

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.01.003

计及灵活配电单元的分布式电源优化配置方法

杨晓辉, 杨爽, 徐正宏, 张柳芳, 杨春生

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:分布式电源(distributed generation, DG)接入位置和容量的不合理规划会对配电网造成不利影响,而灵活配电单元具有灵活控制系统潮流分配和改善电压等优点,因此文中提出在规划中计及灵活配电单元的稳态计算模型和控制策略。为更合理地对DG进行选址和定容,文中首先建立基于全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)、网络损耗和电压偏差3个指标的综合接受度标准模型。然后提出采用改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)对模型进行求解,并在算法中引入高斯变异和Tent混沌,提高算法的全局搜索能力及收敛速度。最后以IEEE 33节点配电网系统为例进行仿真,考虑未接入和接入灵活配电单元2种情况,分别运用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法、麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)和ISSA进行求解。结果表明,计及灵活配电单元可以有效控制系统潮流,改善配置DG后的系统运行状态,并且ISSA比其他算法的优化结果更高效准确。

关键词:分布式电源(DG);灵活配电单元;接受度函数;改进麻雀搜索算法(ISSA);高斯变异;选址定容

中图分类号:TM91

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)01-0019-07

0 引言

随着分布式发电技术的发展,分布式电源(distributed generation, DG)在配电网中的占比越来越高,多个DG并网也越来越普遍。DG是指可独立发电、小规模分散安装在靠近用户侧的装置。DG接入配电网后可降低系统传输功率,进而提升系统电压,减小系统损耗,且改善程度与DG安装位置及容量密切相关^[1-5]。为了保障配电网安全可靠运行及其经济性,须合理规划DG的接入位置和容量^[6-9]。

DG接入配电网的选址定容问题一般采用多目标优化方案。文献[10]考虑成本和电压稳定裕度,采用混沌搜索策略和全局思想改进萤火虫算法,提高了收敛精度,但易陷入局部最优解。文献[11]构建以节点电压波动和负荷波动最小的多目标优化模型,改进了粒子群算法,提升了算法全局搜索能力,但仅考虑系统的稳定性,具有一定的局限性。文献[12]建立考虑投资成本、电压偏移及网损最小的模型,采用Pareto理论和动态参数改进人工搜索群算法,但算法的收敛性和计算精度较差。文献[13]基于能量路由器,即灵活配电单元,考虑融入灵活配电单元的潮流分析模型,建立配电网优化模型,有效提升系统电压及运行状态,但并未涉及DG的分配问题。针对以上问题,为保障配电网运行的经济性和可靠性,须改善系统潮流并合理高效地进行DG选址定容。

收稿日期:2022-07-11;修回日期:2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61963026)

DG接入位置和容量的不合理规划会对配电网造成不利影响,因此文中考虑通过改善系统潮流并采用有效的优化算法实现高效合理的DG配置,提出计及灵活配电单元的DG选址定容优化方法。灵活配电单元是基于现代电力电子技术设计的具有灵活控制系统潮流分配、改善电压等功能的能量交换装置,可有效改善系统的潮流分配。文中首先分析灵活配电单元的稳态计算模型和控制策略,再将其加入交直流配电网后进行潮流计算;然后构建基于全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)、网络损耗和电压偏差3个指标的综合接受度标准模型,利用混沌序列、高斯变异以及改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)进行模型求解,提高计算精度及收敛速度;最后基于IEEE 33节点系统对文中方法进行验证分析。

1 灵活配电单元的计算模型及控制策略

1.1 灵活配电单元的稳态计算模型

文中针对三级式标准化的灵活配电单元进行统一建模,如图1所示。高、低压侧的一次侧由若干个交流/直流(AC/DC)端口和直流/直流(DC/DC)端口组成,各端口连接其对应侧的公共高压直流母线 E_n 和低压直流母线 E_1 。灵活配电单元采用背靠背直流输电形式,与电网柔性互联,实现能量灵活调节及传递等功能。隔离区的双向DC/DC模块作为中心枢纽,实现电气隔离、能量双向传递及电压转换^[14-15]。图1中的 P 、 Q 分别为传输的有功和无功功率,不同的下标表示相应的模块。下文将给出

