Planning Scheme of SOP for EV Access Based onImproved Genetic Algorithm*

*LI Ziang, ZHANG Lu**

(*College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: There comes a huge number of problems about cost inflation and workload increases in power distribution systems, which causing by the growing number of electric vehicles plugging. Hence, an optimal planning scheme of soft open point is proposed. First of all, a SOP two-layer planning model for site selection and capacity determination was established. The hybrid optimization algorithm composed of improved genetic algorithm and power flow algorithm was used to solve the problem. Finally, the rationality and feasibility of the two-layer programming model of SOP site selection and constant capacity and the hybrid optimization algorithm composed of improved genetic algorithm and power flow algorithm are analyzed with IEEE 33 node example system, and the planning conclusion of effectively reducing the operating cost of the distribution system is obtained. After plugging in SOP according to the planning results, the node voltage value, the average per unit value and the performance of the distribution system are improved to a certain extent. At the same time, compared with the existing methods, the improved algorithm has a certain degree of improvement in operation efficiency, relative error and convergence ability.

Key words: soft open point; two-layer planning model; genetic algorithm; power flow algorithm; hybrid optimization algorithm

EEACC: 8520B **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.06.031

基于改进算法的电动汽车接入的配电系统 SOP 规划方案*

李子昂, 张 璐*

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 大量电动汽车的接入为配电系统带来了成本提升、负荷过大等问题。基于此, 提出了一种智能软开关(SOP)优化规划方法。首先, 建立 SOP 选址定容双层规划模型, 采用改进后的遗传算法和潮流算法的混合优化算法进行求解。最后, 利用 IEEE 33 节点算例对 SOP 选址定容双层规划模型和算法的合理性与可行性进行了结果分析, 得到了有效降低配电系统运行成本的规划结论。在按照规划结果接入 SOP 之后, 配电系统中节点电压值、平均标幺值以及配电系统的性能都得到了一定程度的提升。同时, 改进后算法相比于现有方法从运行效率、相对误差情况以及收敛能力等方面都有一定程度的提升。

关键词: 智能软开关; 双层规划模型; 遗传算法; 潮流算法; 混合优化算法

中图分类号: TP399; TM711 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2020)06-1358-06

目前我国配电网主要面临大规模间歇性分布式电源的高渗透率接入和大量高要求的定制化用电需求产生这两方面的挑战[1]。分布式电源的接入可以为配电系统带来许多益处[2]。但是由于其随机性和波动性, 配电系统有可能会出现如电压越限、网络阻塞等问题[3-4]。随着电动汽车领域的发展, 大量的电动汽车接入到配电系统中, 也会造成配电系统负荷增加的问题。SOP 对于分布式电源的接入、提升配电网供电可靠性和电能质量水平具有重要作用[5]。王岸等[6]利用 SOP 代替传统配电系统中的联络开关, 分析得到 SOP 在接入到配电系统中的最优位置。王成山等[7]将 SOP 优化效果和网络重构进行详细对比分析, 验证了 SOP 的优势和潜在效益。石文超等[8]制定了机会模型用于配电系统经济决策的制定。刘晋源等[9]通过建立计及分布式能源出力和电动汽车需求响应规划模型, 达到减小配电系统中负荷波动的效果。目前, 对于 SOP 接入含电动汽车的配电系统中的选址定容规划问题尚未被涉及。

本文提出了考虑电力电子装置接入的配电系统优化规划模型。针对原始遗传算法在一定情况下会出现易于陷入局部最优情况以及收敛速度不稳定的不足[10], 采用改进后的遗传算法和潮流算法的混合

项目来源: 国家自然科学基金面上项目(51977211)
收稿日期: 2020-05-29 **修改日期**: 2020-07-16

优化算法进行求解。最后,利用 IEEE 33 节点算例对 SOP 选址定容双层规划模型和提出的混合优化算法的合理性与可行性进行了结果分析,得到了有效降低配电系统运行成本的规划结论。同时,在按照上述所得的方案接入 SOP 之后,配电系统中节点电压值、平均标幺值以及配电系统的性能都得到了一定程度的提升,这也使得配电系统对于电动汽车接入的承受能力有所加强,从而增大消纳能力,减小电压越限情况发生的概率。

