强度; $\gamma(\cdot)$ 为光照概率密度分布函数; φ, z 均为形状参数,且均大于等于0; $\eta_{\max}, \eta$ 分别为一段时间内最大光照强度和实际光照强度; A 为返送时段的个数; B 为待测算时段的个数。

计算形状参数为

$$\varphi = \frac{\vartheta z}{1 - \vartheta} \quad (2)$$

$$z = (1 - \vartheta) \frac{\vartheta(1 + \vartheta) - \sigma^2 \vartheta(1 + \vartheta)}{\sigma^2} \quad (3)$$

式中: σ 为分布式光伏覆盖区域光照强度的标准方差; ϑ 为光照强度均值。

在含分布式电源的电网中,利用逆变器将直流电源转换为交流电源^[12],在计算 110 kV 供电区域分布式光伏电源的输出功率时,须将逆变器的效率和光辐射强度考虑其中,则分布式光伏电源的输出功率为

$$Z_v = uS\phi \quad (4)$$

式中: S 为光伏组件安装面积; ϕ 为太阳能转换率。

(2) 区域分布式电源渗透率计算。

区域分布式电源渗透率呈现的是当前区域电源装机占区域内负荷的比例^[13]。较高的渗透率表明该电源实际供应能力与需求之间具有更高的匹配度;但渗透率过高有可能造成电网稳定性下降,须根据实际情况进行规划和控制。区域分布式电源渗透率为

$$R_{RP} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{j=1}^m Z_j} \quad (5)$$

式中: n, m 分别为分布式电源数量和光伏发电电源数量; g_i 为分布式电源 i 的装机容量; Z_j 为分布式光伏发电系统内电源 j 的功率。

(3) 区域分布式电源发电量占比计算。

计算区域内分布式电源发电量占负荷总量的比例为

$$Q_2 = \frac{\int_0^T \sum_{i=1}^n D_i(t) dt}{\int_0^T \sum_{j=1}^m Z_j(t) dt} \quad (6)$$

式中: $D_i(t)$ 为 t 时刻电源 i 的功率; $Z_j(t)$ 为 t 时刻负荷 j 的功率; T 为总发电时间。

(4) 区域分布式电源利用率计算。

110 kV 供电区域分布式电源利用率可描述其电源整体消纳情况,即电能的有效利用程度。该指标在评估电源系统的运行效率和电力系统稳定性时具有重要意义。区域分布式电源利用率为

$$Q_3 = \frac{\int_0^T \sum_{i=1}^n D_i(t) dt}{Z_{ri}(t)} \quad (7)$$

式中 $Z_{ri}(t)$ 为电源 i 在 t 时刻的可用发电功率。

(5) 局部分布式电源返送概率计算。

110 kV 供电区域局部分布式电源返送概率可描述局部分布式光伏电源的发电贡献情况。较高的返送概率意味着更多的电能输送;但同时,这一指标过高可能会带来电网电压升高、频率波动等稳定性问题。局部分布式电源返送概率为

$$Q_4 = \frac{\sum_{a=1}^A \Delta t_a}{\sum_{b=1}^B \Delta t_b} \quad (8)$$

式中: Δt_a 为第 a 个返送时段的时长; Δt_b 为第 b 个待测算时段的时长。

(6) 局部分布式电源返送电力占比计算。

110 kV 供电区域局部分布式电源返送电力占比可呈现电源功率返送电力和总电量的比例。局部分布式电源返送电力占比为

$$Q_5 = \sum_{i=1}^n \frac{\int_0^T \Delta Z_i(t) dt}{\int_0^T D_i(t) dt} \quad (9)$$

