

引用格式: 李练兵, 张凯宁, 曾四鸣, 等. 分布式光伏并网接纳能力研究[J]. 中国测试, 2023, 49(8): 1-7. LI Lianbing, ZHANG Kaining, ZENG Siming, et al. Research on acceptance capacity of distributed photovoltaic grid connection[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(8): 1-7. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022030162



分布式光伏并网接纳能力研究

李练兵¹, 张凯宁¹, 曾四鸣², 梁纪峰²

(1. 河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300131; 2. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 随着分布式光伏渗透率的不断提高, 配电网将承受更大压力, 为维持配电网安全运行, 研究分布式光伏并网接纳能力显得至关重要。为此, 首先建立含分布式光伏的配电网优化模型, 对其接入容量及配电网线路有功功率损耗进行综合考虑, 并提出一种改进的布谷鸟搜索算法, 通过对其飞行公式进行改进及增加扰动算子以达到提升算法收敛速度及收敛精度目标; 然后基于改进布谷鸟搜索算法计算不同功率因数下配电网最优接纳能力; 最后以 IEEE-33 及 IEEE-69 节点系统为例进行仿真, 对所建模型及算法进行验证。结果表明: 所提方法可有效提高布谷鸟搜索算法的性能, 并能够在满足系统约束条件下, 实现对分布式光伏接入容量及线路有功功率损耗的综合优化。

关键词: 分布式光伏; 接纳能力; 布谷鸟搜索算法; 配电网

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2023)08-0001-07

Research on acceptance capacity of distributed photovoltaic grid connection

LI Lianbing¹, ZHANG Kaining¹, ZENG Siming², LIANG Jifeng²

(1. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China; 2. Electric Science Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: With the increasing penetration of distributed photovoltaic, the distribution network will be under more pressure. To maintain the safe operation of the distribution network, it is crucial to study the hosting capacity of distributed network. Therefore, this paper firstly establishes a simulation model of distribution network containing distributed photovoltaic, and carries out a comprehensive optimization of distributed photovoltaic access capacity and active power loss of distribution network lines. An improved cuckoo search algorithm is proposed to improve the flight equation and increase the perturbation operator to improve the convergence speed and accuracy of the algorithm. Then the optimal hosting capacity of the distribution network under different power factors is calculated based on the improved cuckoo search algorithm. Finally, the IEEE-33 and IEEE-69 node systems are simulated to verify the established model and algorithm. The experimental results show that the proposed method effectively improves the performance of the cuckoo search algorithm and can achieve comprehensive optimization of distributed photovoltaic access capacity and line active power loss while satisfying the system constraints.

Keywords: distributed photovoltaic; hosting capacity; cuckoo search algorithm; distribution network

收稿日期: 2022-03-24; 收到修改稿日期: 2022-06-01

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20314301D)

作者简介: 李练兵(1972-), 男, 天津市人, 教授, 研究方向为新能源系统与控制、电力电子技术。

0 引言

在国家战略需求促进下，分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)作为一种重要能源，近年来在国内得到大力发展^[1-2]。然而，当 DPV 达到高渗透水平时，会出现逆潮流、过电压等一系列技术问题，将对系统运行产生不利影响^[3]。因此，需提前完成 DPV 容量评估任务。

DPV 接入配电网的容量受多种因素影响^[4]，如节点电压、线路载流、电能质量。目前，建立基于数学优化方法的接纳能力评估模型多以分布式电源(distributed generation, DG)接入容量最大作为目标函数，其中文献[5]综合考虑系统潮流约束、节点电压约束、线路热稳定约束以及 DPV 容量约束，建立评估模型，通过布谷鸟搜索(cuckoo search, CS)算法求解；文献[6]建立配电网接纳能力的鲁棒优化模型，考虑 DG 及负荷水平不确定性，同时将有载调压变压器及无功补偿装置载入模型；文献[7]建立基于分布式鲁棒优化的接纳能力评估模型，通过条件风险价值对模型进行转化求解；文献[8]通过引入机会约束模型，允许一定程度的越限发生，并通过将其转化成确定性模型进行求解；文献[9]建立接纳能力的不确定性最优潮流模型，通过不同形式的注入功率，将模型进行确定性转化。文献[10]采用蒙特卡洛方法，得到不同场景下的配电网对 DPV 的接纳能力。以上模型或未考虑线路功率损耗，或将以非线性形式存在的功率损耗进行忽略，达到模型线性化目的，以方便求解。