1　SOP 接入的配电系统

1.1　SOP 接入的配电系统结构组成

在原有传统配电网的结构基础上,利用大功率电力电子装置实现对系统网络参数的控制与调节,从而优化配电系统的运行状态并挖掘系统的运行潜力[11]。

图 1 为传统交流配电网系统结构。这是通过联络开关将两条馈线连接,从而构成配电系统。

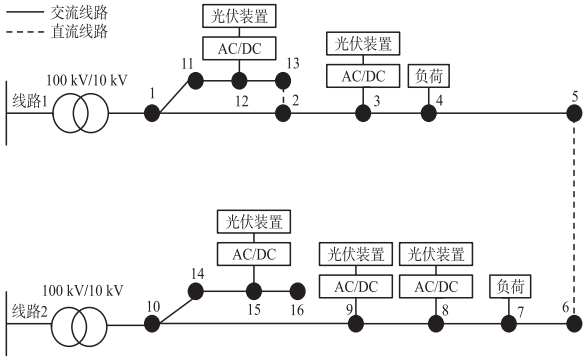

图 1　交流配电网系统结构图

事实上,传统配电网中的换流器使用较多,与此同时,传统配电系统中分布式电源渗透率也存在着比较大的提升空间,以上述技术优势所需作为发展动力,基于 SOP 的交直流主动配电网应运而生。这种配电系统的结构框架如图 2 所示。这种基于 SOP 的交直流主动配电网中的线路 2 拥有更多的光伏装置。主换流站的作用是将交流线路转换为直流线路。直流侧电压采用 15kV;从换流站的主要功能是

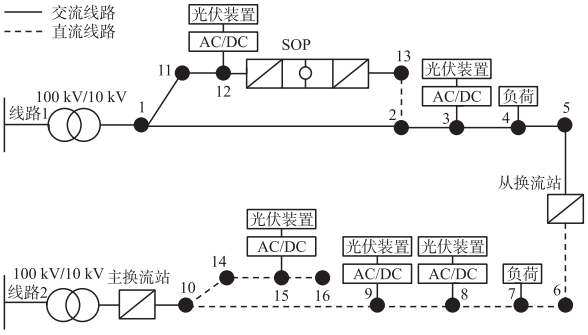

图 2　基于 SOP 的交直流主动配电网系统结构图

连接交直流线路;而 SOP 的出现是为了代替传统配电系统中的联络开关[12]。

1.2　智能软开关(SOP)

智能软开关是能够起到控制传统配电系统网络的联络开关两侧馈线直接按潮流作用的一种全新诞生的电力电子装置。它能够均衡馈线出力、改善潮流分布、降低网络损耗和提升电压水平[13]。配电系统中的传统的联络开关只有“断开”与“闭合”这两种工作状态,但是智能软开关,可以实现四象限功率控制,也可以控制传统联络开关两侧馈线的潮流[14]。

SOP 在这样的运行控制方式下,其运行需要满足下列约束条件(规定功率注入网络的方向为正):

SOP 有功功率约束

$$P_{(i)}^{\mathrm{SOP}}+P_{(j)}^{\mathrm{SOP}}+P_{i,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}+P_{j,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}=0 \tag{1}$$

$$P_{i,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}=A_{(i)}^{\mathrm{SOP}}\sqrt{(P_{(i)}^{\mathrm{SOP}})^2+(Q_{(i)}^{\mathrm{SOP}})^2} \tag{2}$$

$$P_{j,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}=A_{(j)}^{\mathrm{SOP}}\sqrt{(P_{(j)}^{\mathrm{SOP}})^2+(Q_{(j)}^{\mathrm{SOP}})^2} \tag{3}$$

SOP 无功功率约束

$$-\alpha^{(i)}S_{(i)}^{\mathrm{SOP}}\leqslant Q_{(i)}^{\mathrm{SOP}}\leqslant\alpha^{(i)}S_{(i)}^{\mathrm{SOP}} \tag{4}$$

$$-\alpha^{(j)}S_{(j)}^{\mathrm{SOP}}\leqslant Q_{(j)}^{\mathrm{SOP}}\leqslant\alpha^{(j)}S_{(j)}^{\mathrm{SOP}} \tag{5}$$