式中 $\Delta Z_i(t)$ 为分布式光伏电源 i 的潮流返送功率。

(7) 局部分布式电源线损增量计算。

在 110 kV 供电区域内,如果分布式电源的装机容量过大,高于本级消纳能力时^[14-16],会出现电能返送需求。电能从低压区域流向高压区域,会导致高压区域出现线损^[17-18]。因此,局部分布式电源线损增量可描述在较高的渗透率下分布式电源的线损变化状态。局部分布式电源线损增量为

$$Q_6 = \sum_{i=1}^n \frac{\int_0^T U_i(t) dt}{\int_0^T D_i(t) dt} \quad (10)$$

式中 $U_i(t)$ 为 t 时刻分布式电源 i 的线损功率。

经过上述过程,即可得到 110 kV 供电区域分布式光伏承载能力的测算数据。

1.2 测算模型构建

CART 决策树算法具备自我学习能力,其可通过有监督的学习过程,从无规则的数据中获得用于决策的分类规则。110 kV 供电区域分布式光伏承载能力的测算需要较强的数据分析能力和自我学习能力,适用 CART 决策树算法。

利用 1.1 节得到的分布式光伏承载能力测算数据建立 CART 决策树模型,其分类属性为基尼系数。基尼系数为

$$g(p) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{E}{C_k} \quad (11)$$

式中: p 为分布式光伏承载能力的测算数据特征值; C_k 为属于 k 类特征的样本数量; K 为分布式光伏承载能力测算数据特征的种类数; E 为分布式光伏承载能力测算数据总量,即 CART 决策树训练总量。

利用式(11)计算 CART 决策树训练集内样本的基尼系数,该数值越大,则说明当前属性对于样本的熵减少能力越强,当前属性的确定性也就越强。因此,按最大的基尼系数对分布式光伏承载能力测算数据特征进行划分,计算划分后每个样本的基尼系数后再次进行划分。重复上述步骤,分布式光伏承载能力测算 CART 决策树模型建立完毕。

由于 CART 决策树在进行测算时,每一步决策划分均会产生一个弱分类测算模型,经过加权累加后会得到一个新的测算模型。为提升分布式光伏承载能力测算 CART 决策树模型的测算能力,使用 Boosting 方法对分布式光伏承载能力测算模型进行优化处理。

最终的分布式光伏承载能力测算模型 $F(x)$ 由基函数组成:

$$F(x) = \sum_{l=1}^M \zeta_l x_l \Phi_i(x) \quad (12)$$

式中: $\Phi_i(x)$ 为电源 i 的电能数据基函数, x 为承载能力分类样本变量; x_l 为第 l 个基函数分类样本变量, $l=1,2,3,\dots,M$; ζ_l 为电源 i 的电能数据弱分类器权值。

式(12)中,每个基函数均可理解成一个基础的

分布式光伏承载能力测算模型。分布式光伏承载能力测算模型损失函数为

$$L(y, F(x)) = \frac{(y - F(x))^2}{2} \quad (13)$$

式中 y 为分布式光伏承载能力测算的实际值。

依据式(13),利用梯度提升方法求解分布式光伏承载能力测算模型 $F(x)$,则式(12)中的权值可作为梯度下降的步长。利用线性搜索方式计算梯度下降最优步长,即

$$\zeta_v = L(y_i, F(x_i) - rL(y, F(x))) \quad (14)$$

式中: ζ_v 为第 v 棵决策树最优梯度下降步长; y_i 为电源 i 的电量数据测算实际值; r 为线性搜索常数。

并将残差系数 ω 合并到步长中,第 v 棵决策树残差为

$$\phi_v = \frac{v\omega \partial L(y_i, x_i)}{\partial x_i} \quad (15)$$

进一步计算布式光伏承载能力测算模型的 CART 决策树步长 H_v ,则有

$$H_v = \operatorname{argmin}((\zeta_v - \phi_v)F(x_i)) \quad (16)$$

通过求解式(16)即可得到最佳分布式光伏承载能力测算模型。利用改进鲸鱼优化算法^[19-21],求解最佳分布式光伏承载能力测算模型的具体步骤如下:

(1) 算法参数初始化。将最佳分布式光伏承载能力测算模型的可行解看作个体鲸鱼,在可行解空间内,对种群位置随机初始化,并设置随机数、初始迭代次数、最大迭代次数等参数。