分布式电源接纳能力模型本质上是一种满足特定约束条件下的容量优化问题，传统优化算法(如线性规划、非线性规划方法)存在建模较为复杂、计算速度慢的问题，并且会出现“维数灾”。相较而言，现代人工智能算法(如遗传算法、粒子群算法)则具有收敛速度快、计算精度高、可靠性高等优点。相对于其他算法，CS 算法在参数设置、通用性、全局寻优能力以及鲁棒方面综合优势更强，但在收敛速度、收敛精度以及种群多样性上均有待提高^[11-12]。

综上所述，本文对 DPV 接入容量及配电网线路有功功率损耗进行综合考虑，并对 CS 算法进行改进，建立基于改进布谷鸟搜索(improved cuckoo search, ICS)算法的 DPV 接纳能力计算方法。

1 基于稳态约束的接纳能力计算模型

本文考虑多种稳态约束，对 DPV 接入容量及

线路有功功率损耗进行综合优化，建立接纳能力计算模型。

1.1 目标函数

目标函数一：DPV 接入的总容量最大，其表达式为：

$$P_1 = \max \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},i} \right) \quad (1)$$

式中： $P_{\text{PV},i}$ ——第 i 个节点处的 DPV 接入量；

N_{PV} ——DPV 接入节点总数。

目标函数二：线路有功功率损耗最小，其表达式为：

$$P_2 = \min \left(\sum_{i,j \in [N_L]} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \cdot R_{ij} \right) \quad (2)$$

式中： P_{ij} 、 Q_{ij} ——由节点 i 向节点 j 传输的有功及无功功率；

U_i ——节点 i 处的电压幅值；

R_{ij} ——连接节点 i 、 j 线路的阻抗；

N_L ——配电网中所有节点构成的集合。

考虑到实际系统的权重问题，首先对目标进行离差标准化处理，将各种变量的观察值规范至(0,1)，然后建立如下标准化模型和目标函数：

$$W = \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \quad (3)$$

$$\max F = \lambda_1 F_{\text{PV}} + \lambda_2 F_{\text{loss}} \quad (4)$$

式中： ω ——待优化目标；

ω_{\max} 、 ω_{\min} ——标准化原函数的最小值与最大值。

λ_1 、 λ_2 ——权重系数；

F_{PV} 、 F_{loss} ——标准化后的 DPV 接入容量和线路有功功率损耗。

1.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}$ ——节点 i 处注入的有功和无功功率；

$P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ ——节点 i 处的有功和无功负荷；

N ——系统中总的节点数；

G_{ij} 、 B_{ij} ——连接节点 i 、 j 线路的电导和电纳；

θ_{ij} ——节点 i 、 j 间的相位差。

2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (6)$$

其中 U_{\max} 、 U_{\min} 分别表示国标规定下节点电压的上、下限值。

3) 线路载流容量约束

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (7)$$

式中: I_{ij} ——连接节点 i 、 j 线路传输的电流值;

I_{ij}^{\max} ——连接节点 i 、 j 线路所允许传输的最大电流值。

4) DPV 容量约束

$$0 \leq S_{DPV,i} \leq S_{DPV}^{\max} \quad (8)$$

式中: $S_{DPV,i}$ ——第 i 个节点的 DPV 接入容量;

S_{DPV}^{\max} ——DPV 所允许接入容量的最大值。

5) 潮流反向约束

$$P_{re} \leq 0 \quad (9)$$

其中 P_{re} 表示配电网主变压器低压侧向高压侧传送的功率。

2 布谷鸟搜索算法的改进

2.1 标准布谷鸟搜索算法

CS 算法最早是由剑桥大学 Yang 等提出的一种新型群体智能优化算法^[13], Lévy flights 机制是其核心, 它是一种随意游走方式, 由高频率的短距离移动和低频率的长距离移动组成。

Yang 等人假设了 3 个理想状态用于 CS 算法:

1) 每只布谷鸟每次只产生一个鸟蛋, 并随机孵化到一个鸟巢里。

2) 在更新鸟巢时, 优质鸟巢将会被保留到下一代。

3) 可利用的鸟巢数量是固定的, 并设鸟巢中外来鸟蛋被发现的概率为 P_a , $P_a \in [0, 1]$ 。

在 3 个假设的基础上, CS 算法的位置更新公式可以被概括为:

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = X_i^t + s \\ s = \alpha \oplus \text{Lévy}(\beta) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Lévy}(\beta) = \frac{\phi \cdot u}{|v|^{1/\beta}} \quad (11)$$

$$\phi = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \cdot \sin(\pi \cdot \beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \cdot \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \quad (12)$$

式中: X_i^t ——第 t 次迭代中第 i 个鸟巢的位置;

s ——飞行距离;

α ——步长因子;

\oplus ——点对点乘法;

$\text{Lévy}(\beta)$ ——随机搜索路径;

u, v ——服从正态分布的随机变量;