SOP 容量约束

$$\sqrt{(P_{(i)}^{\mathrm{SOP}})^2+(Q_{(i)}^{\mathrm{SOP}})^2}\leqslant S_{(i)}^{\mathrm{SOP}} \tag{6}$$

$$\sqrt{(P_{(j)}^{\mathrm{SOP}})^2+(Q_{(j)}^{\mathrm{SOP}})^2}\leqslant S_{(j)}^{\mathrm{SOP}} \tag{7}$$

式中:i、j 为 SOP 两端连接的节点号;A 为变流器的损耗系数;α 为无功功率约束系数;$P_{(i)}^{\mathrm{SOP}}$ 和 $P_{(j)}^{\mathrm{SOP}}$ 为 SOP 变流器注入的有功功率,而 $P_{i,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}$ 和 $P_{j,\mathrm{loss}}^{\mathrm{SOP}}$ 为有功功率网损;$Q_{(i)}^{\mathrm{SOP}}$ 和 $Q_{(j)}^{\mathrm{SOP}}$ 为 SOP 变流器注入的无功功率;$S_{(i)}^{\mathrm{SOP}}$ 和 $S_{(j)}^{\mathrm{SOP}}$ 为接入的 SOP 的容量大小。

1.3　电动汽车充放电分类

根据电动汽车在充放电的时间特性以及充放电方式,我们可以将电动汽车分为纯用电负荷的电动汽车和受配电系统调度的电动汽车两种类型。前者只从配电系统中吸收电能,而不接受用电高峰时期配电系统的调度。而后者不仅能从配电系统中吸收电能,还能够在用电高峰时期接受配电系统的调度释放电能给配电系统。因此,受配电系统调度的电动汽车一般只在配电系统的供电非高峰时期进行充电。

2　SOP 选址定容双层模型

2.1　SOP 选址定容上层模型

SOP 选址定容上层模型用来求解寻求每年配电系统综合花费的最小值,找到最优方案使得综合费用 Z 有最小值。数学表达式如下

$$Z=Z_1+Z_2+Z_3 \tag{8}$$

2.1.1 每年固定投资费用 Z_1

$$Z_1=\frac{a(1+a)^y}{(1+a)^y-1}\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{SOP}}}c_{(k)\mathrm{SOP}}S_{(k)\mathrm{SOP}} \tag{9}$$

式中：a 为贴现率；y 为 SOP 的经济使用年限；N_{SOP} 为 SOP 的计划安装个数；$c_{(k)\mathrm{SOP}}$ 为 k 个 SOP 的单位容量投资成本；$S_{(k)\mathrm{SOP}}$ 为 k 个 SOP 的容量。

2.1.2 每年运行维护费用 Z_2

$$Z_2=\beta\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{SOP}}}c_{(k)\mathrm{SOP}}S_{(k)\mathrm{SOP}} \tag{10}$$

式中：β 为 SOP 运行年维护费用系数。

2.1.3 每年配电系统网损花销 Z_3

$$Z_3=c\cdot t\cdot \mathrm{Plose} \tag{11}$$

式中：c 为电价的单价；t 为每年的供电时间；Plose 为配电系统中的有功功率网损。

2.2 SOP 选址定容下层模型

SOP 选址定容下层模型是用以追求配电系统中的网损与 SOP 损耗之和最小的理想情况。然后将目标函数反馈到 SOP 选址定容规划上层模型中。SOP 选址定容下层模型的目标函数如下：

$$f(x)=\min\left[\mathrm{days}\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{lose}}^{i}Q_{\mathrm{lose}}^{i}\right] \tag{12}$$

式中：days 我们在研究的过程中默认为平年的天数，取 365；t 为一天之内的时间，即 24 h；P_{lose}^{i} 和 Q_{lose}^{i} 分别为配电系统接入 SOP 后的有功功率网损和无功功率网损。

3 SOP 选址定容双层模型的求解

这是一个大规模混合整数非线性规划问题，因此我们利用基本遗传算法和前推回代潮流算法的混合优化算法进行求解。

基本遗传算法作为算法的主体框架，前推回代潮流算法对有功功率网损进行计算，同时得出接入配电系统的 SOP 的额定容量值。算法流程图如图 3 所示。

3.1 遗传算法

在遗传算法中，处理的是染色体，而一定数量的染色体组成了群体。基本遗传算法的思想中包含——参数编码、初始种群设定、适应度函数设计、遗传操作控制和控制参数设定这 5 个部分[15]。