灵活配电单元的稳态潮流模型。

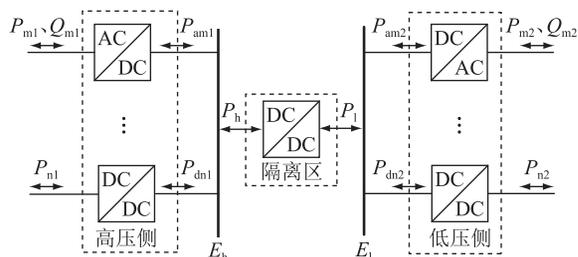


图1 三级式标准化灵活配电单元拓扑
Fig.1 Three-level standardized flexible distribution unit topology

1.1.1 交流端口计算模型

灵活配电单元交流端口的 AC/DC 可近似等效为无损耗换流器与等效阻抗的串并联,等效模型如图 2 所示。

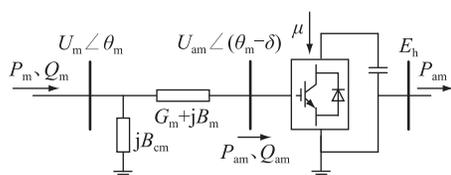


图2 交流端口等效模型
Fig.2 Equivalent model of AC port

端口与网络节点相连,交流节点电压为 $U_m \angle \theta_m$,单元端口通过定义为网络虚拟节点的形式等效到整体,该虚拟节点电压为 $U_{am} \angle (\theta_m - \delta)$,其中 δ 为电压相角差。该端口与系统节点传输的有功功率 P_m 和无功功率 Q_m 为:

$$\begin{cases} P_m = G_m U_m^2 - U_m U_{am} (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta) \\ Q_m = - (B_{cm} + B_m) U_m^2 + \\ U_m U_{am} (B_m \cos \delta - G_m \sin \delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: G_m 、 B_m 分别为端口及转换器损耗的电导和电纳; B_{cm} 为无功补偿对应的电纳。

AC/DC 传输的有功功率 P_{am} 和无功功率 Q_{am} 为:

$$\begin{cases} P_{am} = -G_m^2 U_{am}^2 + U_m U_{am} (G_m \cos \delta - B_m \sin \delta) \\ Q_{am} = B_m^2 U_{am}^2 - U_m U_{am} (G_m \sin \delta + B_m \cos \delta) \end{cases} \quad (2)$$

E_h 与 U_{am} 的关系为:

$$E_h = \mu U_{am} \quad (3)$$

式中: μ 为 AC/DC 的电压转化系数,其与线路接线方式、调制比等因素有关。

AC/DC 的损耗 $P_{loss,ac}$ 为:

$$P_{loss,ac} = P_{am} - P_m \quad (4)$$

1.1.2 直流端口计算模型

灵活配电单元直流端口的 DC/DC 可近似等效

为理想变压器(变比为 $1:k$)和等效电阻的串联,等效模型如图 3 所示。

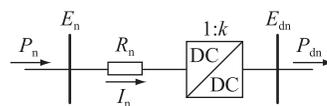


图3 直流端口等效模型
Fig.3 Equivalent model of DC port

DC/DC 内部损耗等效为电阻 R_n ;一次侧电压为 E_n 、电流为 I_n 、传输功率为 P_n ;二次侧电压为 E_{dn} 、传输功率为 P_{dn} 。

$$E_n = \frac{E_{dn}}{k} + I_n R_n \quad (5)$$

$$P_n = \frac{E_n^2}{R_n} - \frac{E_n E_{dn}}{k R_n} \quad (6)$$

$$P_{dn} = \frac{E_n E_{dn}}{R_n} - \frac{E_{dn}^2}{k R_n} \quad (7)$$

直流端口与交流端口损耗计算模型的理论相近,且当灵活配电单元内部的直流母线电压等级与外部直流网络节点电压等级相同时,可认为直流母线直接与外部节点相连,不考虑 DC/DC 的损耗。