(2) 计算种群的适应度。使用模拟退火算法计算鲸鱼种群的初始温度,找到并记录种群中的最优个体位置,即最佳分布式光伏承载能力测算模型的最佳可行解。

(3) 进入迭代阶段。若迭代次数小于最大迭代次数,则更新参数,对当前种群适应度进行排序,计算平均适应度,得到此时的自适应权重。

(4) 计算种群接受概率并判断接受概率是否小于 1。当其接受概率小于 1 时,在可行解范围内重新确定鲸鱼位置;反之,当前鲸鱼个体则为最佳分布式光伏承载能力测算模型的可行解。确定可行解后更新鲸鱼位置。

(5) 进入模拟退火阶段。定义一个新的鲸群,随机化鲸鱼个体位置,计算新种群的适应度。

(6) 记录此时最佳鲸鱼个体的位置及其适应度。如果达到最大迭代次数,停止迭代;反之,增加

迭代次数并重复步骤(3)—(5),直到条件满足为止。

(7) 输出最佳分布式光伏承载能力测算模型的可行解。

2 实验分析

以某 110 kV 供电区域作为实验对象,该 110 kV 供电线路建成于 1956 年,最初为 35 kV 供电线路,后升压至 110 kV,其输电线路全长超 142 km,辐射区域较大,且该区域光照条件较好,分布式光伏电源较多。使用本文方法对该 110 kV 供电区域光伏承载能力进行测算,为该区域电力规划提供数据依据。

先验证本文建立的分布式光伏承载能力测算模型的能力。设置 CART 决策树复杂度不同情况下本文模型的基尼系数,且该基尼系数不得高于 0.35。在 CART 决策树基尼不纯度减少的问题中,复杂度归一化结果的值为 0~1,由此得到的测试结果如图 1 所示。

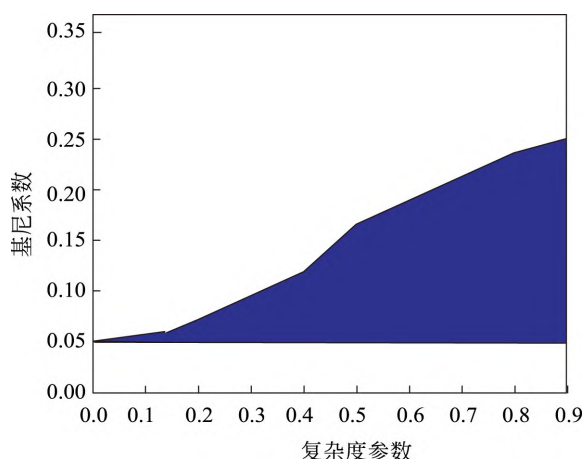


图 1 基尼系数测试结果

Fig. 1 Test results of Gini coefficients

分析图 1 可知,在 CART 决策树复杂度参数逐渐增加时,本文模型的基尼系数呈现增大趋势。当 CART 决策树复杂度参数为 0~0.1 时,即 CART 决策树在不剪枝和较小程度剪枝时,模型基尼系数为 0;随着 CART 决策树复杂度参数逐渐增大,模型的基尼系数也随之增大。在 CART 决策树复杂度参数为 0.9 时,本文模型测算误差约为 0.25,该基尼系数数值较小,说明本文模型具备较强的分布式光伏承载能力测算能力。

计算分布式光伏承载力相关数据是实现承载能力测算的基础。以分布式电源输出功率为指标,将某个分布式光伏电源作为实验对象,使用本文方

法计算该分布式电源在不同时段的输出功率和等效负荷,验证本文模型获得分布式光伏承载能力相关数据的能力,测试结果如图2所示。

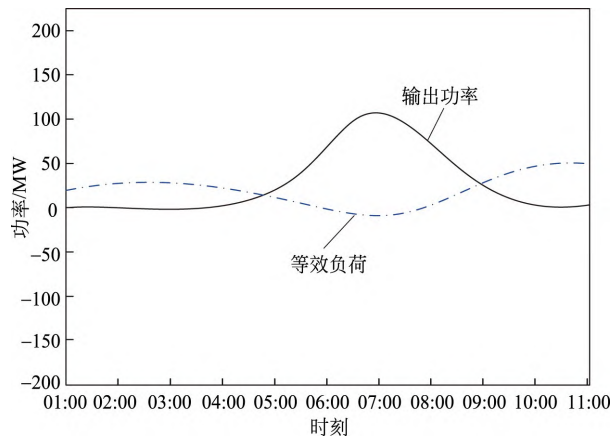


图2 分布式电源输出功率与等效负荷
Fig. 2 Output power and equivalent load of distributed power supply

