

计及电能质量约束的充电设施布局优化方法

徐昌宝¹, 丁健¹, 宋宏剑¹, 潘成达¹, 孙鹏博², 王启华², 陈辉²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司 通辽供电公司, 内蒙 通辽 028000;

2. 西安爱科赛博电气股份有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要:提出了一种计及电能质量约束的电动汽车充电设施布局优化方法;建立了综合考虑节点负荷三相不平衡度均值以及节点电压偏差最大值的电能质量综合指标模型;建立了综合考虑第一类和第二类静态电压稳定指标的数学模型;将综合电能质量指标、网损指标以及静态电压稳定指标作为优化目标,然后基于改进的多目标布谷鸟搜索算法进行求解。以IEEE 33节点配电系统作为算例,给出了充电设施的布局优化方案。仿真结果表明:充电设施接入后节点三相不平衡度显著降低,电压偏差保持在允许范围内;比较了不同优化目标及优化方法的优化效果,验证了所提优化方法的有效性、合理性以及优越性。

关键词:配电网;电能质量;充电设施;布局优化;多目标布谷鸟搜索算法

中图分类号:TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23710

Charging Facility Distribution Optimization Method Considering Power Quality Constraints

XU Changbao¹, DING Jian¹, SONG Hongjian¹, PAN Chengda¹,

SUN Pengbo², WANG Qihua², CHEN Hui²

(1. Tongliao Power Supply Company, State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd., Tongliao 028000, Nei Monggol, China; 2. Xi'an Action Power Electric Co., Ltd., Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: An optimization method was proposed to layout electric vehicle charging facilities considering power quality constraints. A comprehensive power quality index model considering the average value of nodal three-phase unbalance degree and the maximum value of nodal voltage deviation was established. Meanwhile, the mathematical model considering the first and second static voltage stability indexes was established. Then, the comprehensive power quality index, network loss index and static voltage stability index were taken as the optimization objectives, the improved multi-objective cuckoo search algorithm was utilized to solve the proposed model. The IEEE 33 bus distribution system was taken as an example, and the distribution optimization scheme of charging facilities was given. The simulation results show that the nodal three-phase unbalance is significantly reduced after the charging facilities were connected, and the voltage deviation keep within the allowable range. At the same time, the influence of different optimization objectives and optimization methods were compared to verify the effectiveness, rationality and superiority of the proposed optimization method.

Key words: distribution network; power quality; charging facilities; placement optimization; multi-objective cuckoo search algorithm(MOCS)

电动汽车以绿色环保无污染的巨大优势赢得了良好发展前景,充电设施的配套建立是电动汽车产业链中的重要一环。2019年国际能源署IEA发布的年度电动汽车产业发展报告中指出,2030年全球充电桩保有量预计高达2.4亿台,总充电功率高达1 800 GW^[1]。国家电网公司的预测数据显示,2040年我国电动汽车保有量接近3亿

辆,日充电功率接近6亿kW。充电设施正处于水深火热的建设浪潮中,然而不合理的充电设施接入会对电网带来很多问题,如电压偏差越限、三相不平衡度加剧以及网损增加等。因此,充电设施布局优化问题已引起社会的广泛关注。

国内外学者对该问题从不同角度出发进行了深入研究。文献[2-6]都考虑了充电站的投资

基金项目:国家自然科学基金(51507139)

作者简介:徐昌宝(1984—),男,本科,高级工程师,Email:1051066679@qq.com

成本和运行成本。其中,文献[2]以需求响应成本最小化为优化目标提出了一种充电设施布局优化方法;文献[3]建立了电动汽车充电站总成本最小为目标的数学模型,并采用改进的原始-对偶内点算法对所提模型进行求解;文献[4]以最小化充电站的投资成本和运行成本为目标建立模型,并采用分解的多目标进化算法对模型进行求解;文献[5-6]都以充电站运行成本和投资成本综合最小为目标,分别提出了考虑配电网接纳能力约束的充电设施最优规划方法和一种基于两阶段的充电设施最优规划方法。还有部分文献以用户出行需求为目标^[7]或者以对电网的影响最小为目标^[8]建立了相应的优化模型。文献[9]建立了考虑配电网的电压稳定性和充电服务质量的充电设施最优规划数学模型,并通过自适应粒子群算法对模型进行求解。文献[10]研究了海岛电动汽车充电站点布局优化问题,提出了一种考虑投资运营成本和可再生能源利用率的功率分配方案。上述文献大多以单相系统为研究对象,未考虑充电设施布局对系统三相不平衡的影响,没有深入分析优化目标数量及类型对整体优化结果的影响。

上述文献所建模型大多为多目标优化模型,而多目标优化问题求解大致分为两种思路:一种是将各目标按其相对重要性进行线性加权后转化为单目标问题进行求解,将多目标问题转化为单目标问题求解会使原有问题简化,已在材料^[11]和电力电子^[12-13]等工业领域得到了应用。但是该方法也存在一些问题,即各个目标之间的不可公度性决定了多个目标不能单纯地线性加权,且将多目标转化为单目标的过程中加入了人为因素,权值的分配带有主观性;另外一种思路是基于Pareto最优解的方法,该方法考虑了多目标优化问题各个子目标之间的矛盾性,尽可能使各个子目标都达到最优,最终给出所有Pareto最优解构成的非支配解集,为决策者提供了全方位的选择,然而该方法需要依赖遗传算法^[14]、粒子群算法^[15]等智能优化算法或者仿生学算法。本文选取布谷鸟搜索算法^[16]作为求解算法,该算法的优势在于将莱维飞行策略融入算法中,提高了算法的求解效率以及求解精度^[17]。