1.1.3 隔离区功率平衡模型

假设灵活配电单元有 x 个交流端口和 y 个直流端口接入网络中,功率以注入隔离区 DC/DC 的方向为正,则隔离区功率平衡模型为:

$$\Delta P_{DC} = \sum_{i=1}^x P_{ami} + \sum_{j=1}^y P_{dnj} \quad (8)$$

式中: ΔP_{DC} 为隔离区 DC/DC 的功率损耗。

式(1)一式(8)构成三级式标准化灵活配电单元的稳态计算模型。

1.2 灵活配电单元控制方式

基于灵活配电单元的等效模型和拓扑,可以确定其端口的控制方程,针对端口的有功功率和无功功率分别进行控制,交流端口的控制表达式 X_{P_m} 、 X_{Q_m} 为:

$$\begin{cases} X_{P_m} = \omega_{P_m} (P_m - P_m^{ex}) + \omega_{E_h} (E_h - E_h^{ex}) = 0 \\ X_{Q_m} = \omega_{Q_m} (Q_m - Q_m^{ex}) + \omega_{U_m} (U_m - U_m^{ex}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω 为对应其下标变量的控制系数;上标 ex 表示其对应变量的期望值。

直流网络没有无功功率,因此,直流端口的控制表达式 X_{P_n} 为:

$$X_{P_n} = \omega_{P_n} (P_n - P_n^{ex}) + \omega_{E_n} (E_n - E_n^{ex}) = 0 \quad (10)$$

式中: ω 根据控制情况,可取 0 或 1。

2 DG 优化配置模型

2.1 目标函数

在实际配电网规划中,须从多角度、多方面进行考虑。文中综合考虑 LCC^[16-17]、网络损耗及电压偏差指标,构建目标函数为:

$$k = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (11)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 LCC、网络损耗及电压偏差对应的接受度; k 为总目标函数值。

2.1.1 LCC 标准

DG 规划的 LCC 计算模型为:

$$C = C_{in} + C_m + C_e + C_s \quad (12)$$

式中: C 为总成本; C_{in} 为 DG 的初始投资成本; C_m 为 DG 的运行维护成本; C_e 为环境成本; C_s 为 DG 的废弃退役成本。

DG 的初始投资成本 C_{in} 为:

$$C_{in} = \frac{r(1+r)^{T_r}}{(1+r)^{T_r} - 1} \sum_{i=1}^{N_1} (C_{in,i} S_{i,DC}) \quad (13)$$

式中: r 为贴现率; T_r 为投资回收年限; N_1 为节点总数; $C_{in,i}$ 为 DG 在节点 i 的单位容量投资费用; $S_{i,DC}$ 为节点 i 的 DG 装机容量。

DG 的运行维护成本 C_m 为:

$$C_m = \sum_{j=0}^{T-1} \left(\frac{1+a}{1+r} \right)^j \left[\sum_{i=1}^{N_1} (\lambda_i t_{i,max} S_{i,DC} \alpha_i) \right] \quad (14)$$

式中: T 为全寿命周期年限; a 为通货膨胀率; λ_i 为节点 i 处的 DG 折合到单位发电量的检修维护成本; $t_{i,max}$ 为节点 i 处 DG 最大发电利用小时数; α_i 取 1、0 分别表示在节点 i 处是否装设 DG。

环境成本 C_e 为:

$$C_e = C_c + C_1 = W \sum_{g=1}^G [M_g (V_g + P_g)] \quad (15)$$

式中: C_c 为环境资源成本; C_1 为排放污染物后的处罚成本; W 为总年发电量; G 为污染物种类总数; M_g 为每发一度电排放第 g 类污染物的排放量; V_g 、 P_g 分别为排放第 g 类污染物的环境价值及处罚标准。

DG 的废弃退役成本 C_s 为:

$$C_s = (C_b - C_a) \left(\frac{1+a}{1+r} \right)^{T-1} \quad (16)$$

式中: C_b 为 DG 的报废成本; C_a 为 DG 的剩余价值。

2.1.2 网络损耗标准

配电网的有功损耗 P_{loss} 为:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_1} [G_m (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})] \quad (17)$$

式中: U_i 、 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相角差。

2.1.3 电压偏差标准

优化时考虑电压偏差 d 为:

$$d = \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{U_i - U_N}{U_N} \right)^2 \quad (18)$$

