

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201236

基于改进遗传退火算法的输配电网协调规划方法

徐小琴¹, 郑旭¹, 王思聪¹, 刘巨¹, 蔡杰¹, 廖爽¹, 赵佳伟², 张天东², 郭露方²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对目前对输配电网协调性考虑不足的问题, 考虑机组间负荷优化分配因素, 引入耗量成本, 构建了包含输配电网协调性指标的电网评价指标体系。结合电网经济性指标和可靠性指标, 通过优化算法选出综合性能最优的输配电网规划方案。在解决遗传算法“早熟”、易陷于局部最优等问题的基础上, 提出了一种优化算法并将其应用于考虑输配电网协调性的电网规划问题中。仿真计算结果表明, 所提出的方法是可行、高效的。

关键词: 输配电网协调; 负荷优化配置; 遗传算法; 模拟退火算法; 输配电网规划

Coordinated planning method of transmission and distribution network based on an improved genetic annealing algorithm

XU Xiaoqin¹, ZHENG Xu¹, WANG Sicong¹, LIU Ju¹, CAI Jie¹, LIAO Shuang¹,
ZHAO Jiawei², ZHANG Tiandong², GUO Lufang²

(1. Economy & Technology Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There is currently insufficient consideration of the coordination of the power transmission and distribution network. In considering the optimization of load distribution among units and introducing consumption costs, a grid evaluation index system including the coordination index of the power transmission and distribution network is constructed. Combining the economic and reliability indicators of the power grid, the power transmission and distribution network planning scheme with the best comprehensive performance is selected through optimization algorithms. To solve the problems of a genetic algorithm being "premature" and easily falling into a local optimum, an optimization algorithm is proposed and applied to the grid planning problem considering the coordination of transmission and distribution network. The simulation results show that the proposed method is feasible and efficient.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777142 and No. 51477121) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904200).

Key words: transmission and distribution network coordination; load optimization configuration; genetic algorithm; simulated annealing algorithm; power transmission and distribution network planning

0 引言

作为电力系统研究的一个重要方面, 电网规划综合考虑电网各项指标, 根据电力系统负荷需求, 合理选择线路, 对变电站选址定容, 使电网满足负荷的正常需求、经济可靠运行, 并能够根据其自身发展需要进行扩建。电网规划的优劣直接关系到电网的运行状况以及区域经济发展。

目前, 国内学者在电网规划方面进行了大量的研究。文献[1]以一次性建设投资、年运行费用和网损费用之和为目标函数, 运用模拟退火算法对遗传算法做了改进, 进行线路寻优。文献[2]将自适应度遗传算法应用于电网规划, 验证了该算法具有寻找全局最优解的能力。文献[3]运用基于膜计算与遗传禁忌算法的混合算法进行了电网规划。文献[4]利用人工鱼群算法改进遗传算法进行电网规划方案寻优。但是, 这些研究均只对电网经济性指标寻优, 而对输配电网之间的协调考虑不足。为此, 文献[5]提出了一种基于交替方向乘法及最优潮流的输配

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777142, 51477121); 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904200)

电网协调规划方法。文献[6-8]提出了一些反映输配电网协调性的指标, 并分别以约束与多目标函数的形式构建了考虑协调性的规划模型。这些文献虽然考虑到输配电网之间的协调配合, 但是协调性指标过于单一, 因而无法更好地搜寻出协调性更优的电网。

本文针对输配电网规划中协调性考虑不充分的问题, 通过引入负载均衡程度和供电能力匹配度指标参数, 并结合经济性指标、可靠性指标, 考虑发电机组间的负荷优化配置, 建立输配电网协调规划模型, 提高系统电网规划方案的可参考性。提出结合模拟退火算法克服遗传算法“早熟”、易陷于局部最优等缺陷的优化算法, 并以此搜寻电网最优结构, 其经济性、可靠性与协调性达到最优水平。

1 电网协调规划模型

传统的输配电网规划考虑的指标主要包括经济性指标、可靠性指标、安全性指标。其中经济性指标主要包括线路造价成本、线路运行损耗成本等, 可靠性指标主要包括停电频率、平均停电时间等, 安全性指标主要包括“N-1”通过率等^[9]。