本文提出了一种计及电能质量约束的充电设施布局多目标优化方法。首先建立节点三相不平衡度均值和节点电压偏差最大值的综合电

能质量指标模型、支路静态电压稳定指标模型;然后给出了综合电能质量指标最小、网损最小以及静态电压稳定裕度最小的多目标优化模型;其次,针对传统布谷鸟搜索算法存在收敛速度慢的问题,本文将动态发现概率和步长融入算法中,并结合非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm- II, NSGA- II)的非支配排序思想,对多目标布谷鸟搜索优化算法进行改进,并采用改进算法对所提模型进行求解;最后通过IEEE 33节点配电网算例验证了所提方法的有效性,对比了不同优化目标以及优化方法对优化结果的影响,并分析了各指标之间的相互影响。

1 多目标优化模型建立

1.1 电压偏差及三相不平衡度

配电网中线路末端负荷较重会引起电压偏差越限,同时三相线路负荷不均匀的分布会导致三相不平衡。电动汽车充电设施的不合理规划加剧了配电网电能质量问题,本文从电压偏差和三相不平衡角度出发,通过优化充电设施的空间分布,降低由电动汽车充电设施引起的电压偏差以及三相不平衡问题,建立了电能质量综合指标最小的数学模型,如下式:

$$\min(f_1) = \frac{\omega}{N} \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,\text{unb}} + \max(\Delta U_i) \quad (1)$$

其中

$$\omega = \Delta U_{\max} / \Delta P_{\text{unb},\max} \quad (2)$$

$$\Delta P_{i,\text{unb}} = \sum_{\varphi=a,b,c} (P_{\varphi,i} - P_{\text{avg},i})^2 \quad (3)$$

$$\Delta U_i = |U_i - U_N| \quad (4)$$

式中: ΔU_i 为节点*i*的电压偏差; $\Delta P_{i,\text{unb}}$ 为节点*i*的负荷三相不平衡度; $\Delta U_{\max}$ 为电压偏差的上限值,取值10%; $\Delta P_{\text{unb},\max}$ 为三相不平衡度的上限值,取值2%; ω 为权重系数; $P_{\varphi,i}$ 为流过节点*i*的负荷单相有功功率; $P_{\text{avg},i}$ 为节点*i*的负荷单相有功功率的平均值; U_i 为节点*i*的电压幅值; U_N 为电压基准值。

节点负荷三相不平衡度可以用来近似表征节点电压/电流不平衡度^[18],原因是后者需要通过序分量法三相潮流计算,计算公式比较复杂;其次,负荷的三相不平衡是导致配电网三相不平衡的主要原因。

1.2 网损

电动汽车充电设施的合理规划能够降低对

系统网损的影响,系统网损最小的数学模型可以表示为

$$\min(f_2) = \sum_{l=1}^{l_{\max}} P_{\text{loss},l} \quad (5)$$

其中

$$P_{\text{loss},l} = \sum_{i=1}^{l_{\max}} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

式中: l 为支路编号; $l_{\max}$ 为支路总数; i, j 分别为支路 l 的首、末节点; G_{ij} 为支路 l 的电导; U_i, U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相角差。

1.3 静态电压稳定指标

电动汽车大规模无序接入会对配电网的静态电压稳定性产生一定的影响,严重时可能会导致电压崩溃。静态电压稳定指标指系统当前状态与静态电压稳定极限点之间的距离,是评估电动汽车充电设施对电网电压稳定性影响的重要手段。文献[19]将配电网静态电压稳定判据划分为两类:第一类是基于潮流解存在性的电压稳定判据,反映了负荷分布与电压稳定性的关系;第二类是基于负荷—电压特性的电压稳定判据,反映了系统抗扰动的能力。同时指出了系统电压稳定性分析需要同时考虑第一类和第二类电压稳定判据。静态电压稳定指标取值在0~1之间,值越小说明系统稳定性越好,抗干扰能力越强。因此,为了减小电动汽车充电设施对电网电压稳定性的影响,静态电压稳定指标越小越好。

系统静态电压稳定指标最小的数学模型为

$$\min(f_3) = V_z \quad (7)$$

其中

$$V_z = \max(V_{z1}^j) + \max(V_{z2}^j) \quad (8)$$

式中: V_z 为系统的综合静态电压稳定裕度; V_{z1}^j, V_{z2}^j 分别为支路 l 的第一类和第二类静态电压稳定指标。

第一类静态电压稳定指标可以表示为

$$V_{z1}^j = \frac{4[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})U_i^2]}{U_i^4} \quad (9)$$

式中: P_j, Q_j 分别为节点 j 的有功功率和无功功率; R_{ij}, X_{ij} 分别为支路 l 的电阻和电抗。

第二类静态电压稳定指标可以表示为

$$V_{z2}^j = |k_1|/|k_2| \quad (10)$$

其中

$$k_1 = S_j/U_j^2 \quad (11)$$

$$k_2 = (I_{\text{Re},i} dI_{\text{Re},i}/dU_i + I_{\text{Im},i} dI_{\text{Im},i}/dU_i)/|I_i| \quad (12)$$

$$dI_{\text{Re},i}/dU_i \approx (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \Delta U_j / \Delta U_i \quad (13)$$

$$dI_{\text{Im},i}/dU_i \approx (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) \Delta U_j / \Delta U_i \quad (14)$$