式中: U_N 为标准电压。

2.2 接受度标准函数

文中通过构建 LCC、网络损耗和电压偏差的接受度标准函数,进一步建立 DG 选址定容优化模型。

(1) LCC 接受度标准函数如下。

$$k_1 = \begin{cases} 1 & C = 0 \\ \frac{a_1 m_1^{0.5} + b_1 m_1}{a_1 + b_1} & 0 < C < C_{max} \\ 0 & C = C_{max} \end{cases} \quad (19)$$

$$m_1 = \frac{C_{max} - C}{C_{max}} \quad (20)$$

式中: a_1 、 b_1 为设定参数; C_{max} 为满足约束条件时配电网中 DG 配置优化后在理想情况下消费的最大成本。

(2) 网络损耗接受度标准函数如下。

$$k_2 = \begin{cases} 1 & P_{loss} < P_{loss,min} \\ \frac{a_2 m_2^2 + b_2 m_2}{a_2 + b_2} & P_{loss,min} \leq P_{loss} \leq P_{loss,max} \\ 0 & P_{loss} > P_{loss,max} \end{cases} \quad (21)$$

$$m_2 = \frac{P_{loss,max} - P_{loss}}{P_{loss,max} - P_{loss,min}} \quad (22)$$

式中: a_2 、 b_2 为设定参数; $P_{loss,min}$ 、 $P_{loss,max}$ 分别为 P_{loss} 的最小值和最大值。

(3) 电压偏差接受度标准函数为:当电压偏差在可接受范围内即 2% 时,可认为其接受度为 1;当电压偏差超过 10% 时,接受度为 0。归一化处理后为:

$$k_3 = \begin{cases} 0 & k_{3,bef} < k_{3,min} \\ \frac{k_{3,bef} - k_{3,min}}{k_{3,max} - k_{3,min}} & k_{3,min} \leq k_{3,bef} \leq k_{3,max} \\ 1 & k_{3,bef} > k_{3,max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $k_{3,bef}$ 、 k_3 分别为接受度归一化前、后的值; $k_{3,min}$ 、 $k_{3,max}$ 分别为 k_3 的最小值和最大值。

2.3 约束条件

对于配电网中的 DG 选址定容问题,须满足的约束条件如下。

(1) 等式约束条件为一般节点潮流平衡约束。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_l} [U_j(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})] + P_t \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_l} [U_j(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})] + Q_t \end{cases} \quad (24)$$

式中: G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导、电纳; P_t 、 Q_t 分别为注入灵活配电单元的有功和无功功率, 为正时表示注入, 为负时表示流出。

(2) 节点电压约束如下。

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (25)$$

式中: $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压的最小值和最大值。

(3) 节点传输功率约束如下。

$$P_{ij} < P_{ij\max} \quad (26)$$

式中: P_{ij} 、 $P_{ij\max}$ 分别为节点 i 和 j 间线路传输功率及其最大值。

(4) DG 总安装容量约束如下。

$$\sum_{i=1}^{N_l} S_{i,DG} \leq \frac{1}{4} S_{L\max} \quad (27)$$

式中: $S_{L\max}$ 为总负荷最大值。

3 基于 ISSA 的 DG 选址定容

麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA) 是一种启发于麻雀觅食和反捕食行为的新型群智能优化算法^[18]。SSA 鲁棒性强, 稳定性好。然而, 当 SSA 的搜索接近全局最优时, 仍会出现种群多样性减少、易陷入局部最优等问题。文中考虑到高斯分布具有较好的局部搜索能力以及 Tent 混沌序列遍历均匀、收敛快等优点, 利用 Tent 混沌映射初始化麻雀种群, 同时引入高斯变异和混沌扰动改进 SSA, 帮助个体跳出局部最优, 提高收敛速度, 更精确优化 DG 的选址定容。

文中计算各节点安装单位容量 DG 引起的总适应度变化量, 并以此作为依据计算各节点作为备选 DG 安装位置的概率, 进而优化计算 DG 的安装位置。ISSA 解决 DG 选址定容优化问题的具体步骤如下。