在参数编码阶段，对编码策略的完备性、健全性以及非冗余性进行综合考虑之后，决定采用二进制编码的方式。用若干二进制数表示一个个体，将 SOP 选址定容双层规划模型的解空间映射到位串空间中进行遗传操作。这样的编码策略的优势在于简单、符合最小字符集编码原则，同时类似生物染色体的组成，便于用模式定理进行分析。

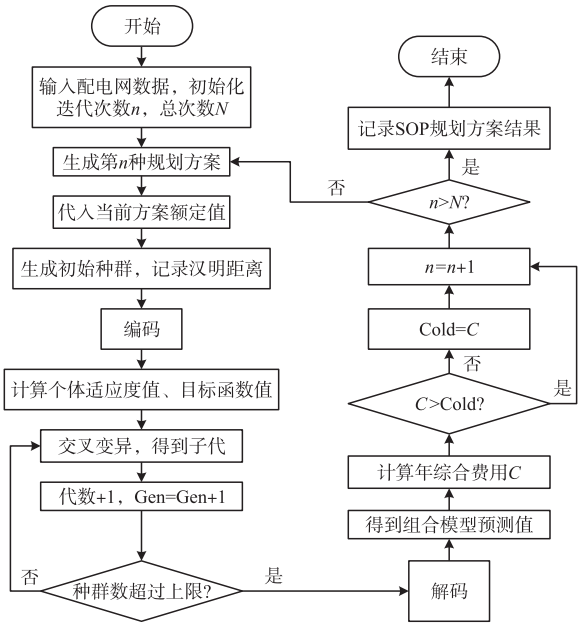

图 3 混合优化算法流程图

适应度函数用来判断群体中的个体的优劣程度，其设计情况将直接影响算法的性能。由于上层模型用来求解寻求每年配电系统综合花费的最小值，下层模型用以追求配电系统中的网损与 SOP 损耗之和最小的理想情况，因此本文所研究的是目标函数为最小化问题。利用将目标函数映射成适应度函数的方法，同时根据式(8)和式(12)，得到：

上层模型的适应度函数为

$$\mathrm{Fit}(f(x))=\frac{1}{f(x)}=\frac{1}{Z} \tag{13}$$

下层模型的适应度函数为

$$\mathrm{Fit}(f(x))=\frac{1}{f(x)}=\frac{1}{\mathrm{days}\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{lose}}^{i}Q_{\mathrm{lose}}^{i}} \tag{14}$$

在此基础上，个体的选择采用轮盘赌选择的方法。交叉过程采用简单的一点交叉，即在个体串中随机选择一个交叉点，在交叉操作的过程中，这个交叉点前后两部分进行结构互换，并生成全新的个体。变异过程采用一定概率的位点变异，随机挑选若干基因座，并以变异概率进行变异操作，变异概率取 0.001。

3.2 经过改进后的遗传算法

3.2.1 对初始种群生成的优化

基本遗传算法所生成的初始种群在一定情况下存在重复率高，或是初始个体的覆盖面不够广的不足，这样的缺陷也会在一定程度上导致基本遗传算法在求解的过程中搜索全局最优解的性能大打折扣[16]。

我们通过引入速度成本比的概念来解决基本遗

传算法生成的初始种群存在的不足。速度成本比,即算法运行速度的提升量与所需成本增长量的比值。在生成初始解时,首先选取三分之一初始解为每个任务节点,然后选取一个时间减少量与成本增加量之间的比值,同时选取速度成本比更小的方案,最终按照任务节点的顺序逐次生成初始解,完成对初始种群的优化。

3.2.2　对个体选择方法的优化

在基本遗传算法中,对于个体选择使用较多的方法一般为轮盘赌选择方法、锦标赛选择方法、最佳个体保存方法。但是这些选择方法都会存在着一定的不足。比如轮盘赌选择方法是根据个体的适应度值进行判断选择的,这样不能保证种群内部种类的多样性。为了优化上述问题,我们引入基于汉明距离的轮盘赌选择方法。