1.1 约束条件

1) N-1 约束

为了电力系统安全运行需要, 规定任一条线路发生故障时, 电力系统能够正常运行。此约束条件表示为

$$\forall j \in T_{N-1}, P_{\text{Loss}} = 0 \quad (1)$$

式中, T_{N-1} 为 N-1 状态集合。

2) 连通性约束

为保证每个负荷正常供电以及运行的需要, 电力系统线路必须是一个连通的整体, 在方案搜索过程中应该满足连通性约束。任意两个发电机节点之间至少存在一条连通路, 任意非发电机节点都与发电机节点相连接。表示为^[10]

$$\begin{cases} \forall n_{G_i}, n_{G_j} \in N_G, \exists y_{ij} \in \prod(n_{G_j} \cap n_{G_i}) \quad (i \neq j) \\ \forall n_{L_j} \in (N - N_G), \exists n_{G_i} \in N_G, y_{ij} \in \prod(n_{G_i} \cap n_{L_j}) \quad (i \neq j) \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为节点集合; N_G 为发电机节点集合; n_{G_j} 、 n_{G_i} 表示发电机节点 j 和 i ; n_{L_j} 表示非发电机节点 j ; y_{ij} 表示节点之间的通路。

本文采用文献[11]所述的方法进行连通性判断。

3) 潮流约束

为了保证线路安全可靠运行, 输电网及配电网应满足潮流约束, 约束表示为^[10]

$$\begin{cases} P_{G_i} - P_{D_i} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) = 0 \\ Q_{G_i} - Q_{D_i} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i \in S_n$, S_n 表示所有节点集合; P_{G_i} 、 Q_{G_i} 、 P_{D_i} 、 Q_{D_i} 分别表示节点 i 的电源输出的有功功率及无功功率、有功和无功负荷; V_i 、 θ_i 分别表示节点 i 的电压幅值和相角; Y_{ij} 、 α_{ij} 分别表示导纳矩阵中各元素的幅值和相角。

$$\begin{cases} \underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i, i \in N_n \\ \underline{P}_{G_i} \leq P_{G_i} \leq \overline{P}_{G_i}, i \in N_G \\ \underline{Q}_{G_i} \leq Q_{G_i} \leq \overline{Q}_{G_i}, i \in N_G \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij}, i \in N_{CL} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i \in S_n$, S_n 为所有节点集合; \overline{P}_{G_i} 、 \underline{P}_{G_i} 、 \overline{Q}_{G_i} 、 \underline{Q}_{G_i} 分别为电源有功出力与无功出力的上、下限; \overline{V}_i 、 \underline{V}_i 分别为节点电压的上、下限; \overline{P}_{ij} 、 \underline{P}_{ij} 分别为线路功率的上、下限; N_n 、 N_G 、 N_{CL} 分别为节点、发电机节点和线路集合。

1.2 目标函数

1.2.1 经济性指标

本文忽略占比较小的线损成本, 仅计及线路造价成本, 并利用缺电成本将可靠性指标转换为经济性指标, 将负荷在各机组之间的优化配置也归于经济性考量中。

1) 缺电成本 C_1

缺电成本计算方法如下: 假设待选线路发生任意 N-2 故障, 如果通过负荷转供使各负荷能够满足需要, 且线路传输容量、各节点电压在允许范围内, 则忽略转供时间所带来的停电损失, 认为缺电成本为 0; 如果通过转供不能解决, 则根据损失负荷的重要程度、线路预计修复时间等计算缺电造成的损失成本。本文选取多种 N-2 故障情况计算损失成本, 用故障发生概率加权取其平均值作为最终缺电成本。

$$C_1 = \begin{cases} 0 & S_{\text{Loss}} \leq LTC \\ \frac{\sum_{k \in \Omega} \omega_k P_k T_k L_e}{Total} & S_{\text{Loss}} > LTC \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_1 表示缺电成本; S_{Loss} 表示故障时的失电总量; LTC 表示可以通过负荷转供解决的最大失电量; Ω 为 N-2 故障情况集合; ω_i 为故障情况 i 发生

概率占集合中所有故障发生概率的比重； P_L 为损失负荷； T_L 为停电时间； L_c 为单位停电成本； $Total$ 表示集合中元素数量。

2) 线路建设成本 C_2

建设成本直接用现值表示，不考虑资金的时间成本、设备折旧等。根据待选线路的长度等因素确定每条待选线路的造价，得到待选线路造价集合矩阵为

$$B = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_n] \quad (6)$$

式中， $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 分别为待选线路 1, 2, 3, ..., n 的造价。