步骤 1: 初始化种群数量, 最大化迭代次数, 定义相关参数。

步骤 2: 计算各节点安装单位容量 DG 的总适应度变化量, 计算各节点安装 DG 的概率。

步骤 3: 基于求得的备选概率, 将 DG 的安装位置和安装容量作为决策变量, 每只麻雀包含 DG 的安装位置和容量两部分信息, 利用 Tent 混沌序列初

始化种群, 引入随机变量 Tent 映射表达式如下。

$$z_{i+1} = \begin{cases} 2z_i + \frac{\text{rand}(0,1)}{N_m} & 0 \leq z_i \leq \frac{1}{2} \\ 2(1 - z_i) + \frac{\text{rand}(0,1)}{N_m} & \frac{1}{2} < z_i \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

式中: N_m 为混沌序列内的粒子个数; z_i 为混沌序列。首先随机产生 $(0, 1)$ 内的初值 z_0 , 再利用式 (28) 进行迭代, 直到产生 N_m 个混沌粒子。

步骤 4: 计算各麻雀适应度值 f , 选出当前全局最优和最差适应度值 f_g 、 f_w , 并确定麻雀位置。

步骤 5: 重新计算各节点的备选概率。

步骤 6: 选取适应度值较优的一部分麻雀作为发现者, 剩余为加入者, 更新发现者和加入者的位置, 发现者、加入者的位置更新方式参考文献[18]。

步骤 7: 随机选取一部分麻雀作为侦察预警, 侦察预警麻雀的位置更新方式参考文献[18]。

步骤 8: 完成一次迭代后, 重新计算第 u 只麻雀的适应度值 f_u 和种群的平均适应度值 f_{avg} 。若 $f_u > f_{\text{avg}}$ 则采用 Tent 混沌扰动; 否则采用高斯变异, 用均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布随机数替代原参数。

步骤 9: 更新种群最优及最劣适应度值及其位置, 判断是否满足最大迭代次数或求解精度, 满足则输出结果, 不满足则重复步骤 5—步骤 9。

步骤 4—步骤 9 中的麻雀位置既包括 DG 的位置信息也包括容量信息, 即按照同样的寻优方法分别对 DG 的位置和容量进行寻优并组合, 找出达到最优适应度值的组合方式。

4 算例分析

以 IEEE 33 节点配电网系统为例, 灵活配电单元 3 个端口分别连接节点 2、节点 3、节点 4, 如图 4 所示。该系统是一个三相平衡系统, 呈辐射状, 节点 1 为平衡节点^[19-20], 除节点 1 外的节点都允许安装 DG。基准功率为 10 MW, 系统电压等级为 12.66 kV, 总有功负荷为 3 715 kW, 总无功负荷为 2 300 kvar^[21]。

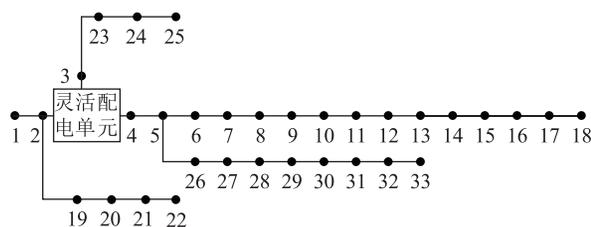


图 4 IEEE 33 节点配电网系统
Fig.4 IEEE 33-node distribution network system

针对原始系统和接入灵活配电单元的系统分别采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法、SSA 和 ISSA, 并对算例进行仿真分析。接入的 DG 功率因数为 0.9, 在前推回代法的潮流计算中收敛精度为 $\varepsilon = 10^{-4}$ 。ISSA 的参数设置为种群群体大小 200, 最大迭代次数 1 000, 安全值 0.8。

接入灵活配电单元系统的 PSO 算法、SSA 和 ISSA 收敛曲线对比如图 5 所示。由图 5 可知, ISSA 取得最优值需要的迭代次数最少, 收敛速度最快, 且得到的全局最优解最好。