在数据传输过程中,汉明距离应用于差错控制编码。而在改进后的遗传算法中,我们利用汉明距离去衡量个体选择前后种群多样性的情况。

待选择个体种群平均汉明距离计算式为:

$$\bar{h}=\frac{2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}h(C_i,C_j)}{N(N-1)} \tag{15}$$

式中:N 为初始种群规模大小,$h(C_i,C_j)$ 表示个体 C_i 与 C_j 之间的汉明距离的大小。

3.2.3　对交叉算子的优化

在上文中我们提到了传统的遗传算法未考虑到初始种群适应度差而后期群体适应度良好这一特点,而且基本遗传算法中的交叉概率为常数,这样算法的全局搜索能力会受到一定影响[17]。为了增强算法的搜索能力,我们将交叉概率从原来的常数改为下式。

$$P^{(i)}=\begin{cases}P_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{i}{N}} & P_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{i}{N}}<P_{\min}\\ P_{\min} & \text{其他}\end{cases} \tag{16}$$

式中:i 为迭代次数,N 为迭代次数上限,$P_{\max}$ 为预设的最大交叉概率,$P_{\min}$ 为预设的最小交叉概率。

3.3　潮流算法

潮流算法可以制定出安全、高效且符合运行要求的配电系统优化规划方案。

节点电压与节点电流之间的关系

$$\dot{I}_{(k)}=Y\dot{V}_{(k)} \tag{17}$$

节点电流和节点功率的关系如下所示:

$$\dot{I}_{(i)}=\frac{P_{(i)}-jQ_{(i)}}{\overset{*}{\dot{V}}_{(i)}}\quad(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{18}$$

电力系统中复数电压变量可以用下述极坐标表示

$$\dot{V}_{(i)}=e_{(i)}+jf_{(i)} \tag{19}$$

复数导纳为

$$Y_{(ij)}=G_{(ij)}+jB_{(ij)} \tag{20}$$

直角坐标形式的潮流方程

$$P_{(i)}=e_{(i)}\sum_{j\in i}(G_{(ij)}e_{(j)}-B_{(ij)}f_{(j)})+f_{(i)}\sum_{j\in i}(G_{(ij)}f_{(j)}+B_{(ij)}e_{(j)})\quad(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{21}$$

$$Q_{(i)}=f_{(i)}\sum_{j\in i}(G_{(ij)}e_{(j)}-B_{(ij)}f_{(j)})-e_{(i)}\sum_{j\in i}(G_{(ij)}f_{(j)}+B_{(ij)}e_{(j)})\quad(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{22}$$

4　利用 IEEE 33 节点算例分析结果

本文通过 IEEE 33 节点算例对规划模型与基本遗传算法和前推回代潮流算法的混合优化算法进行验证。IEEE33 节点系统的结构图如图 4 所示。

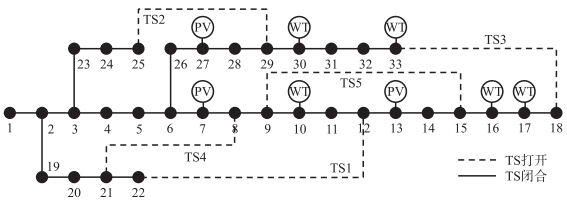

图 4　IEEE 33 节点算例结构图

算例中所采用参数如表 1 所示。

表 1　参数数值

参数	数值
贴现率	0.08
SOP 经济使用年限/年	30
SOP 单位容量投资费/(元/kVA)	1 000
SOP 单位优化容量/kVA	100
SOP 损耗系数	0.02
SOP 维护费用系数	0.005

混合优化算法采用 MATLAB 脚本程序实现,测试系统的硬件环境为 Inter Core i7,1.80 GHz 双核;8GB 内存;256G 硬盘的 PC 计算机,操作系统为 Win10 64bit,开发环境为 MATLAB R2018a。

根据国家电网公布的我国大部分地区的电价,本研究中所用的负荷分时电价具体情况如表 2 所示。

表 2　负荷分时电价情况数据

峰/谷	峰期	平段	谷期
时间段	10:00~15:00 17:00~22:00	07:00~10:00 15:00~17:00 22:00~24:00	00:00~07:00
价格(元/kW·h)	0.8	0.6	0.3