规划方案中线路建设成本为

$$C_2 = BS^T \quad (7)$$

式中， S 为规划方案结果矩阵，是由 0 与 1 构成的 $1 \times n$ 矩阵。

3) 耗量成本 F_{sum}

以往规划中未考虑机组间负荷优化分配，本文在规划模型中加入机组间负荷优化分配因素。传统机组间负荷优化分配多采用等微增率原则^[12]，该方法简单易行，但是对机组煤耗函数要求较为严格，因此，本文利用模拟退火算法离散化处理的优点，直接计算各方案总煤耗量来进行评分计算适应度，从而在保证精度的前提下大大降低对煤耗函数的要求。

假设机组 1, 2, 3, ..., n 的煤耗函数分别为

$$\begin{cases} F_1 = f_1(P_{G_1}) \\ F_2 = f_2(P_{G_2}) \\ \vdots \\ F_n = f_n(P_{G_n}) \end{cases} \quad (8)$$

所得到的负荷分配模型为

$$\begin{cases} \min F_{sum} = \sum_{k=1}^n F_k \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^n P_{G_k} = P_{sum} \quad P_{G_{min}} \leq P_{G_k} \leq P_{G_{max}} \end{cases} \quad (9)$$

最终得到规划模型中经济性目标函数为

$$\min C = C_1 + C_2 + F_{sum} \quad (10)$$

由于成本费用越小越优，因此经济性评分计算为

$$Score_c = \frac{\alpha_c}{C_1 + C_2 + F_{sum}} \quad (11)$$

式中， α_c 是经济性评分转换系数。

1.2.2 协调性指标

在输配网中线路、变压器负载率的均衡程度是衡量输配电网协调性的重要指标^[13]，传统电网规划

中很少考虑输配网供电能力之间的匹配程度，从而可能会导致输电网容量浪费或不足。为此本文将输配网供电能力之间的匹配程度也纳入协调性，提出输配网供电能力匹配系数 T 。由文献[14]的供电能力计算方法分别计算输配网的供电能力，得到输配网供电能力匹配系数，即

$$T = \begin{cases} \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_2} - m\right)^2 + m_c} & T_1 \geq T_2 \\ 0 & T_1 < T_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中： m 为大于 1 的常数，表征输配网供电能力的最佳匹配关系； T_1 为输电网供电能力； T_2 为配电网供电能力； m_c 为常数且 $0 < m_c < 0.5$ 。

最终得到协调性目标函数为

$$\min Y = \omega S_l + (1 - \omega) S_T + \gamma \frac{1}{T} \quad (13)$$

式中： S_l 、 S_T 分别为线路、变压器负载率的标准差； ω 为权重系数； γ 为转化系数。

协调性评分计算为

$$Score_y = \alpha_y \left(\frac{0.1}{w S_l + (1 - w) S_T} + T \right) \quad (14)$$

式中： α_y 为协调性评分转换系数； w 为权重系数。

最终得到输配电网联动规划模型的目标函数为

$$\min F = \lambda Score_c + (1 - \lambda) Score_y \quad (15)$$

式中： λ 为权重系数； C 为经济性目标函数值； Y 为协调性目标函数值。

2 改进遗传算法的算法原理

为了求解包含大量决策变量和约束的输配电网协调规划问题，需要一种启发式优化算法。遗传算法作为一种寻优能力强、可靠性高的优化算法，已被用于求解许多电力系统规划问题^[15-28]。

遗传算法是仿照生物进化论的思想，应用适应度对个体进行评估筛选，寻求最优解。目前对遗传算法的研究相对成熟，自适应遗传算法根据子代适应度确定交叉和变异概率，以便前期扩大搜索范围，防止局部最优，后期扩大差异，选择最优个体^[29-30]。本文对自适应遗传算法做了改进，具体如下所述。

1) 利用模拟退火算法增强全局搜寻能力。遗传算法的选择算子基于固定的选择概率，进化到后期可能会陷入停滞；而模拟退火算法则按一定规律变化的概率来进行选择，本文据此引入 Metropolis 准则，构建一种基于 Metropolis 准则的选择算子，即将每个个体的适应度值 $f(x_k)$ 与当前代群体平均适