式中: S_j 为节点 j 的视在功率; $I_{\text{Re},i}, I_{\text{Im},i}$ 分别为流过节点 i 的电流实部和虚部; $\Delta U_i, \Delta U_j$ 分别为仅改变节点 i 和 j 无功功率得到的潮流计算的电压差; B_{ij} 为线路 l 的电纳。

1.4 约束条件

约束条件主要分为两大类:第一类是电动汽车充电设施约束,第二类是电网约束。电动汽车充电设施约束包括总容量约束和充电功率约束。电网约束主要包括电压偏差约束、三相不平衡度约束和线路系统潮流约束。

1) 充电设施容量约束如下:

$$S_{\text{ev},i} \leq S_{\text{ev,max}} \quad (15)$$

2) 充电设施功率约束如下:

$$P_{\text{ev}} = \gamma P_{\text{ev,norm}} \quad (16)$$

式中: $S_{\text{ev},i}, S_{\text{ev,max}}$ 为节点 i 的单相电动汽车充电设施容量及容量上限; $P_{\text{ev,norm}}$ 为电动汽车充电设施的额定有功功率; γ 为充电设施效率。

3) 电压偏差约束如下:

$$\max(\Delta U_i) \leq \Delta U_{\max} \quad (17)$$

4) 三相不平衡度约束如下:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,\text{unb}} \leq \Delta P_{\text{unb,max}} \quad (18)$$

5) 系统潮流约束如下:

$$\begin{cases} P_i^{\text{load}} + P_i^{\text{ev}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i^{\text{load}} + Q_i^{\text{ev}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_i^{\text{load}}, Q_i^{\text{load}}$ 为节点 i 的基础有功负荷和无功负荷; $P_i^{\text{ev}}, Q_i^{\text{ev}}$ 为节点 i 充电设施的有功功率和无功功率。

2 多目标布谷鸟优化算法

相比于同类群体优化算法,本文采用具有更高求解效率的布谷鸟搜索算法。布谷鸟搜索算法除了作为群体算法的自身优势外,又具有基于莱维飞行策略的寻优机制以及参数少、鲁棒性强的特点。莱维飞行策略是动物界的主要觅食规律之一,基于莱维飞行策略的求解步长服从重尾分布,能够在当前最优解周围产生新解的同时在远离最优解处产生另外的新解,极大地提高了算

法的求解效率和全局搜索能力。因此,本文选取该算法作为优化模型的求解方法。

2.1 算法原理

布谷鸟搜索算法的两大原理为宿主繁殖行为及莱维飞行策略。宿主繁殖行为是指布谷鸟将自己的卵放在其他鸟类巢穴中由其代为繁殖,如果被宿主发现,则会去其他宿主鸟巢放卵。莱维飞行策略是自然界很多动物的觅食法则,是一种随机或类随机行为,下一次的移动取决于当前位置及移动概率。研究表明,莱维飞行策略在优化算法中具有很强的优势,能够增加种群多样性及求解效率。

2.2 算法模型

多目标布谷鸟搜索算法(multi-objective cuckoo search algorithm, MOCS)的优点是可通过在当前获得的最优解周围进行莱维飞行产生某些新的解,加快局部搜索;同时,可通过远场随机化产生大部分的新解,这些新解的位置将远离当前最优解,确保了算法免于陷入局部最优解。但是,由于随机产生许多的远场解使得求解速度比较慢,通过引入动态步长和动态发现概率,搜索效率能够得到提高。将布谷鸟卵被发现概率 p_a 和搜索步长 ρ 作为随迭代次数而改变的变量。在迭代初期使 p_a 和 ρ 的值尽可能大一点,以增加迭代速度和解的多样性,迭代后期使其小一点来提高求解精度。

标准 MOCS 的鸟窝位置更新公式为^[20]

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \rho \oplus Levy(\beta) \quad (20)$$

其中

$$\rho = \rho_0 (x_j^t - x_i^t) \quad (21)$$

式中: x_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代中第 i 只布谷鸟个体; ρ 为搜索步长; $\oplus$ 为点乘算法; ρ_0 为步长控制量,通常为常数; $Levy(\beta)$ 为莱维飞行算子。

莱维飞行算子 $Levy(\beta)$ 定义如下:

$$Levy(\beta) = \mu / |v|^{1/\beta} \quad (22)$$

$$\sigma_\mu^2 = \{ \Gamma(1+\beta) \sin \frac{\pi\beta}{2} / [\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) 2^{\frac{\beta-1}{2}} \beta] \}^{\frac{1}{\beta}} \quad (23)$$

式中: μ 服从 $N(0, \sigma_\mu^2)$ 的正态分布; v 服从 $N(0, 1)$ 的正态分布; β 为常数,通常取1.5; Γ 为标准伽马分布函数。