根据上文对电动汽车进行的分类标准,我们得到电动汽车的不同分类所占市场份额的比重以及每一类电动汽车的充放电时段情况如表 3 所示。

表 3 电动汽车占比以及充放电时段情况

	细分	占比	充电时段	放电时段
纯用电负荷电动汽车	公用电动汽车	20%	20:00~07:00	—
	私用电动汽车	40%	10:00~16:00 20:00~7:00	—
受配电系统调度的电动汽车	可调度电动汽车	20%	22:00~07:00	10:00~16:00 20:00~23:00

在本研究中,假设所有电动汽车的充放电功率均为 3.6kW,其充电的同时率为 0.4,受配电系统调度的电动汽车的对配电系统的放电能量可用效率为 0.7。

4.1 选址定容规划结果及成本分析

经过混合优化算法计算得到的 SOP 规划结果以及 SOP 接入前后预算成本分析结果如表 4 所示。

表 4 SOP 选址定容规划及成本分析结果

安装位置	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	规划前
安装数值	10	9	5	4	6	0
SOP 容量	1 000 kVA	900 kVA	500 kVA	400 kVA	600 kVA	不安装 SOP
Z1/万元	20	18	10	8	12	—
Z2/万元	14.68	13.23	6.11	3.85	10.29	—
Z3/万元	1 161.40	1 158.04	1 168.39	1 168.62	1 168.46	1 232.83
Z/万元	1 196.08	1 189.27	1 184.50	1 180.47	1 190.75	1 232.83

我们能够发现将 SOP 安装在 TS2 位置的情况所得到的对于网络降损而减小成本的效果更好,但成本较高。从总成本最低的角度考虑,我们发现将 SOP 安装在 TS4 位置的情况是比较理想的。权衡多方面考虑,采用容量为 400 kVA 的 SOP 接入到配电系统中的 TS4 位置的方案,规划后的年综合费用减少了约 48 万元,下降幅度达到了 4.25%。

4.2 接入 SOP 对配电系统的影响结果分析

本节就 IEEE 33 节点算例中的在接入 SOP 前后的节点电压值变化量进行分析。取各个节点的标准电压值为 12.66 kV。分析结果如下。

表 5 SOP 接入前后节点电压值结果分析

	节点电压平均值	标幺值
SOP 接入前	11.034 8	0.871 6
SOP 接入后	11.628 5	0.918 5

通过表 5 我们可以看出,随着 SOP 的接入,配电系统的整体性能得到了一定程度的增长。在进行规划之后,配电系统对于电动汽车的承受能力也得到了一定程度的提升,对于电动汽车的消纳能力得以加强,这样能够在一定程度上减小出现电压越限情况的概率。

4.3 模型求解算法改进前后对比结果分析

下文将针对同一问题应用改进前后两种不同的求解算法进行对比分析。我们从运行效率、误差分析以及性能对比这 3 个方面对改进前后的算法进行比较,并进行如下分析。

通过图 5 我们可以发现,改进后的算法随着任务节点数的增加其调度成本的增长趋势明显低于改进前的算法。这也从一定程度上反映出,改进后的算法在运行效率这一方面得到了比较显著的提升。