β ——分布因子, 通常取 1.5;

Γ ——Gamma 分布函数。

此外, CS 算法的另一种更新方式为: 通过一个固定的抛弃概率 P_a , 用一个随机数 ϵ 与 P_a 相比较以确定是否生成新的鸟巢。

2.2 改进的布谷鸟搜索算法

为提高算法收敛速度和搜索精度, 本文从以下 4 个方面对其进行改进:

1) 在标准 CS 算法中 α 为固定值, 使得算法在搜索过程中丢失主动性, 因此对 α 进行自适应改进, 改进公式如下:

$$\alpha = \frac{5 \cdot \cos[(t/T) \cdot \pi/2] \cdot \text{rand} + 7}{10} \quad (13)$$

式中: t ——当前迭代次数;

T ——总的迭代次数;

rand ——0~1 之间的随机数。

随着 t 的增加, α 从 1.2 波动到 0.7, 实现自适应调节, 改进后其变化规律如图 1 所示。

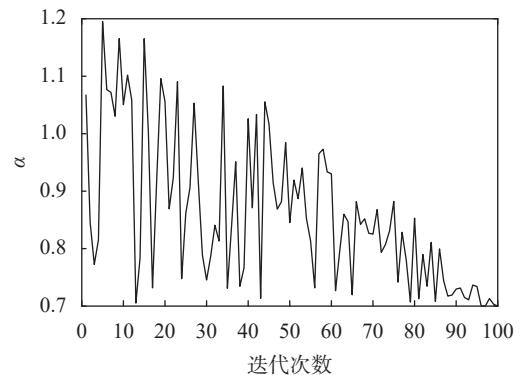


图 1 α 的自适应调整曲线

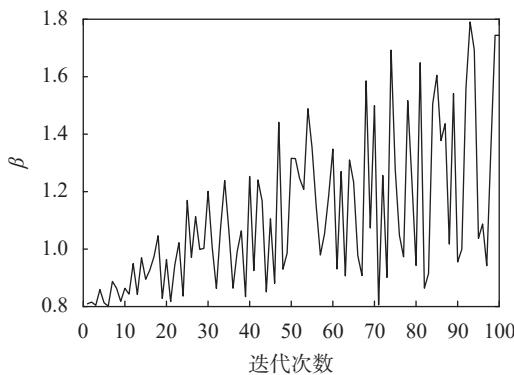
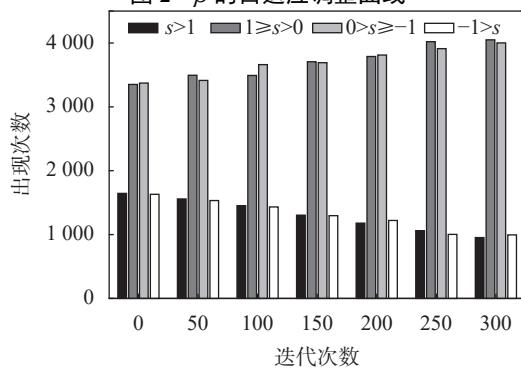
2) 在标准算法中 β 取值 1.5, 使得算法在前期全局搜索能力较差, 后期容易产生震荡现象, 错过最优解, 因此对 β 进行自适应改进:

$$\beta = \frac{5 \cdot \sin[(t/T) \cdot \pi/2] \cdot \text{rand} + 4}{5} \quad (14)$$

随着迭代次数 t 的增加, β 从 0.8 随机波动到 1.8, 其变化规律如图 2 所示。

3) 经上述改进后, 在不同迭代次数 t 下对 s 重复取值 10000 次, 统计结果如图 3 所示。

由图可知, s 中约 70%~80% 处于 $[-1, 1]$, 若算法搜索空间很大, 则对算法收敛速度不利, 为此当

图 2 β 的自适应调整曲线图 3 不同迭代次数下 s 的分布图

$s \in [-1, 1]$ 时, 对 s 进行如下改进:

$$s = \alpha \oplus \text{Lévy}(\beta) \times (X_i^t - X_{\text{best}}^t) \quad (15)$$

其中 X_{best}^t 表示第 t 次迭代中适应度最优鸟巢的位置。

4) 添加扰动算子, 在增加鸟巢多样性的同时增加算法的局部搜索能力:

$$\begin{cases} X_{i,\text{ver}}^t = (1-r) \cdot X_i^t + r \cdot \text{rand} \cdot X_i^t \\ r = 0.2 \cdot \text{rand} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $X_{i,\text{ver}}^t$ 表示第 t 次迭代中扰动后的第 i 个鸟巢。