标准 MOCS 中第 t 代第 i 只布谷鸟向新鸟窝的转移判据为

$$p_a^{t,i} \leq p_a \quad (24)$$

式中: $p_a^{t,i}$ 为第 t 代第 i 只布谷鸟卵被发现的概率随机数,服从 $U(0, 1)$ 的均匀分布; p_a 为布谷鸟卵被发现的概率,通常取定值。

2.3 算法改进

2.3.1 动态发现概率及步长

虽然标准布谷鸟优化算法采用了莱维飞行策略进行求解,能够提高种群多样性。但是由于发现概率和步长通常取定值,影响了算法收敛速度及精度,如果发现概率较小,步长较大,则会出现迭代次数多、计算精度不高问题;如果发现概率大、步长较小,虽然收敛速度快,但是容易陷入局部最优。因此,本文用迭代次数的函数表示步长以及发现概率,在迭代早期能够加快求解速度、扩大求解范围、提高种群多样性,在迭代后期能够缩小搜索范围,避免全局寻优影响计算效率,便于找到最优解,从而提高该算法的搜索速度和求解精度。

改进的动态发现概率为

$$p_a(g) = p_{a,\max} - \frac{g(p_{a,\max} - p_{a,\min})}{G_{cs}} \quad (25)$$

式中: g 为当前迭代次数; $p_a(g)$ 为第 g 代发现概率; $p_{a,\max}, p_{a,\min}$ 为发现概率上、下限参考值; G_{cs} 为最大迭代次数。

改进的动态步长为

$$\rho(g) = \rho_{\max} \exp[g \cdot \ln(\rho_{\min}/\rho_{\max})/G_{cs}] \quad (26)$$

式中: $\rho(g)$ 为第 g 代搜索步长; $\rho_{\max}, \rho_{\min}$ 为步长上、下限参考值。

2.3.2 非支配排序策略

带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)能够显著提高优化算法求解效率,尤其是对多目标高维优化算法^[21]。NSGA-II可以表示为,如果解 x_1 对应的目标函数同时满足:

$$f_k(x_1) \leq f_k(x_2) \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (27)$$

$$f_k(x_1) < f_k(x_2) \exists k \in \{1, \dots, K\} \quad (28)$$

则称 x_1 为 x_2 的非支配解,或者叫Pareto最优解,称 x_2 为支配解,将所有的非支配解形成非支配解集。NSGA-II的核心思想是,首先通过不断地循环排序,淘汰非支配解,保留支配解,形成非支配解集;其次,通过计算非支配解集中的每一个非支配解单独支配解的数量,并以此为依据来确定非支配解的优先级顺序。单独支配的解的数量越多,非支配解的优先级越高。

MOCS算法计算流程图如图1所示,计算步骤如下:

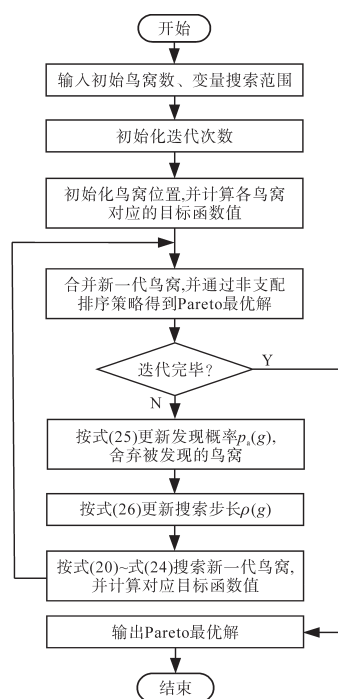


图1 MOCS算法计算流程图

Fig. 1 Flowchart of the multi-objective cuckoo search algorithm

1) 基于多目标布谷鸟优化算法得到第 t 代解集,计算解集中每个解对应的三个目标函数值;

2) 如果第 t 代解集中第 i 个解对应的3个目标函数值都小于第 j 个解,那么第 i 个解支配第 j 个解,并将第 i 个解存入非支配解集中,将第 j 个解存入支配解集中,并更新第 j 个解的被支配次数加1;

3) 如果第 i 个解对应的三个目标函数值不是全部都小于第 j 个解,则认为第 i 个解与第 j 个解互不支配,并将二者存入非支配解集中;

4) 对第 t 代解集中的解比较完以后,得到第 t 代的非支配解集,同时能够得到每一个非支配解能够单独支配其他支配解的次数,并以此来作为

非支配解的优先级。如果第 i 个非支配解单独支配的解个数越多,则其优先级越高;

5) 在设定的迭代次数运行完毕之后,给出一个带有优先级排序的Pareto最优解集。

3 算例分析

3.1 参数设定

采用IEEE 33节点配电系统作为算例,功率基准值为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$,电压基准值为 10 kV ,系统拓扑如图2所示,三相基础负荷如表1所示。