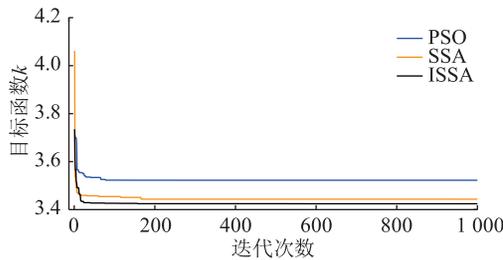


图 5 算法收敛曲线

Fig.5 Convergence curves of algorithms

3 种算法在目标函数值求得最优解时, 有无接入灵活配电单元的 DG 优化配置结果如表 1 所示。

表 1 不同情况下 DG 接入位置及容量
Table 1 DG access location and capacity under different conditions

系统	接入节点(容量/kW)					
	PSO		SSA		ISSA	
原始系统	7(50)	28(30)	8(40)	14(30)	8(40)	26(30)
	10(50)	30(100)	15(40)	33(70)	28(60)	29(50)
	17(40)		25(60)		25(60)	32(70)
接入灵活 配电单元 的系统	29(20)	3(210)	29(70)	33(50)	5(30)	17(60)
	23(50)	5(120)	8(40)	13(120)	16(70)	29(60)
	7(180)	20(40)	6(20)		31(30)	9(100)

原始系统和接入灵活配电单元的系统各指标接受度如表 2 所示。

表 2 不同算法各指标的接受度
Table 2 Acceptance of indicators of different algorithms

系统	指标	PSO	SSA	ISSA
原始系统	k_1	0.825 1	0.800 2	0.800 4
	k_2	0.763 1	0.837 4	0.851 3
	k_3	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	k	3.522 5	3.443 8	3.424 0
接入灵活 配电单元 的系统	k_1	0.842 1	0.812 7	0.811 2
	k_2	0.752 1	0.812 3	0.863 2
	k_3	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	k	3.517 1	3.461 6	3.391 2

结合表 2 中数据, 在考虑多个指标时, 根据目标

函数形式, 可看出接入灵活配电单元的系统各指标接受度更高, 即优化效果更好。

DG 并网将对系统的电压产生影响, 接入灵活配电单元后同样对系统电压产生影响, 利用 PSO 算法、SSA 和 ISSA 进行求解, 优化前后的各节点电压幅值如图 6 所示, 优化前后的各节点电压相角如图 7 所示。

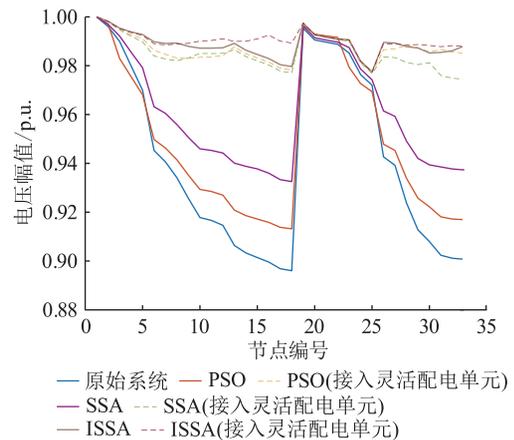


图 6 各节点电压幅值

Fig.6 Voltage amplitude of each node

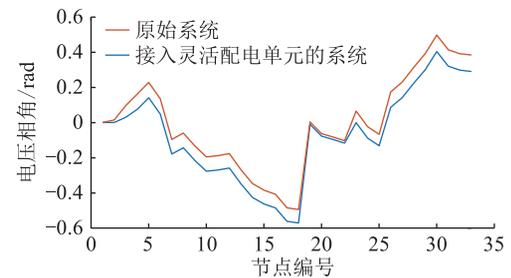


图 7 各节点电压相角

Fig.7 Phase angle of each node

由图 6 和图 7 可知, 接入灵活配电单元后通过算法进行 DG 优化配置, 系统各节点电压有了明显改善, 网络平均电压也明显增加, 有效改善了系统电压分布, 提高了配电网的环境效益、经济效益以及系统稳定性。由图 6 可知, 配电网接入 DG 后, 除了节点 1 外, 其余节点电压均提高。原始系统的节点电压为 0.896 0~1.000 0 p.u., 电压波动较大, 接入灵活配电单元后, 电压波动明显变小。原始系统节点 18 的电压最低, 为 0.896 0 p.u.。原始系统平均电压为 0.941 3 p.u.。