改进后布谷鸟搜索算法的步骤如图 4 所示。

2.3 算法测试

为验证 ICS 算法的寻优能力, 本文采用 4 个标准测试函数分别对 CS 算法和 ICS 算法进行测试。

标准测试函数见表 1, 其中测试维度均为 40, 两种算法初始化鸟巢数量均为 30, 最大迭代次数 T 均为 300, 鸟巢被发现概率 P_a 均设置为 0.25。

图 5 为各测试函数对应收敛曲线, 在 4 个标准测试函数中, ICS 算法收敛曲线明显低于 CS 算法的收敛曲线, 说明其具有更快的收敛速度。

表 2 为各测试函数对应计算结果。由表可知, CS 算法的收敛精度远低于 ICS 算法, 并且没有收敛到全局最优值, 相较而言 ICS 算法已经收敛到最优值。

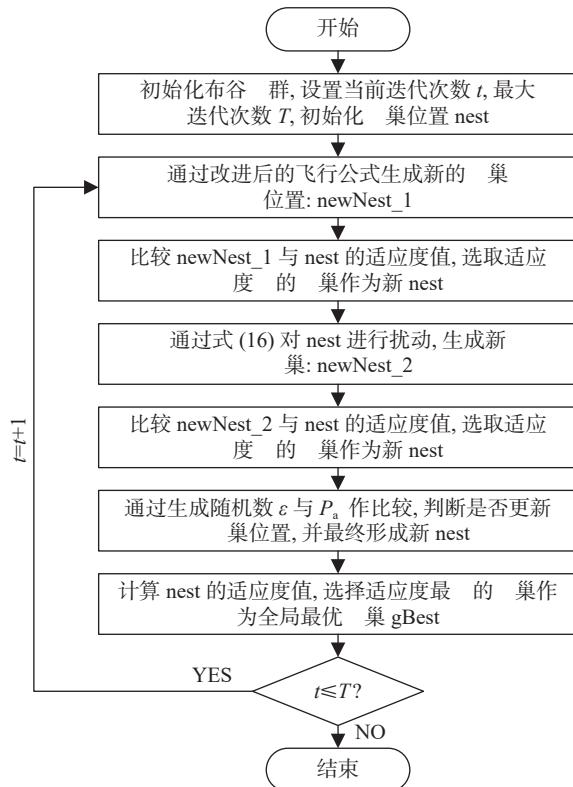


图 4 改进布谷鸟算法流程图

表 1 标准测试函数

| 测试函数 | 最优值 | 取值范围 |
|--|-----|-------------|
| $f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$ | 0 | [-100, 100] |
| $f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $ | 0 | [-10, 10] |
| $f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$ | 0 | [-100, 100] |
| $f_4(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$ | 0 | [-600, 600] |

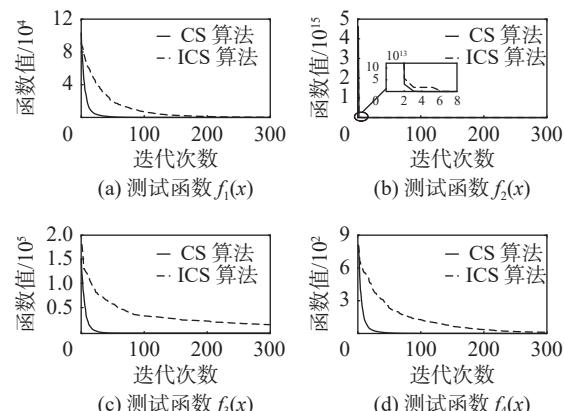


图 5 测试函数的收敛曲线

表 2 测试结果

| 测试函数 | 算法 | 最小值 | 最大值 |
|-------|-----|------------------------|------------------------|
| f_1 | CS | 1.25×10^2 | 2.63×10^2 |
| | ICS | 2.28×10^{-15} | 5.87×10^{-13} |
| f_2 | CS | 41.03 | 66.42 |
| | ICS | 1.77×10^{-8} | 1.51×10^{-7} |
| f_3 | CS | 1.02×10^4 | 1.52×10^4 |
| | ICS | 2.51×10^{-11} | 6.97×10^{-10} |
| f_4 | CS | 6.41 | 15.66 |
| | ICS | 6.44×10^{-13} | 3.49×10^{-11} |

综上可知, ICS 算法在搜索速度以及搜索精度上都远优于 CS 算法, 同时能够有效避免陷入局部最优。

3 实验验证

为对所建模型及算法进行验证, 本文引入 IEEE-33 及 IEEE-69 节点配电网模型^[14]。

3.1 IEEE-33 节点验证分析

图 6 为 IEEE-33 节点配电系统, 其中虚线所指联络线全部断开, 系统总负荷 3715 kW+j2300 kvar, 基准电压 12.66 kV, 基准功率 10 MVA, 在无 DPV 接入条件下系统总的有功功率损耗为 202.5 kW。