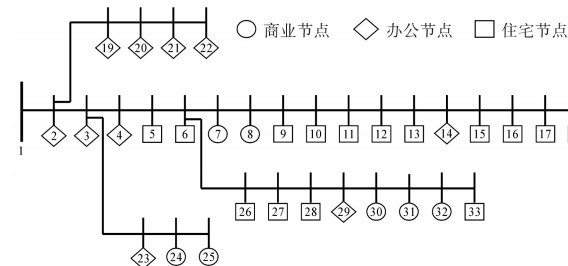


图2 IEEE 33节点配电网拓扑

Fig.2 IEEE 33 node distribution network topology

节点1为电源节点,与大电网相连,不作为充电节点,其他节点均可作为充电节点。接入充电设施功率分为三个等级,分别为Ⅰ级(20 kW),Ⅱ级(7 kW)和Ⅲ级(3 kW),充电效率均为 0.97 。商业节点仅包含Ⅰ级充电装置,办公节点仅包含Ⅱ级充电装置,住宅节点仅包含Ⅲ级充电装置,节点类型的划分依据如表2所示。假设充电设施接入节点单相功率限值为 200 kW ,本文采用文献[22]的仿真参数设定, $\rho_{\min}$ 和 $\rho_{\max}$ 分别取 0.05 和 0.5 , $p_{a,\min}$ 和 $p_{a,\max}$ 分别取 0.005 和 1 。迭代次数设为 300 ,初始解个数设为 100 ,目标函数个数为 3 ,变量为各节点各相的充电设施容量共计 96 个,仿真软件为Matlab2018。

表1 IEEE 33节点测试系统基础负荷

Tab.1 Basic load of IEEE 33 bus test system

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A相	0	$144+j60$	$120+j60$	$216+j120$	$96+j48$	$84+j24$	$288+j144$	$288+j144$	$96+j24$	0	0
B相	0	$180+j48$	0	0	0	$84+j24$	$288+j144$	0	$72+j24$	$96+j24$	$72+j48$
C相	0	0	$120+j60$	$120+j24$	$60+j24$	0	0	$288+j144$	0	0	$60+j36$
节点	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A相	$84+j48$	$96+j48$	$168+j24$	0	0	$84+j24$	0	$144+j60$	$120+j48$	0	0
B相	$84+j48$	0	0	$72+j12$	$84+j24$	$84+j24$	$24+j6$	0	$120+j48$	$120+j48$	$144+j60$
C相	0	$84+j48$	$168+j24$	$84+j12$	$84+j24$	0	0	$120+j48$	0	$144+j60$	$120+j48$
节点	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
A相	$120+j60$	0	$288+j60$	$84+j24$	0	$84+j24$	$156+j96$	0	$192+j84$	0	$84+j60$
B相	0	$288+j60$	$288+j60$	0	$84+j36$	0	$180+j96$	$300+j84$	$216+j96$	$300+j144$	0
C相	$144+j60$	$288+j60$	0	$84+j36$	$84+j36$	$84+j24$	0	$300+j84$	0	$288+j144$	$84+j60$

表2 节点类型划分
Tab.2 Node type division

节点类型	商业节点	住宅节点	办公节点
总有功负荷	$P_i^{\text{load}} \geq 400 \text{ kW}$	$P_i^{\text{load}} \leq 200 \text{ kW}$	其他
节点个数	7	15	10

3.2 仿真结果

3.2.1 Pareto前沿分布

基于本文所提多目标布谷鸟优化算法,得到了非支配解集,解集中包含的非支配解数量与优化算法中的外部档案集维护策略有关,本文设置档案集维护数量为20,因此解集中包含了20个非支配解,Pareto前沿分布如图3所示。可以看出,不同非支配解得到的三个目标函数值不同,整体优化效果也不同。为了评价优化效果,采用本文所提的非支配排序策略对其优先级排序,得到了优先级为1的解共16组,目标函数值如表3所示。虽然优先级相同的解的整体优化效果相同,但是优化的侧重点存在一定差异。从表3可以看出,非支配解1(简称解1)的网损指标(f_2)最小,为178 kW;解7的静态电压稳定指标(f_3)最小,为 5.31×10^{-3} ;解10的电能质量指标(f_1)最高,

表3 优先级为1的解的目标函数值

Tab.3 Objective function values of solution with priority 1

解序号	f_1	f_2/kW	f_3
1	12.98	178	5.70×10^{-3}
2	11.49	188	5.74×10^{-3}
3	11.44	196	5.98×10^{-3}
4	11.90	188	5.50×10^{-3}
5	13.17	185	5.53×10^{-3}
6	12.50	186	5.68×10^{-3}
7	13.40	192	5.31×10^{-3}
8	12.52	183	5.71×10^{-3}
9	12.92	179	5.70×10^{-3}
10	10.72	204	6.71×10^{-3}
11	11.16	190	6.19×10^{-3}
12	13.33	181	5.53×10^{-3}
13	10.97	195	6.69×10^{-3}
14	12.17	185	5.98×10^{-3}
15	13.50	186	5.42×10^{-3}
16	10.80	201	6.71×10^{-3}

为10.72。由于非支配解集中的解互不支配,三个指标之间都存在相互制约的关系,很难找到一个最优解。此时需要通过二次决策来选取最优解,本文选取电能质量指标最小的解作为最优解,即解10作为最优解,见图3。