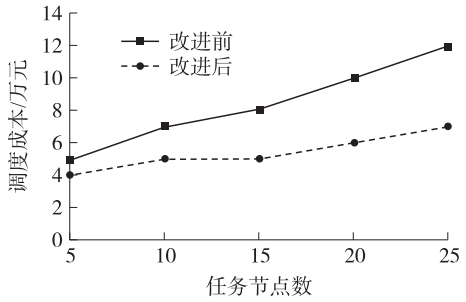

图 5 改进前后算法运行效率对比图

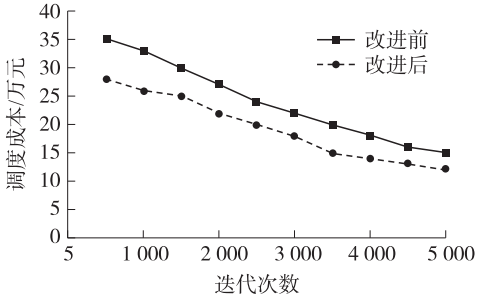

图 6 改进前后算法结果相对误差对比图

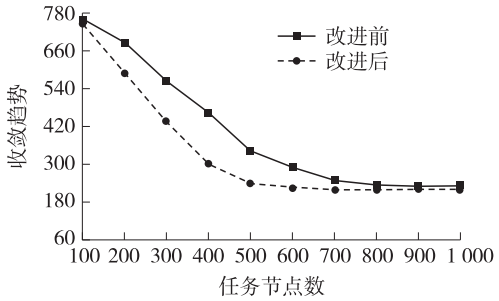

图 7 改进前后算法收敛速度对比图

通过图 6 我们发现,改进后的算法得到结果的精度要在一定程度上高于改进前算法得到的结果。这也就意味着,经过优化后的算法其得到的结果精确度更值得信任,效果也更好。

通过图 7 我们发现,进行优化后的算法拥有更强于优化前的算法的收敛能力,即优化后的算法的性能更加良好,改进后的算法能够更快搜索到最优解。

5　结论

在研究中,我们将大规模混合整数非线性规划问题分解,利用混合优化算法对问题进行求解。IEEE 33 节点算例的验证结果表明,经过规划后的配电系统能够拥有更好的网络降损能力,同时年综合费用成本也会大约下降 4.25%。配电系统中节点电压值、平均标幺值以及配电系统的性能都得到了一定程度的提升。这使得配电系统对于电动汽车接入的承受能力有所加强,从而增大消纳能力,减小电压越限情况发生的概率。

在求解 SOP 最优规划方案模型时,我们通过优化基本遗传算法中的生成初始种群,同时改进个体的选择方法以及交叉算子的方式去缓解原有基本遗传算法未考虑到初始种群适应度差而后期群体适应度良好带来的缺陷。在此基础上,经过改进后的算法具有更强的全局搜索能力和更稳定的收敛能力。经过结果分析,我们也发现改进后的算法拥有更强的运行效率、结果准确度和收敛能力。

参考文献:

[1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.

[2] Rueda-Medina A, Padilha-Feltrin A. Distributed Generators as Providers of Reactive Power Support—A Market Approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):490-502.

[3] Verzijlbergh R, De-Vries L, Lukszo Z. Renewable Energy Sources and Responsive Demand. Do We Need Congestion Management in the Distribution Grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014,29(5):2170-2178.

[4] Huang Shaojun, Wu Qiuwei, Oren S, et al. Distribution Locational Marginal Pricing Through Quadratic Programming for Congestion Management in Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(4):2119-2128.

[5] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1889-1897.

[6] 王岸. SNOP 的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[7] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):82-87.

[8] 石文超,吕林,高红均,等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):41-55.

[9] 刘晋源,吕林,高红均,等. 计及分布式能源和电动汽车特性的主动配电网规划[J/OL]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20200421.0948.036.html,2020-04-22.

[10] 陈思远,林丕源,黄沛杰. 指针网络改进遗传算法求解旅行商问题[J/OL]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2127. TP. 20200331.1733.004.html,2020-04-01.

[11] 肖峻,刚发运,蒋迅,等. 柔性配电网:定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术,2017,41(5):1435-1446.

[12] 孟明,魏怡,朱国林,等. 基于智能软开关的交直流主动配电网优化控制策略研究[J]. 现代电力,2019,36(2):1-7.

[13] 郑焕坤,石甜静. 基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(19):117-126.

[14] 梁海深,李盛伟,白临泉,等. 基于 SNOP 的柔性配电网中分布式电源最大准入容量计算[J]. 电力建设,2018,39(8):69-76.

[15] 王万良. 人工智能导论[M]. 第 4 版. 北京:高等教育出版社,2017:131-145.

[16] 熊聪聪,陈长博,赵青,等. 基于遗传算法的批处理科学工作流任务调度算法的改进[J]. 天津科技大学学报,2020,35(2):74-80.

[17] 刘巍,李锰,李秋燕,等. 基于改进遗传算法的电网投资组合预测方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(8):78-85

李子昂(1999—),男,中国农业大学信息与电气工程学院理科试验班(信息科学)2017 级本科生,研究方向为计算机科学与技术,1363874730@qq.com;

张　璐(1990—),男,博士,副教授,研究方向为主动配电网,zhanglu1@cau.edu.cn。