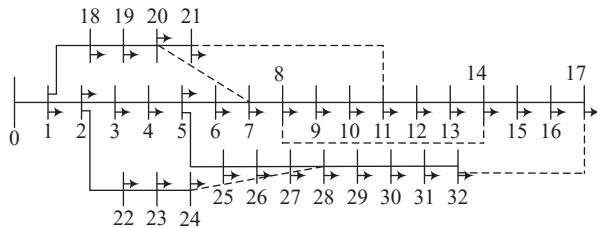


图 6 IEEE-33 节点配电系统图

3.1.1 分布式光伏的单节点接入测试

本文选取主干线上 3-17 号节点作为 DPV 单节点接入测试节点, 其中不同功率因数 λ 下各节点的最优接入容量如表 3 所示, 各节点接入最优容量时的电压曲线及线路有功功率损耗分别如图 7、表 4 所示。

依据表 3、表 4 及图 7 可知:

1) DPV 接入点越接近线路末端, 其最优接入容量越低, 这是因为线路末端对 DPV 的接入更加敏感, DPV 发出的无功作用于接入节点, 使电压其更容易达到上限。当 DPV 接入节点前移时, 其无功逐渐作用于整个网络, 进而降低接入点电压敏感度, 此时潮流反向及线路载流容量逐渐成为主要制约

表 3 最优接入容量

| 节点号 | $\lambda = 1.00$ | $\lambda = 0.95$ | $\lambda = 0.90$ | kW |
|-----|------------------|------------------|------------------|----|
| 3 | 3858.2 | 4038.3 | 4258.7 | |
| 4 | 3851.1 | 4024.5 | 4244.0 | |
| 5 | 3840.3 | 4000.4 | 4218.6 | |
| 6 | 3848.8 | 4008.0 | 4227.5 | |
| 7 | 3884.2 | 4044.7 | 4272.0 | |
| 8 | 3947.5 | 4109.4 | 4348.6 | |
| 9 | 4016.0 | 3842.5 | 3701.1 | |
| 10 | 4029.2 | 3735.8 | 3603.7 | |
| 11 | 4055.1 | 3548.2 | 3431.8 | |
| 12 | 3527.8 | 2924.5 | 2822.0 | |
| 13 | 3344.4 | 2731.3 | 2630.0 | |
| 14 | 3142.1 | 2556.3 | 2452.9 | |
| 15 | 2912.7 | 2370.5 | 2275.0 | |
| 16 | 2616.4 | 2073.9 | 1975.1 | |
| 17 | 2544.3 | 1998.0 | 1898.0 | |

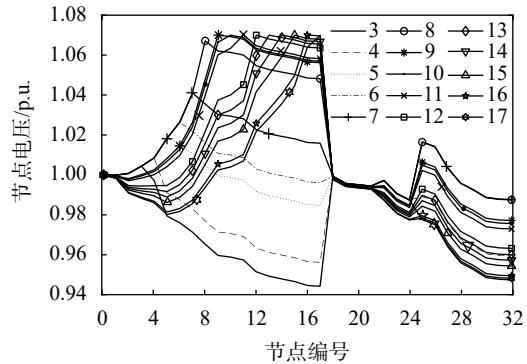


图 7 最优容量下的电压曲线

表 4 最优接入容量下的有功功率损耗

| 节点号 | $\lambda = 1.00$ | $\lambda = 0.95$ | $\lambda = 0.90$ | kW |
|-----|------------------|------------------|------------------|----|
| 3 | 143.2 | 121.4 | 117.8 | |
| 4 | 136.1 | 108.3 | 104.6 | |
| 5 | 125.3 | 85.4 | 81.7 | |
| 6 | 133.8 | 92.6 | 89.8 | |
| 7 | 169.2 | 127.5 | 129.8 | |
| 8 | 232.5 | 188.9 | 198.8 | |
| 9 | 301.0 | 216.0 | 190.1 | |
| 10 | 314.2 | 213.7 | 189.0 | |
| 11 | 340.1 | 210.0 | 187.3 | |
| 12 | 335.1 | 193.4 | 173.7 | |
| 13 | 329.9 | 187.5 | 167.6 | |
| 14 | 321.3 | 184.7 | 165.8 | |
| 15 | 310.9 | 183.0 | 165.5 | |
| 16 | 304.9 | 178.7 | 161.7 | |
| 17 | 304.4 | 161.0 | 161.0 | |