应度值 f_a 进行比较选择, 即

$$\begin{cases} f(x_k) \geq f_a & \text{选择个体进入子代} \\ f(x_k) < f_a, e^{\frac{f(x_k)-f_a}{T}} \geq \text{rand} & \text{选择个体进入子代} \\ f(x_k) < f_a, e^{\frac{f(x_k)-f_a}{T}} < \text{rand} & \text{拒绝个体进入子代} \end{cases} \quad (16)$$

式中, rand 为 0 到 1 之间的随机数。模拟退火算法在搜索空间的转移能力方面要强于遗传算法, 因此其概率突跳能力很强, 故而可以很好地克服遗传算法的“早熟”收敛问题, 大大降低了陷入局部最优的可能性。

2) 从传统算法的流程中可以看到, 即使进行了精英群的保存, 在通过选择算子时仍有可能丢掉每一代中最优解, 为了减小这种风险, 本文增加了一个保存每代最优解的步骤, 以免偶然性作用下丢失全局最优解。该步骤并非为提升群体整体适应度, 因此不必同时保留每一代的最优解, 同一时刻只需

保留一个解。

3) 根据各子代平均适应度确定迭代次数。直接指定迭代代数, 需要基于一定的经验, 子代数过多有可能会带来不必要的计算量, 子代数过少又会导致计算精度不足。对此, 本文根据各子代平均适应度的增加量来确定计算结束与否, 即如果连续多个子代平均适应度的增长率小于一定值且子代数大于规定的最小值, 则终止计算, 否则继续迭代, 直到满足前述条件为止。

4) 改进自适应度的确定规则。文献[29]的自适应交叉与变异概率有可能会使算法初期的流动性变差, 初期子代最优个体不会发生变化, 易陷于局部最优, 因此, 为使最优个体也有可能进行交叉、变异, 本文确定最小交叉、变异概率, 防止陷入局部最优^[31]。