各算法优化后电压水平数据如表 3 所示。由表 3 对比分析可知, 接入灵活配电单元的系统 ISSA 优化后的节点最低电压为 0.978 9 p.u., PSO 算法和 SSA 优化后的节点最低电压分别为 0.978 2 p.u. 和 0.977 7 p.u.。因此, 接入灵活配电单元可有效提高节点电压的最低值, 使节点电压更加稳定。

表3 不同算法的节点电压对比
Table 3 Node voltage comparison of different algorithms

系统	电压	PSO	SSA	ISSA
原始系统	最低电压/ p.u.	0.912 9	0.934 6	0.979 1
	平均电压/ p.u.	0.950 4	0.968 9	0.991 2
	最低电压 节点	18	18	30
接入灵活 配电单元 的系统	最低电压/ p.u.	0.978 2	0.977 7	0.978 9
	平均电压/ p.u.	0.987 6	0.983 1	0.988 7
	最低电压 节点	18	25	25

5 结语

文中提出一种基于灵活配电单元的 DG 选址定容优化方法,在分析灵活配电单元的稳态计算模型和控制策略后,进行配电网系统的潮流计算,然后构建 DG 配置的综合接受度标准模型,最后运用 ISSA 解决 DG 选址定容的优化问题。考虑灵活配电单元后对 DG 进行配置,可以得到更优的配置结果,从而更好地改善系统电压。以 IEEE 33 节点系统为例进行仿真分析,结果表明,计及灵活配电单元时 DG 配置的结果更经济可靠,且运用 ISSA 的优化结果更高效准确。

参考文献:

[1] 杨更宇. 基于粒子群算法的分布式电源优化配置研究[J]. 技术与市场,2020,27(9):22-26,30.
YANG Gengyu. Research on optimal allocation of distributed generation based on particle swarm optimization[J]. Technology and Market,2020,27(9):22-26,30.

[2] 杨磊,杨晓辉,吴越,等. 基于改进猫群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(1):95-100.
YANG Lei, YANG Xiaohui, WU Yue, et al. Research on optimized distributed generations locating based on modified cat swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(1):95-100.

[3] LIU W J, CHEN Y, DING F. Distributed generator-based distribution system service restoration strategy and model-free control methods [J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4 (2): 126-135.

[4] LIU W J, CHEN Y, DING F. Distributed generator-based distribution system service restoration strategy and model-free control methods [J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4 (2): 126-135.

[5] 胡晶,陈红坤,陈磊,等. 考虑多主体利益与需求响应的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(15):

38-46.
HU Jing, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Distributed generation planning in an active distribution network considering multi-agent interests and demand response[J]. Power System Protection and Control,2021,49(15):38-46.

[6] HUANG J, QI Y F, CHANG K C, et al. Simulation analysis of optimized configuration of distributed power [M]//Advances in Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Singapore:Springer Singapore,2021:505-513.

[7] 肖永江,于永进,张桂林. 基于改进乌燕鸥算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):148-155.
XIAO Yongjiang, YU Yongjin, ZHANG Guilin. Optimal configuration of distributed power generation based on an improved sooty tern optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control,2022,50(3):148-155.

[8] 赵龙,杨波,崔灿,等. 基于多种群牵引差分进化算法的含分布式电源配电网规划[J]. 供用电,2022,39(5):61-69.
ZHAO Long, YANG Bo, CUI Can, et al. Distribution network planning with distributed generation based on multi group traction differential evolution algorithm [J]. Distribution & Utilization,2022,39(5):61-69.

[9] 石立国,李延真,关雪琳,等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. 供用电,2022,39(5):33-40,53.
SHI Liguang, LI Yanzhen, GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations [J]. Distribution & Utilization, 2022,39(5):33-40,53.

[10] 陈海东,庄平,夏建矿,等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(1):149-154.
CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm [J]. Power System Protection and Control,2016,44(1):149-154.

[11] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术,2014,38(12):3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer [J]. Power System Technology, 2014,38(12):3405-3411.

[12] 周小婷,陈堂功,范佳莹,等. 基于多目标人工搜索群算法的分布式电源优化[J]. 电测与仪表,2021,58(2):34-39.
ZHOU Xiaoting, CHEN Tangong, FAN Jiaying, et al. Distributed generation optimization based on multi-objective artificial searching swarm algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(2):34-39.