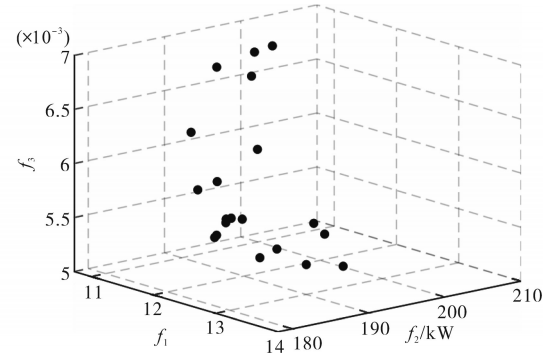


图3 Pareto前沿分布

Fig.3 Pareto front distribution

3.2.2 优化结果分析

图4给出了充电设施有功功率期望值,可以看出,不同节点接入功率期望值差异很大,这与考虑的电压偏差、网损以及静态电压稳定指标有关。以18号节点和23号节点为例,18号节点的三相有功期望值分别为31 kW,0 kW,24 kW,接入的总功率为55 kW,23号节点的三相有功期望值分别为85 kW,197 kW,13 kW,接入的总功率为295 kW,是18号节点接入功率的5.4倍。这是因为受潮流分布影响,位于线路末端的18号节点距离电源节点较远,导致节点电压较低,如果负荷过大会导致电压偏差、网损以及静态电压稳定指标同时增加。相反,23号节点距离电源节点较近,从而期望接入的功率较大。还可以发现,同一节点不同相接入功率期望值差异也很大,这是因为在优化时考虑了三相不平衡问题,由于基础负荷存在三相不平衡,因此在接入功率分配上存在一定差异。以7号节点为例,由于A,B,C三相基

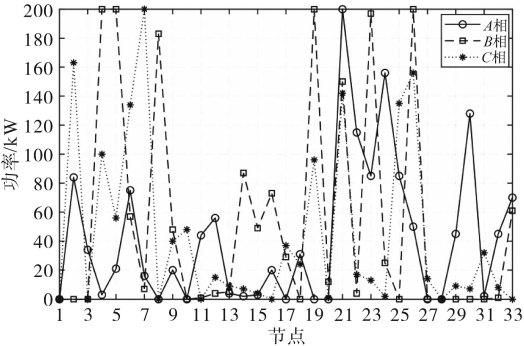


图4 充电设施有功功率期望值

Fig.4 Expected value of active power of charging facilities

础有功负荷分别为288 kW,288 kW和0,使得充电设施接入C相的功率较大,并且已经达到了限值200 kW,而A相和B相的功率较小,仅为16 kW和7 kW。

图5给出了充电设施的接入数量分布。7号商业节点A,B,C三相的Ⅰ级充电装置接入数量分别为1,0和10;4号办公节点A,B,C三相的Ⅱ级充电装置接入数量分别为0,29和15;5号住宅节点A,B,C三相的Ⅲ级充电装置接入数量分别为7,69和19。

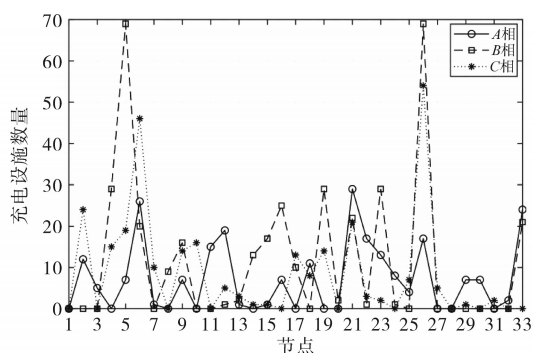


图5 充电设施接入数量

Fig.5 Number of charging facilities connected

图6给出了充电设施接入前、后的节点三相不平衡度。接入前节点三相不平衡度均值为2.11%,超过国标2%的要求,接入后变为0.82%,满足国标要求。7号、8号、24号、25号、30号以及32号节点的三相不平衡度在接入充电设施前均超过6%,在接入充电设施后显著降低。以8号节点为例,接入充电设施使得三相不平衡度从6.64%下降至0.74%,降幅达到88.9%。

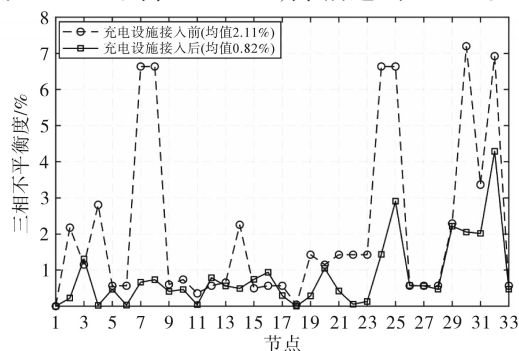


图6 节点三相不平衡度

Fig.6 Three-phase unbalance degree of nodes

图7中, M_0 、 M_1 和 M_2 分别表示充电设施未接入、按本文优化方法接入以及按平均功率接入三种工况下的节点电压偏差。18号节点处于线路末端,电压偏差在所有节点中最大,接入充电设施前18号节点电压偏差为4.87%,充电设施按平均功率接入后,18号节点的电压偏差达到10.89%,

超过了规定上限值10%。按本文优化方法接入后为6.61%,虽然电压偏差相比未接入时有所上升,但是仍保持在允许范围内,且比随机接入工况下的电压偏差最大值减小了39%。因此,本文所提的优化方法能够保障电动汽车充电设施接入后配电网的节点电压偏差满足电能质量指标要求。