DPV 接入容量的主要因素。

2) 在线路末端, 随着 λ 的减小, DPV 接入容量逐步降低, 这是因为电压受无功影响较大, λ 越小, DPV 发出的无功越多, 接入点电压越容易触及上限。随着接入点的前移, 节点电压对于无功敏感度降低, 此时 λ 越小, DPV 接入容量越大。

3) 在线路始端部分, 相较于未接入 DPV 时的情况, 线路有功功率损耗得到显著降低, 同时随着 λ 减小, 线路损耗逐渐降低。在线路末端, 相较于未接入 DPV 之前, 线路有功功率损耗增加, 这是由两方面导致, 一是线路末端部分接入 DPV 导致潮流反向, 二是线路末端部分线阻大于始端部分。

3.1.2 分布式光伏的多节点接入测试

本文将所有节点均作为 DPV 多节点接入测试节点, 对其最优接入容量进行计算, 其中功率因数为 1 时, 各节点的接入容量如图 8 所示, 系统总的 DPV 接入容量为 3.7912 MW, 线路总的有功功率损耗为 80.98 kW。

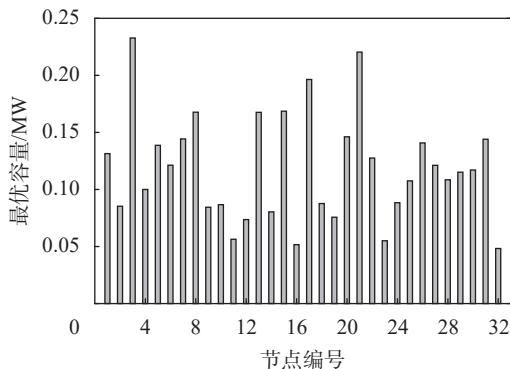


图 8 各节点最优接入容量 (IEEE-33)

相较于单节点接入, 由图 8 可知, DPV 的多节点接入有效降低了单节点接入容量, 实现发出功率就地消纳, 进而降低系线路有功功率损耗。

表 5 为不同功率因数下的 DPV 接纳能力及有功功率损耗对比, 图 9 为多节点接入时的节点电压图。依据图表可知, 系统中无节点电压越限情况, 此时 λ 越大, 系统的 DPV 并网接入容量越低, 系统的有功功率损耗越大。

表 5 不同 λ 下的 DPV 接纳能力 (IEEE-33)

| λ | DPV 接纳能力/kW | 有功功率损耗/kW |
|-----------|-------------|-----------|
| 0.9 | 4149.72 | 20.68 |
| 0.95 | 3959.44 | 47.60 |
| 1 | 3791.24 | 80.98 |

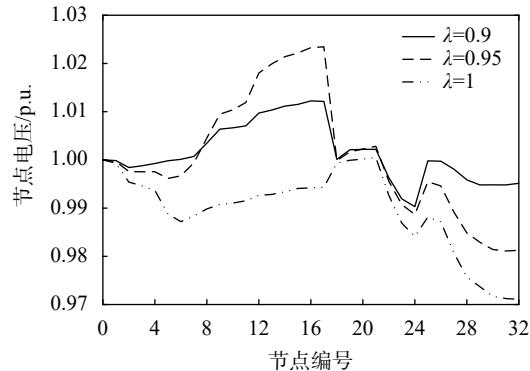


图 9 多节点接入时的电压曲线 (IEEE-33)

图 10 是功率因数为 1 时, 不同算法下的 DPV 最优接纳能力寻优曲线, 不同算法的优化结果如表 6 所示。

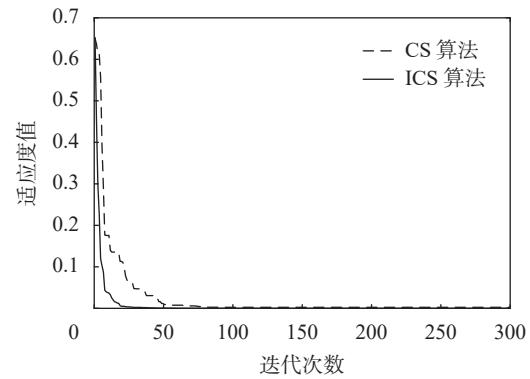


表 6 不同算法下的 DPV 接纳能力

| 算法 | DPV 接纳能力/kW | 有功功率损耗/kW |
|--------|-------------|-----------|
| CS 算法 | 3706.83 | 87.99 |
| ICS 算法 | 3791.24 | 80.98 |

依据图表可知:

1) ICS 算法的收敛曲线始终低于 CS 算法, 说明 ICS 算法具有更快的收敛速度, 其在第 25 次迭代接近收敛, CS 算法在大约第 70 次迭代接近收敛, 可见算法的收敛速度得到了显著提升。