[13] 苗键强,张宁,康重庆. 能量路由器对于配电网运行优化的影响分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (10): 2832-2839.
MIAO Jianqiang, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis on the influence of energy router on the optimal operation of distri-

- bution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2832-2839.
- [14] 郭靖,李可军,王景山,等. 含能源路由器的交直流网络潮流计算模型及可行解求取[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 85-93.
- GUO Jing, LI Kejun, WANG Jingshan, et al. Power flow calculation model and feasible solution of AC-DC network with energy routers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 85-93.
- [15] 王聪,徐晓贤,沙广林,等. 计及灵活配电单元的交直流混合配电系统潮流计算方法[J]. 电力建设, 2018, 39(5): 56-62.
- WANG Cong, XU Xiaoxian, SHA Guanglin, et al. Calculation method of power flow in AC & DC hybrid distribution system with flexible power distribution equipment [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 56-62.
- [16] 宋璇坤,辛培哲,李珊,等. 考虑多重不确定性因素的分布式电源鲁棒规划方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 56-63.
- SONG Xuankun, XIN Peizhe, LI Shan, et al. Robust planning method of distributed generation considering multiple uncertainties [J]. Smart Power, 2019, 47(6): 56-63.
- [17] 杨欢红,王洁,郇能灵,等. 基于灰靶决策和多目标布谷鸟算法的微电网分布式电源鲁棒优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 20-27.
- YANG Huanhong, WANG Jie, TAI Nengling, et al. Robust optimization of distributed generation in a microgrid based on grey target decision-making and multi-objective cuckoo search algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 20-27.
- [18] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [19] 姚慧芳,李勇,谭益,等. 考虑电量外送的多电压等级电网分布式电源优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 54-62.
- YAO Huifang, LI Yong, TAN Yi, et al. Optimal allocation of distributed generations considering power export in multi-voltage level grid [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 54-62.
- [20] 徐雨田,廖清芬,刘涤尘,等. 主动管理模式基于多场景分析的分布式电源规划[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2): 38-46.
- XU Yutian, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Distributed generation planning considering active management based on multi-scene analysis [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2): 38-46.
- [21] MIAO J Q, ZHANG N, KANG C Q. Generalized steady-state model for energy router with applications in power flow calculation [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, MA. IEEE, 2016: 1-5.

作者简介:



杨晓辉

杨晓辉(1978),男,博士,教授,研究方向为智能控制和微电网优化(E-mail: yangxiaohui@ncu.edu.cn);

杨爽(1996),女,硕士在读,研究方向为分布式电源优化配置;

徐正宏(1997),男,硕士在读,研究方向为智能控制。

Optimal configuration method of distributed generation considering flexible distribution unit

YANG Xiaohui, YANG Shuang, XU Zhenghong, ZHANG Liufang, YANG Chunsheng
(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The unreasonable planning of the access location and capacity of distributed generation (DG) affects the distribution network. The flexible power distribution unit has the advantages of flexible power flow distribution and voltage improvement. The steady-state calculation model and control strategy model of the flexible distribution unit are put forward. In order to locate and fix the capacity of DGs more reasonably, the comprehensive acceptance standard model of three indexes, namely life cycle cost (LCC), network loss and voltage deviation are established firstly. Then, the improved sparrow search algorithm (ISSA) is proposed to solve the model. Gaussian variation and Tent chaos are introduced to improve the global searching ability and convergence speed of the algorithm. Finally, the IEEE 33-node distribution system is taken as an example for simulation analysis. Considering the two cases of unconnected and connected flexible distribution unit respectively, particle swarm optimization (PSO) algorithm, sparrow search algorithm (SSA) and ISSA are used to solve the problem. The results show that the power flow of the system and the system operating status after the DGs are configured can be improved by taking into account the flexible distribution unit. And the optimization result of the ISSA is more efficient and accurate than the optimization results of other algorithms.

Keywords: distributed generation (DG); flexible distribution unit; acceptance function; improved sparrow search algorithm (ISSA); Gaussian mutation; location and capacity selection

(编辑 吴楠)