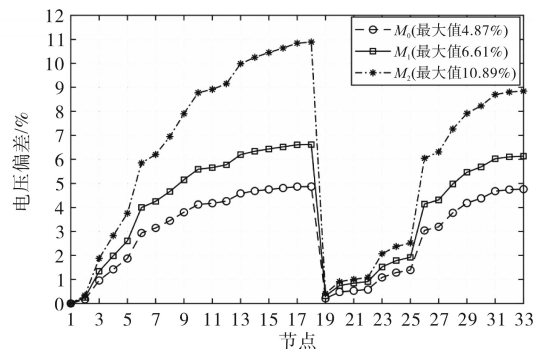


图7 节点电压偏差

Fig.7 Voltage deviation of nodes

3.2.3 不同优化目标对比

表4给出了不同单目标的优化结果。当仅优化电能质量指标时,网损达到373 kW;仅优化网损指标时,静态电压稳定指标达到 9.25×10^{-3} ;仅优化静态电压稳定指标时,电能质量指标达到19.52。这说明不同的优化目标之间存在很强的矛盾性,且静态电压稳定指标对电能质量指标影响大,电能质量指标对网损指标影响大,网损指标对静态电压稳定指标影响大。

表4 单目标优化的目标函数值比较

Tab.4 Comparison of objective function values in single objective optimization

优化目标	f_1	f_2/kW	f_3
f_1	13.35	373	9.04×10^{-3}
f_2	17.55	183	9.25×10^{-3}
f_3	19.52	286	7.06×10^{-3}

图8给出了不同双目标优化的Pareto前沿分布结果。优化目标不同时Pareto前沿分布聚集位置差异较大,优化网损和静态电压稳定指标时的非支配解聚集程度很高,而优化电能质量指标和静态电压稳定指标时非支配解聚集程度较差。表5给出了目标函数值的均值。虽然方案1和方案2都优化了电能质量指标,不同的是方案1同时优化了网损指标,方案2同时优化了静态电压稳定指标,方案1对电能质量指标的优化效果优于方案2,这反映出电能质量指标与网损指标的利益冲突要小于电能质量指标与静态电压稳定

指标的冲突,导致方案1中两个优化目标的一致性较强,使其对电能质量指标的优化结果更好。同理,方案1和方案3都优化了网损指标,方案3对网损指标的优化效果更好,这说明网损指标与静态电压稳定指标间的利益冲突要小于网损指标与电能质量指标之间的利益冲突。对于方案2和方案3,同样可以得到网损指标与静态电压稳定指标间的利益冲突要小于电能质量指标与静态电压稳定指标间的利益冲突。

表5 双目标优化的目标函数值比较

Tab.5 Comparison of objective function values in double objective optimization

	优化目标	f_1	f_2/kW	f_3
方案1	f_1, f_2	10.36	151	7.17×10^{-3}
方案2	f_1, f_3	11.17	234	6.04×10^{-3}
方案3	f_2, f_3	15.74	146	5.02×10^{-3}

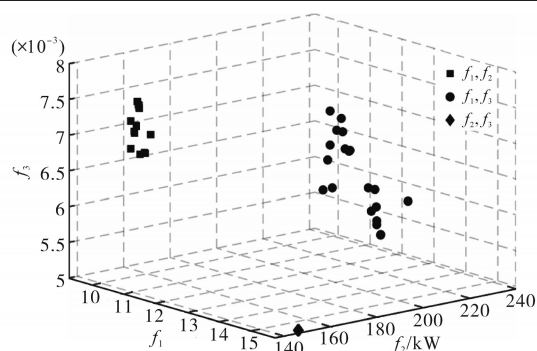


图8 双目标优化结果对比

Fig.8 Comparison of double objective optimization results

与三目标优化中的最优解相比,双目标优化方案1的电能质量指标和网损指标较低,但静态电压稳定指标较高;方案2的静态电压稳定指标和电能质量指标较低,但网损指标较高;方案3的网损指标和静态电压稳定指标较低,但电能质量指标较高。以上分析说明本文选取的三目标优化中的最优解方案是双目标优化方案1到方案3的折中解,避免了某一指标过大导致整体优化效果较差的问题。

3.2.4 不同优化方法对比

线性加权法和法的求解策略是将多目标优化问题转为单目标优化问题,表6给出了基于线性加权法和与本文所用多目标布谷鸟搜索算法的比较结果。可以看出,对节点三相不平衡度均值、节点电压偏差最大值、网损以及静态电压稳定指标而言,本文所提方法的优化效果均好于线性加权法和,验证了其有效性以及优越性。

表6 不同优化方法结果比较

Tab.6 Comparison of results of different optimization methods

优化方法	节点三相不平衡度均值 $f_{1d}/\%$	节点电压偏差最大值 $f_{1b}/\%$	网损指标 f_2/kW	静态电压稳定指标 f_3
线性加权法和	1.07	7.28	248	8.23×10^{-3}
本文所提方法	0.82	6.61	204	6.71×10^{-3}