2) 在 DPV 接纳能力及有功功率损耗上, ICS 算法都具有更好的寻优结果, 其中在 DPV 接纳能力上, ICS 算法相较于 CS 算法, 提升约 2.28%, 在功率损耗上 ICS 算法相较于 CS 算法, 降低约 7.97%, 相较于未接入 DPV 时降低约 60%。

3.2 IEEE-69 节点验证分析

为验证所提模型及算法对大规模电网的适应性, 引入 IEEE-69 节点配电系统, 将其联络开关断开, 形成如图 11 所示配电系统。

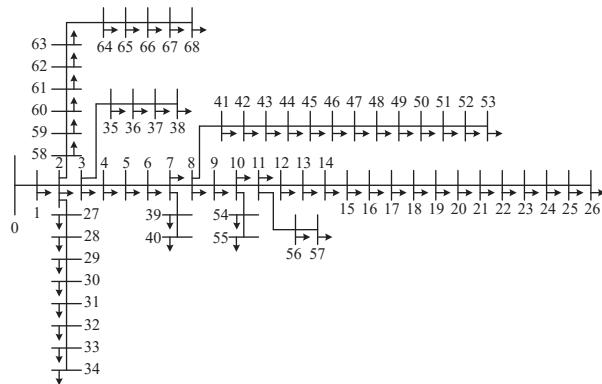


图 11 IEEE-69 节点配电系统图

系统总负荷 $3802.19 \text{ kW} + j2694.60 \text{ kvar}$, 基准电压 12.66 kV , 基准功率 10 MVA , 在无 DPV 接入条件下系统总的有功功率损耗为 226.5 kW 。

DPV 单节点接入容量评估与 3.1.1 类似, 将不再进行赘述, 主要对 DPV 的多节点接入进行验证, 以保证对大规模电网的适应性。单位功率因数时, 各节点的 DPV 接入容量如图 12 所示, 并对其中容量过小的数值进行舍弃。

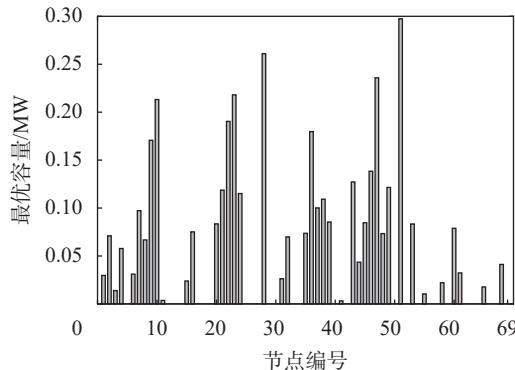


图 12 各节点最优接入容量 (IEEE-69)

分布式光伏接入总量 3.89678 MW , 其中总的有功功率损耗 97.8 kW 。

不同功率因数下的接入容量及线路有功功率损耗如表 7 所示。

表 7 不同 λ 下的 DPV 接纳能力 (IEEE-69)

| λ | DPV 接纳能力/kW | 有功功率损耗/kW |
|-----------|-------------|-----------|
| 0.9 | 4268.75 | 48.99 |
| 0.95 | 4068.75 | 66.61 |
| 1 | 3.89678 | 97.80 |

依据表 7 可得到与表 5 相同的结论, 随着功率因数的增加, DPV 可接入容量逐渐降低, 同时线路有功功率损耗逐渐增加。

图 13 为不同功率因数下的电压曲线, 其中实线表示无 DPV 接入条件下的电压曲线。

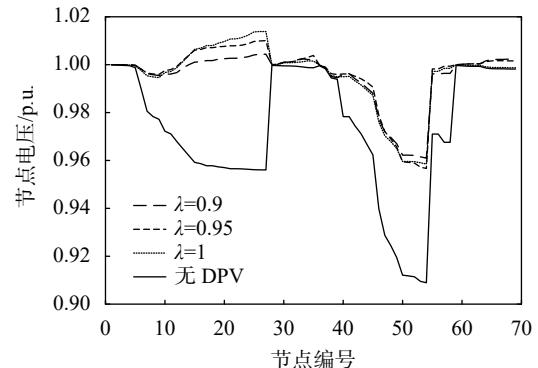


图 13 节点的电压曲线 (IEEE-69)

由图 13 可知, DPV 的接入有效保证了节点电压合格, 同时功率因数越小, 电压偏差越小。

表 8 为单位功率因数下, 不同负荷水平的 DPV 接纳能力及线路有功功率损耗。

表 8 不同负荷水平下的 DPV 接纳能力

| 负荷水平/% | 光伏接纳能力/kW | 线路有功损耗/kW |
|--------|-----------|-----------|
| 100 | 3896.78 | 97.80 |
| 75 | 2899.41 | 72.95 |
| 50 | 1842.63 | 29.74 |
| 25 | 871.14 | 6.51 |