改进后的遗传算法规划流程如图1所示。

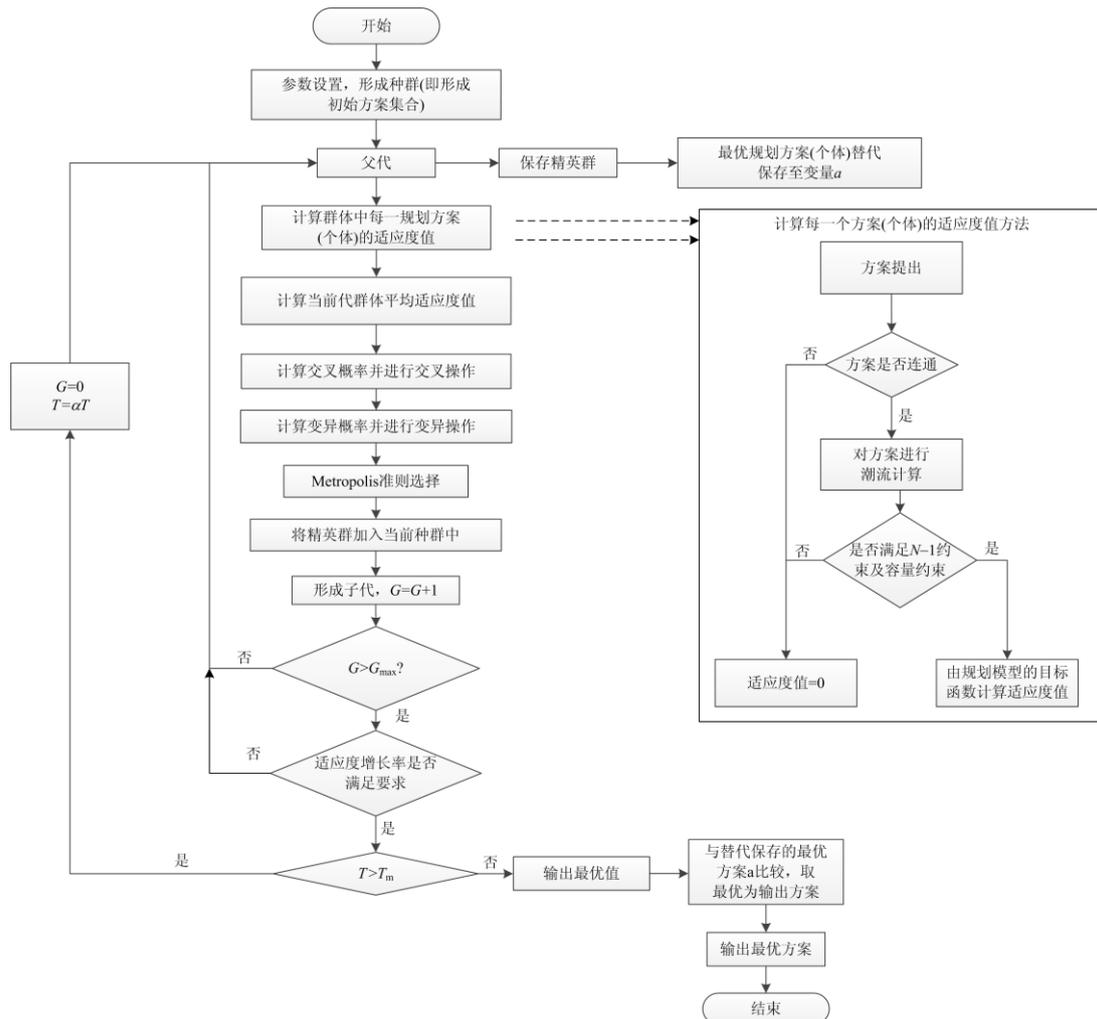


图 1 改进遗传算法规划流程

Fig. 1 Improved genetic algorithm planning process

3 算例分析

本文选取31节点电网结构,输电网部分有3个电源,3台升压变压器,6台降压变压器,配电网部分有13个负荷点。图2中已有线路为可供选择的转供路径,规划方案暂不考虑多回线路。

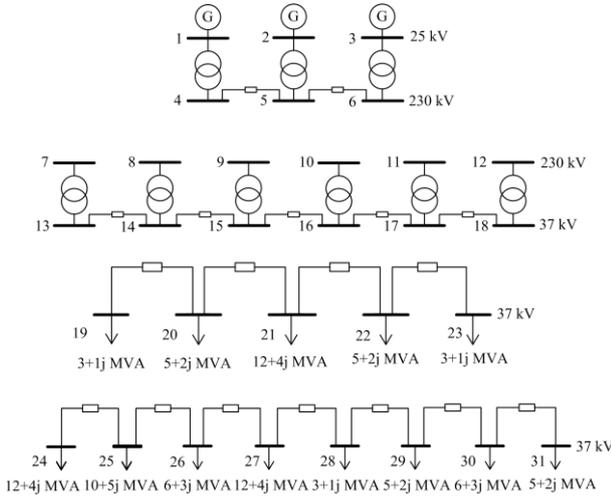


图2 节点电网待选线路图

Fig. 2 Node grid candidate route diagram

发电机的煤耗特性有关数据如表1所示。

表1 发电机煤耗特性

Table 1 Generator coal consumption characteristics

负荷/MW	煤耗量/(t/h)	煤耗率/(kg/kWh)
1 000	271.6	0.271 6
750	275.3	0.275 3
500	284.4	0.284 4
300	309.1	0.309 1

对表1数据进行拟合,得到1号发电机煤耗特性方程 $F_1 = f_1(P)$,同理得到2号与3号发电机的煤耗特性方程 $F_2 = f_2(P)$ 、 $F_3 = f_3(P)$ 。

本文使用改进后的遗传退火算法对考虑均衡性和负荷优化分配的综合规划模型进行求解得到综合模型规划方案,对只考虑经济性与可靠性的传统规划模型进行求解得到传统模型规划方案,并对两种方案进行对比分析,其中算法参数设置如表2所示。