4 结论

本文建立了以三相不平衡度和节点电压偏差最小、网损最小以及静态电压稳定指标最小的数学模型,提出一种改进的多目标布谷鸟搜索优化算法,并采用该算法对模型进行求解,得到了Pareto最优解集,给出了最优规划方案。分析对比了接入充电设施前后配电网的节点三相不平衡度和电压偏差,同时对比了单目标、双目标优化的结果以及线性加权法和的优化结果,验证了所提模型以及方法的正确性和有效性,为电动汽车充电设施的布局优化提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 任泽平,连一席,郭双桃.充电桩新建:迈向新能源汽车时代[J]. 中国工业和信息化,2020(4):74-79.
Ren Zeping, Lian Yixi, Guo Shuangtao. Chong dian zhuang xin ji jian: mai xiang xin neng yuan qi che shi dai[J]. China Industry & Information Technology, 2020(4):74-79.
- [2] Simorgh H, Doagou-Mojarrad H, Razmi H. *et al.* Cost-based optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations considering demand response programmes[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8):1712-1720.
- [3] Liu Z, Wen F, Ledwich G. Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):102-110.
- [4] Wang S, Dong Z Y, Luo F, *et al.* Stochastic collaborative planning of electric vehicle charging stations and power distribution system[J]. Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1):321-331.
- [5] 田梦瑶,汤波,杨秀,等.综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J]. 电网技术,2021,45(2):498-506.
Tian Mengyao, Tang Bo, Yang Xiu, *et al.* Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2):498-506.
- [6] 舒隽,唐刚,韩冰.电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报,2017,32(3):10-17.
Shu Jun, Tang Gang, Han Bing. Two-stage method for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3):10-17.

- [7] 姜欣,冯永涛,熊虎,等.基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J].电工技术学报,2019,34(S1):272-281.
Jiang Xin, Feng Yongtao, Xiong Hu, *et al.* Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 272-281.
- [8] 程杉,许林峰,孙伟斌,等.基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):3-12.
Cheng Shan, Xu Linfeng, Sun Weibin, *et al.* Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability of distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 3-12.
- [9] 程杉,吴思源,孙伟斌.考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):12-21.
Cheng Shan, Wu Siyuan, Sun Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [10] 邢毓华,师高翔.含风光柴蓄的电动汽车充电站容量优化配置方法[J].电气传动,2021,51(7):67-74.
Xing Yuhua, Shi Gaoxiang. Optimal capacity allocation method of electric vehicle charging station for micro-grid with PV, wind turbine, diesel generation and storage batteries[J]. Electric Drive, 2021, 51(7): 67-74.
- [11] 徐荣贵,肖铁忠,肖章林.基于RSM与PSO结合的同步器齿环热精锻工艺参数优化[J].锻压技术,2017,42(11):12-17.
Xu Ronggui, Xiao Tiezhong, Xiao Zhanglin. Optimization on process parameters of hot precision forging for synchronizer ring based on RSM and PSO[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(11): 12-17.
- [12] 刘凤雏,刘敏,钟华敏,等.基于重复控制的光伏逆变器多目标协同策略[J].电气传动,2019,49(10):39-43.
Liu Fengchu, Liu Min, Zhong Huamin, *et al.* Multi-objective coordinated control strategy of PV inverter based on repetitive control[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 39-43.
- [13] 付英杰,汪泓,谭阳红.基于Pareto最优解的含分布式电源配电网无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(1):18-23.
Fu Yingjie, Wang Feng, Tan Yanghong. Reactive power optimization of distribution network containing distributed enervation based on pareto optimal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 18-23.
- [14] 黄书召,田军委,乔路,等.基于改进遗传算法的无人机路径规划[J].计算机应用,2021,41(2):390-397.
Huang Shuzhao, Tian Junwei, Qiao Lu, *et al.* Unmanned aerial vehicle path planning based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(2): 390-397.
- [15] 冯茜,李擎,全威,等.多目标粒子群优化算法研究综述[J].工程科学学报,2021,43(6):745-753.
Feng Xi, Li Qing, Quan Wei, *et al.* Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753.
- [16] 徐小琴,王博,赵红生,等.基于布谷鸟搜索和模拟退火算法的两电压等级配网重构方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):84-91.
Xu Xiaoqin, Wang Bo, Zhao Hongsheng, *et al.* Reconfiguration of two-voltage distribution network based on cuckoo search and simulated annealing algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 84-91.
- [17] 李煜,尚志勇,刘景森.求解函数优化问题的改进布谷鸟搜索算法[J].计算机科学,2020,47(1):219-230.
Li Yu, Shang Zhiyong, Liu Jingsen. Improved cuckoo search algorithm for function optimization problems[J]. Computer Science, 2020, 47(1): 219-230.
- [18] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等.考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):201-207.
Zhan Kaiqiao, Hu Zechun, Song Yonghua, *et al.* A coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 201-207.
- [19] 武晓朦,刘健,毕鹏翔.配电网电压稳定性研究[J].电网技术,2006,30(24):31-35.
Wu Xiaomeng, Liu Jian, Bi Pengxiang. Research on voltage stability of distribution networks[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 31-35.
- [20] Marín-Quintero J, Orozco-Henao C, Velez Juan C, *et al.* Micro grids decentralized hybrid data-driven cuckoo search based adaptive protection model[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 130(5): 106960.
- [21] 王峰,韩孟臣,赵耀宇,等.基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题[J].控制与决策,2021,36(3):669-676.
Wang Feng, Han Mengchen, Zhao Yaoyu, *et al.* An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem[J]. Control and Decision, 2021, 36(3): 669-676.
- [22] 杨晓萍,黄瑜珈,黄强.改进多目标布谷鸟算法的梯级水电站优化调度[J].水力发电学报,2017,36(3):12-21.
Yang Xiaoping, Huang Yujia, Huang Qiang. Refined multi-objective cuckoo search algorithm for optimal dispatch of cascade hydropower stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 12-21.

收稿日期:2021-06-30

修改稿日期:2021-07-22