由表可知, 负荷水平越低, 配电网对 DPV 的接纳能力就越小, 为保证配电网安全运行, 可选择合适负荷水平, 以保证极限情况下的电网安全运行。

4 结束语

本文对分布式光伏并网接纳能力进行了研究, 通过实验验证得出以下结论:

- 1) 本文提出的改进方法有效提高了布谷鸟搜索算法的收敛速度及收敛精度, 同时提高了算法多样性, 避免陷入局部最优。
- 2) 本文建立的接纳能力优化计算模型, 将线路有功功率损耗作为优化目标, 实现了对分布式光伏接入容量及线路有功功率损耗的综合优化, 并对其中存在的现象进行分析。
- 3) 文中未考虑分布式光伏接入对电网带来的谐波及其他电能质量问题, 未来工作中将进一步考虑, 以提升电能质量。

参考文献

- [1] 王文静, 王斯成. 我国分布式光伏发电的现状与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 165-172.

(下转第 27 页)

- [8] URBONAS J, MATEI C, AAEN P H. Transient and steady-state thermal measurements of GaN-on-SiC HEMT transistors under realistic microwave drive [C]// Proceedings of 92nd ARFTG Microwave Measurement Conference, 2019: 1-4.
- [9] 翟玉卫, 刘岩, 李灏, 等. 用热反射热成像测量 GaN HEMT 稳态温度 [J]. 中国测试, 2021, 41(5): 558-562.
- [10] WANG D B, LIU ZH M, ZHENG L B, et al. A High-resolution thermoreflectance imaging Technique based on visible light[C]// Proceedings of the 2019 20th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2019: 1-5.
- [11] HELOU A E, RAAD P E, KOMAROV P, et al. Temperature dependence of the thermoreflectance coefficient of gold by the use of a phase-locked single-point measurement approach[C]// Proceedings of the 2018 34th Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium, 2018: 161-164.
- [12] SHAKOURI A, ZIABARI A, KENDIG D, et al. Stable thermoreflectance thermal imaging microscopy with piezoelectric position control[C]// Proceedings of the 32nd Semi-Therm symposium, 2016: 128-132.
- [13] BURZO M G, KOMAROV P L, RAAD P E. Pixel-by-Pixel calibration of a CCD camera based thermoreflectance thermography system with nanometer resolution[C]// Proceedings of the 2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, 2009: 130-135.
- [14] Brocero G, Sipma J P, Eudeline P, et al. Determination of AlGaN/GaN power transistor junction temperature for radar applications [C]// Proceedings of 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), 2016: 1-5.
- [15] 翟玉卫, 刘岩, 李灏, 等. 用光热反射热成像测量 GaN HEMT 稳态温度 [J]. 中国测试, 2021, 47(10): 41-45.

(编辑:谭玉龙)

(上接第 7 页)

- [2] 许建峰, 曹庆仁. 中国分布式光伏并网发电现状及应用研究 [J]. 能源与节能, 2020, 177(6): 45-48.
- [3] WANG S, DONG Y, WU L, et al. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2709-2721.
- [4] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2258-2266.
- [5] 孙强, 王雪, 罗凤章, 等. 基于布谷鸟算法的分布式光伏并网接纳能力计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1): 1-6.
- [6] WANG S, CHEN S, GE L, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1111-1123.
- [7] CHEN X, WU W, ZHANG B, et al. Data-driven DG capacity assessment method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3946-3957.
- [8] 吴素农, 于金镒, 杨为群, 等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3691-3697.
- [9] 朱俊澎, 黄勇, 马良, 等. 基于不确定性最优潮流的配电网分布式电源消纳能力评估 [J/OL]. 电力系统自动化: 1-12[2022-04-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220315.1531.004.html>.
- [10] 刘颖英, 谈萌, 唐钰政. 考虑时序特性的城市有源电网电能质量干扰源接纳能力评估 [J]. 中国测试, 2020, 46(S2): 161-166.
- [11] 吴一全, 周建伟. 布谷鸟搜索算法研究及其应用进展 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 435-444.
- [12] 张晓凤, 王秀英. 布谷鸟搜索算法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(18): 8-16.
- [13] YANG X, DEB S. Cuckoo search via levy flight[C] // Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 2009.
- [14] 朱豪. 基于双层规划理论的主动配电网分布式电源优化配置 [D]. 西安: 西安石油大学, 2021.

(编辑:商丹丹)