表2 算法参数设置

Table 2 Algorithm parameter setting

初始温度	退火系数	最低温度	每次退火遗传代数
90 °C	0.9	82 °C	50

1) 综合模型规划方案:综合考虑经济性指标与协调性指标,本文权重系数 λ 取 0.4,得到规划方案如图3所示,所得参数见表3、表4。

2) 传统规划模型规划方案:在综合规划模型上取消协调性指标以及经济性指标中的发电机负荷优化配置指标,得到规划方案如图4所示,所得参数见表3、表4。

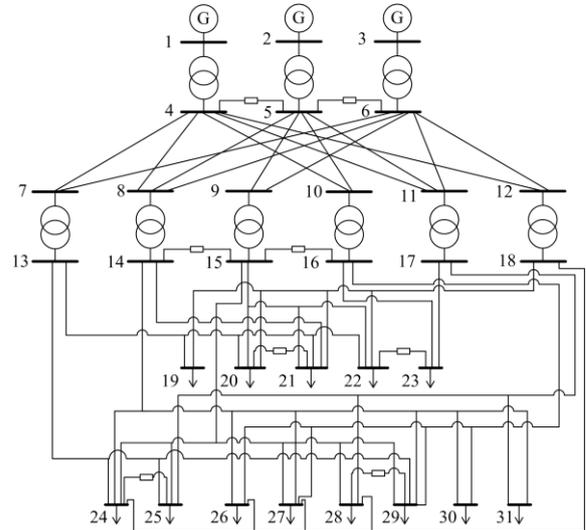


图3 利用改进后算法对综合模型求解的结果

Fig. 3 Result of solving the comprehensive model using the improved algorithm

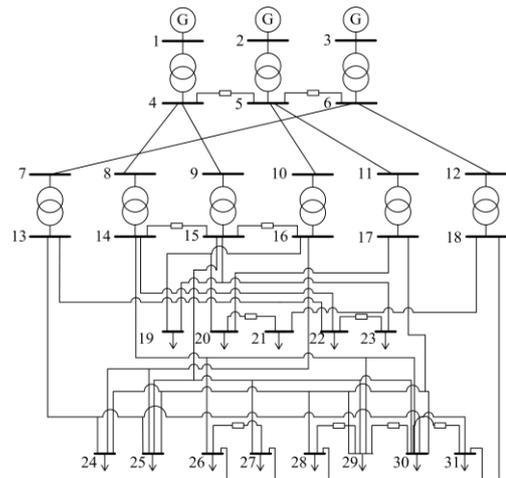


图4 利用改进后算法对传统规划模型求解的结果

Fig. 4 Result of solving the traditional programming model with the improved algorithm

表3 改进后算法规划结果的经济性部分

Table 3 Economical part of improved algorithm planning results

规划方案	建设成本/ 万元	缺电成本/ 万元	煤耗成本/ 万元	经济性指标 评分
综合模型 规划方案	75 000	20.934 6	55 793	76.457 0
传统模型 规划方案	50 000	98.228 1	52 924	97.159 0

表 4 改进后算法规划结果的协调性部分

Table 4 Improved coordination of algorithmic planning results

规划方案	变电站负	线路负载	供电能力	协调性
	载均衡度	率均衡度	匹配系数	指标评分
综合模型 规划方案	0.191 6	0.070 9	2.269 3	116.508 0
传统模型 规划方案	0.407 8	0.071 6	0.481 6	32.296 0

由表 3、表 4 可以看出, 在经济性方面, 传统模型的规划方案要优于综合模型的规划方案, 而在均衡性方面, 后者则远优于前者。最终在反映电网整体性能的综合评分方面, 后者优于前者。这是因为传统规划模型只考虑经济性及可靠性指标, 而综合规划模型兼顾了电网的均衡性, 在搜索过程中限制了可供选择的规划方案的范围, 导致电网建设成本有所增加, 但是规划模型中引入均衡性指标, 在搜索方案过程中, 搜索目标由单一经济性最优变为经济性及协调性综合最优, 使电网均衡性及综合得分均有增加, 且虽然经济性指标总体评分有所下降, 但其中用于表征电网可靠性的缺电成本却由 98.228 1 万元降低到 20.934 6 万元, 表明均衡性指标的引入可以显著改善电网的均衡度以及综合性能, 使电网的可靠性大大增强。

为了比较改进前后算法的性能, 表 5 中列出分别利用这两种算法对综合规划模型求解所得方案的综合评分与算法的计算时间。对综合模型规划方案利用改进前算法求解的结果如图 5 所示。