分析图2可知,利用本文模型可有效获得该分布式电源在不同时段输出功率曲线及等效负荷曲线。

季节影响光照强度,将春季和秋季看作过渡季,将一年划分为过渡季、夏季和冬季,并将该110 kV供电区域划分为10个实验区,使用本文模型对10个实验区的光伏承载能力进行测算,结果如表1所示。

表1 分布式光伏承载能力测算结果

Table 1 Calculation results of distributed photovoltaic carrying capacity

比较项目	承载能力/MW		
	过渡季	夏季	冬季
实验区1	8.033 6	8.942 6	9.022 4
实验区2	7.894 5	9.016 2	9.356 4
实验区3	7.984 6	9.115 3	9.210 3
实验区4	8.021 5	8.766 2	9.455 4
实验区5	7.955 6	8.659 9	9.306 5
实验区6	7.992 2	9.011 3	9.576 9
实验区7	8.096 6	9.230 1	9.231 2
实验区8	8.154 3	9.211 2	9.413 2
实验区9	8.215 3	8.506 5	9.300 1
实验区10	8.266 4	8.126 5	9.325 8

分析表1可知:不同实验区域的光伏承载能力存在差异,但差异不大;相对于不同季节来说,冬季的分布式光伏承载能力最高,其次为夏季和过渡季,夏季和过渡季的分布式光伏承载能力差值较小。综上可见:应用本文模型可实现对110 kV供电

区域内不同位置 and 不同季节光伏承载能力的测算,说明本文方法具备较好的分布式光伏承载能力的测算效果。

为进一步验证本文模型对分布式光伏承载能力的测算能力,以划分的10个实验区为实验对象,测试在不同置信水平下的分布式光伏承载能力,测试结果如图3所示。

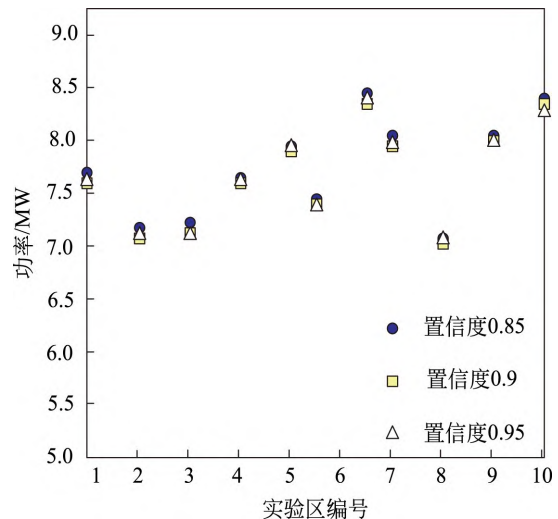


图3 不同置信度水平下分布式光伏承载能力测算结果
Fig. 3 Calculation results of distributed photovoltaic carrying capacity at different confidence levels

分析图3可知,本文模型在不同置信度水平情况下,得到的分布式光伏承载能力数值几乎重合,数值相差不大,说明本文模型可在不同置信度水平情况下有效测算分布式光伏的承载能力。