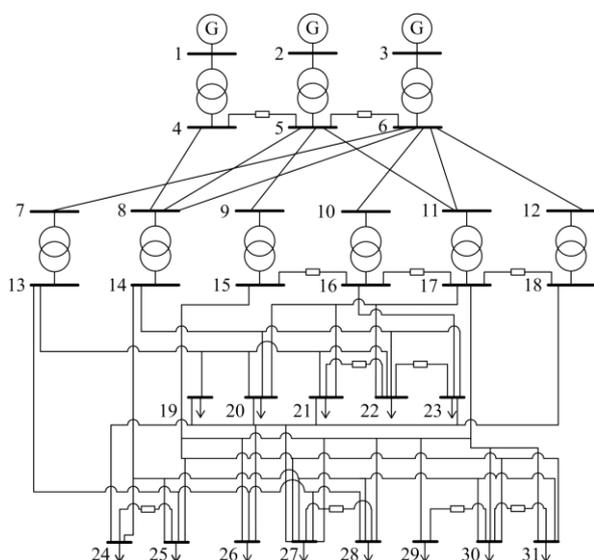


图 5 改进前算法求解结果

Fig. 5 Improved algorithm solution results

由表 5 可知, 改进后的遗传算法的计算时间略有增加, 但是所得到规划方案的综合评分远优于利用传统遗传算法的。在传统遗传算法上增加的改进步骤, 虽然使运算时间稍有增加, 但是这些步骤却大大提高了算法的寻优能力与计算效率。

表 5 利用改进前后算法求解的结果

Table 5 Results obtained by using improved algorithm

算法	规划方案综合评分	计算时间/s
改进前遗传算法	60.008 3	2 713
改进后遗传算法	100.487 6	2 982

4 结论

本文提出的输电网协调规划模型在传统电网规划模型中加入协调性规划指标。分别应用两种模型对 31 节点电网进行规划, 规划结果表明由此模型得到的规划方案在输电网协调性方面优于传统规划方案, 输配网之间的配合情况更好, 可靠性也大大增强。

改进后的遗传算法更加高效, 大大改善了传统遗传算法的“早熟”收敛问题, 显著提升了算法对多维度非线性优化问题的寻优能力, 从而能更好地应用在复杂的电网规划问题中。

参考文献

- [1] 黄慧, 顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 64-67, 112.
HUANG Hui, GU Bo. Application of improved genetic algorithm in the network planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 64-67, 112.
- [2] 樊一娜. 一种改进型遗传算法在电网规划中的应用[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2015, 33(2): 29-35, 46.
FAN Yina. Application of an improved genetic algorithm in grid planning[J]. Journal of Qinghai University: Natural Science Edition, 2015, 33(2): 29-35, 46.
- [3] 凌晓洲, 张彼德, 邹江平, 等. 膜计算与遗传禁忌混合算法在输电网规划中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 160-163.
LING Xiaozhou, ZHANG Bide, ZOU Jiangping, et al. Application of genetic tabu search and membrane computing hybrid algorithm in transmission network planning[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 160-163.
- [4] 李如琦, 王宗耀, 谢林峰, 等. 种群优化人工鱼群算法在输电网扩展规划的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 11-15.
LI Ruqi, WANG Zongyao, XIE Linfeng, et al. Population optimization artificial fish school algorithm applied in

- transmission network expansion planning[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 11-15.
- [5] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 18-27.
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 18-27.
- [6] 叶诚明, 张焰, 华月申. 输配电协调的网架规划方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 200-204.
YE Chengming, ZHANG Yan, HUA Yueshen. Electrical network planning method with coordination of transmission and distribution network[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 200-204.
- [7] 潘智俊, 张焰, 祝达康, 等. 计及电网运行非均匀性的多目标输电网规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 53-58.
PAN Zhijun, ZHANG Yan, ZHU Dakang, et al. Multi-objective transmission network planning considering grid-operational heterogeneity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 53-58.
- [8] MISHRA S, BORDIN C, TOMASGARD A, et al. A multi-agent system approach for optimal microgrid expansion planning under uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 109: 696-709.
- [9] 于慧芳, 邹格. 电网规划设计技术标准指标体系研究[J]. 电力设备管理, 2018(12): 30-31, 36.
YU Huifang, ZOU Ge. Research on the technical standard index system of power grid planning and design[J]. Power Equipment Management, 2018(12): 30-31, 36.
- [10] 王乙斐, 唐飞, 廖清芬, 等. 带连通性约束的蚁群优化算法主动解列断面求解策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 56-62.
WANG Yifei, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. An ant colony optimization algorithm with connectivity constraints, active segmentation section solution strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 56-62.
- [11] 刘开, 王毕元, 罗晓辉. 电网规划中网络连通性判别新方法[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30: 421-424.
LIU Kai, WANG Biyuan, LUO Xiaohui. A new judging method for the network connectivity in the net plan[J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 30: 421-424.
- [12] LI Shushan, LI Gang, CHENG Chuntian, et al. Thermal units' energy conservation load dispatch method with combining dynamic unit commitment into equal incremental principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 41-47.
- [13] 张勇军, 刘瀚林, 蒋金良, 等. 主网与配电网协调规划的评价指标和规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 37-41.
ZHANG Yongjun, LIU Hanlin, JIANG Jinliang, et al. Research on evaluation index and method of coordinated planning between main system and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 37-41.
- [14] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联关系的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 86-91.
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [15] SUN Dawei, XIE Xiaorong, WANG Jianfeng. Integrated generation-transmission expansion planning for offshore oilfield power systems based on genetic Tabu hybrid algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 117-125.
- [16] SHAYEGHI H, BAGHERI A. Dynamic sub-transmission system expansion planning incorporating distributed generation using hybrid DCGA and LP technique[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 48(1): 111-122.
- [17] ARABALI G M, ETEZADI-AMOLI M, SAMI F M, et al. A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3003-3011.
- [18] 李镒, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30-38.
LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30-38.
- [19] 刘学, 李晖, 周明, 等. 考虑风速相关性的多目标电网规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 87-94.
LIU Xue, LI Hui, ZHOU Ming, et al. Multiple-objective power grid planning considering wind speed correlation[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 87-94.
- [20] KUMAR D, SINGH A, MISHRA S K, et al. A coordinated planning framework of electric power distribution system: intelligent reconfiguration[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(6).
- [21] CECHIN A L, DOS SANTOS J V C, MENDEL C A, et al. Genetic algorithms to solve the power system restoration planning problem[J]. Engineering with Computers, 2009, 25(3): 261-268.
- [22] BRETAS, ARTURO S, PHADKE, et al. Artificial neural networks in power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1181-1186.
- [23] SHU J, WU L, LI Z, et al. A new method for spatial power network planning in complicated environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 381-389.
- [24] 袁晓玲, 刘志明, 赫卫国. 分时电价下计及用户用电满意度的家庭负荷优化策略[J]. 广东电力, 2020, 33(2): 54-62.
- YUAN Xiaoling, LIU Zhiming, HE Weigu. Household load optimization strategy taking into account users' satisfaction with electricity consumption under time-of-use electricity prices[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(2): 54-62.
- [25] 高慧, 晏寒婷, 黄春艳. 考虑“源-荷-储”灵活性资源协调的主动配电网双层规划[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 29-35.
- GAO Hui, YAN Hanting, HUANG Chunyan. Bi-level planning of active distribution network considering "source-load-storage" flexible resource coordination[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 29-35.
- [26] GUCHHAIT P K, BANERJEE A. Stability enhancement of wind energy integrated hybrid system with the help of static synchronous compensator and symbiosis organisms search algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 138-150. DOI: 10.1186/s41601-020-00158-8.
- [27] 张坤, 党东升, 马艳霞, 等. 主动式配电网电源分区布点规划关键技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 42-48.
- ZHANG Kun, DANG Dongsheng, MA Yanxia, et al. Research on key technologies of power supply distribution zones planning for active distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 42-48.
- [28] 刘国静, 吕风波, 赵宏大, 等. 基于 N-1 准则的变电站储能容量优化配置模型及方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(12): 54-59.
- LIU Guojing, LÜ Fengbo, ZHAO Hongda, et al. An optimal allocation model and method of energy storage capacity in substations based on N-1 criterion[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(12): 54-59.
- [29] 宋倩芸. 计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 53-61.
- SONG Qianyun. A bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 53-61.
- [30] 刘雪纯, 朱永利, 邓冉, 等. 考虑系统经济性和可靠性的机组组合模型及算法[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 8-14.
- LIU Xuechun, ZHU Yongli, DENG Ran, et al. Unit commitment model and algorithm considering system economy and reliability[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 8-14.
- [31] 段玉倩, 贺家李. 遗传算法及其改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 43-56.
- DUAN Yuqing, HE Jiali. Genetic algorithm and its modification[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 1998, 10(1): 43-56.

收稿日期: 2020-10-14; 修回日期: 2021-02-05

作者简介:

徐小琴(1987—), 女, 硕士, 工程师, 长期从事电力负荷分析与电网规划等方面的研究工作。E-mail: xuxiaoqin8722@163.com

(编辑 魏小丽)