在110 kV供电区域内,用户集中程度较高的区域电能负荷水平也相对较高,测试在不同负荷水平情况下的分布式光伏承载能力,结果如图4所示。

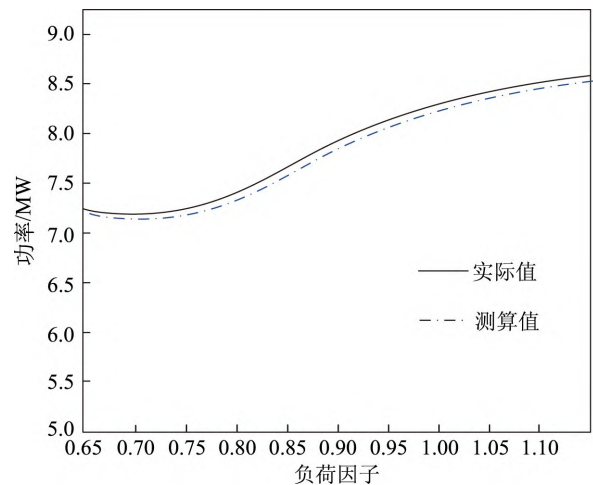


图4 不同负荷水平下分布式光伏承载能力的测算结果
Fig. 4 Calculation results of distributed photovoltaic carrying capacity at different load levels

分析图 4 可知,本文模型测算不同负荷水平下的分布式光伏承载力的曲线与其实地承载力曲线吻合度极高,说明本文模型测算精度较高。

3 结语

本文以分布式电源输出功率、区域分布式电源发电量占比、局部分布式电源线路增量等数据为基础,提出了基于 CART 决策树的分布式光伏承载能力测算模型;并应用该模型测算了分布式光伏承载能力,发现在不同复杂度参数下该方法的测算误差较低,有助于分析不同区域在不同季节的分布式光伏承载能力,具有较高的泛化能力,对于实际电力系统规划和管理具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 蔡秀雯,陈茂新,陈钢,等.考虑主动管理与需求侧管理的主动配电网分布式光伏最大准入容量计算方法[J].电力建设,2021,42(5):38-47.
CAI Xiuwen, CHEN Maoxin, CHEN Gang, et al. Calculation method for maximum allowable access capacity of distributed PV in active distribution network considering active management and demand-side management[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 38-47.
- [2] 方一晨,张沈习,程浩忠,等.含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J].电力系统自动化,2021,45(7):8-17.
FANG Yichen, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Robust optimization of distributed photovoltaic hosting capacity of active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 8-17.
- [3] 朱一昕,陈奕帆,毕恺韬,等.基于半不变量随机潮流计算的分布式光伏优化配置研究[J].智慧电力,2023,51(3):67-72.
ZHU Yixin, CHEN Yifan, BI Kaitao, et al. Optimal allocation of distributed PV based on semi-invariant stochastic power flow calculation[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 67-72.
- [4] 申洪涛,刘宝铭,任鹏,等.基于辨识解耦的含高渗透分布式光伏用户集群基线负荷估计方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):164-173.
SHEN Hongtao, LIU Baoming, REN Peng, et al. Aggregated baseline load estimation method under high distributed photovoltaic penetration based on identification and decoupling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 164-173.
- [5] 王海云,于希娟,张雨璇,等.大型城市电网下分布式光伏承载力评估分析[J].太阳能学报,2023,44(6):260-264.
WANG Haiyun, YU Xijuan, ZHANG Yuxuan, et al. Evaluation and analysis of distributed photovoltaic carrying capacity in large urban power grid[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(6): 260-264.
- [6] 于昊正,赵寒杰,李科,等.计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J].电力建设,2023,44(2):122-131.
YU Haozheng, ZHAO Hanjie, LI Ke, et al. Carrying capacity evaluation of distribution network for distributed photovoltaic cluster considering user-side demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 122-131.
- [7] 罗澍忻,朱廷猛,余浩,等.考虑频率稳定约束的电网新能源承载能力评估方法及其应用[J].南方电网技术,2023,17(10):65-76.
LUO Shuxin, ZHU Tingmeng, YU Hao, et al. Evaluation method and application of carrying capacities of new energy in power grid considering the constraints of frequency stability[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 65-76.
- [8] 丁施尹,谭锡林,叶萌,等.含高比例分布式光伏的母线负荷预测方法[J].可再生能源,2021,39(1):117-122.
DING Shiyin, TAN Xilin, YE Meng, et al. Bus load forecasting considering large-scale distributed PV interconnection[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 117-122.
- [9] 赵冬梅,任耀宇,程雪婷.低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J].现代电力,2021,38(4):392-401.
ZHAO Dongmei, REN Yaoyu, CHENG Xueting. Analysis of distributed photovoltaic acceptance capacity in low voltage distribution network[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(4): 392-401.
- [10] LEE I, LUO Y, CARRETTA H, et al. Latent pathway-based Bayesian models to identify intervenable factors of racial disparities in breast cancer stage at diagnosis[J]. Cancer Causes & Control, 2023, 35(2): 253-263.
- [11] 王光辉,唐新明,张涛,等.全国建筑物遥感监测与分布式光伏建设潜力分析[J].中国工程科学,2021,23(6):92-100.
WANG Guanghui, TANG Xinming, ZHANG Tao, et al. Building monitoring by remote sensing and analysis of distributed photovoltaic construction potentials[J]. Chinese Engineering Science, 2021, 23(6): 92-100.
- [12] 高博,茆超,张冲标,等.基于时空图网络的分布式光伏发电出力预测[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(3):125-133.
GAO Bo, MAO Chao, ZHANG Chongbiao, et al. Output prediction of distributed photovoltaic power generation based on spatial-temporal graph neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2023, 35(3): 125-133.
- [13] 杨锡运,赵泽宇,杨岩,等.基于时空信息组合的分布式光伏功率预测方法研究[J].热力发电,2022,51(8):64-72.
YANG Xiyun, ZHAO Zeyu, YANG Yan, et al. Research on distributed photovoltaic power prediction method based on combination of spatiotemporal information[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 64-72.
- [14] 张梦泽,张一舟,李凯勇.基于 CART 决策树的 CCL 大数据有效信息提取[J].计算机仿真,2021,38(9):456-459,464.
ZHANG Mengze, ZHANG Yizhou, LI Kaiyong. Effective information extraction of cold chain logistics big data based on cart decision tree[J]. Computer Simulation, 2021, 38(9): 456-459, 464.
- [15] 张振宇,王文倬,张小奇,等.基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法[J].电网技术,2021,45(2):632-639.

- ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, ZHANG Xiaoqi, et al. Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 632-639.
- [16] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 12-24.
WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [17] 党建, 闫运江, 贾嵘, 等. 基于图计算的配电网最大供电能力评估研究[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1039-1048.
DANG Jian, YAN Yunjiang, JIA Rong, et al. Total supply capability evaluation of distribution network based on graph computation[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1039-1048.
- [18] 葛磊蛟, 秦羽飞, 刘嘉恒, 等. 基于相似日与 BA-WNN 的分布式光伏数据虚拟采集方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 8-14.
GE Leijiao, QIN Yufei, LIU Jiaheng, et al. Virtual acquisition method of distributed photovoltaic data based on similarity day and BA-WNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 8-14.
- [19] 张希森, 马宁, 付伟, 等. 融合混沌映射和二次插值的自适应鲸鱼优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(4): 1088-1096.
- ZHANG Ximiao, MA Ning, FU Wei, et al. Adaptive whale optimization algorithm based on chaotic mapping and quadratic interpolation[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(4): 1088-1096.
- [20] 秋兴国, 王瑞知, 张卫国, 等. 基于混合策略改进的鲸鱼优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(1): 70-78.
QIU Xingguo, WANG Ruizhi, ZHANG Weiguo, et al. Improved whale optimizer algorithm based on hybrid strategy[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(1): 70-78.
- [21] 于涛, 高岳林. 融入小生境和混合变异策略的鲸鱼优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(10): 88-104.
YU Tao, GAO Yuelin. Whale optimization algorithm integrating niche and hybrid mutation strategy[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(10): 88-104.



代守乐

收稿日期: 2024-01-04

作者简介:

代守乐(1987),男,硕士,工程师,主要研究方向为工厂供电技术、高压变频器与高压电机速度控制等,yaluben8nf@163.com;

李 萍(1984),女,学士,助理工程师,主要研究方向为工厂供电技术、自动化仪表技术等。