

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.02.011

采用退火遗传算法的配电网优化方法

张 宁, 马孝义, 杨震宇, 黄文文

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院电气工程系, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在分析多约束多目标配电网优化模型基础上, 针对传统遗传算法求解时静态稳定性和鲁棒性不强、爬坡能力弱、收敛速度慢等问题, 引入网络拓扑简化方法, 决策变量多参数编码和退火动态罚因子处理约束, 提出了基于退火遗传算法的配电网模型求解方法。通过实际农网决策工程验证表明, 退火遗传算法适应度爬坡能力明显加强, 稳定于 1 的几率提高, 收敛于全局最优次数增多, 运行时间缩减, 而且综合费用比传统遗传优化方案减少了近 50 万元, 从而达到了进一步优化的目的。

关键词: 配电网; 规划; 经济性; 算法; 退火

中图分类号: TM727.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)02-075-06

Optimization of power distribution with annealing genetic algorithm

ZHANG Ning, MA Xiaoyi, YANG zhenyu, HUANG Wenwen

(Electrical Engineering Department College of Water Resources and

Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The traditional genetic algorithm easily converges to slow speed, leads to a poor climbing ability and shows weak static stability and robustness when seeking a solution. On the basis of analyzing multi-constrained and multi-objective optimization model of power distribution network, this paper describes a method of adopting the simplified network topology method, the multi-parameter decision variable coding and the dynamic penalty functions for model constraints and the annealing genetic algorithm. When the method is used for the actual decision project in rural power distribution network, the results show that the proposed method can obviously strengthen climbing ability, improve the stability chance at 1, increase the times of converging to global optimization and cut running time. Meanwhile, the comprehensive cost is nearly 0.5 million yuan cheaper than traditional genetic optimization scheme, which, therefore, achieves further optimization.

Key words: power distribution; planning; economic; algorithm; annealing

随着电网改造升级工程进度的不断推广和深化^[1-2], 以及国内外先进的配电网规划方法不断发展^[3-4], 大规模城市电网优化已取得了一定的成效。但实属农网范畴的现代农业示范园配电网, 由于其供电半径大、用电负荷分布不均衡, 模型建立目标多

约束多, 采用传统遗传算法优化时, 出现了静态稳定性和鲁棒性不强、爬坡能力弱、收敛速度慢等问题^[5-6]。为此, 笔者分析建设投资费用和线路年网损费用多目标函数, 考虑经济电流密度、电压、电流、功率和功率因数多约束基础上, 借助拓扑简化方法和

收稿日期: 2013-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50879072); 国家级农业水工程实验教学示范中心建设项目资助(AWEDF305); 西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目(2201310712077)

作者简介: 张宁(1970-), 女, 西北农林科技大学博士生, 主要从事电力系统及自动化研究, (E-mail)475811878@qq.com。

优化理论,引入退火动态罚因子处理约束,提出了基于退火遗传算法的配电网模型求解方法,以加强爬坡能力,增加收敛全局最优次数,缩减运行时间,降低投资费用,提高布线效率。最后以杨陵现代农业示范园配电规划工程为例,验证其可行性和有效性,以期对配电网改造升级工程控制决策系统提供技术支持。

1 配电网多目标多约束模型

多目标多约束函数的一般形式^[7-8]为

$$\text{Obj} \quad \min [F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)], \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad B_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, b;$$

$$D_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, d;$$

$$G_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, g;$$

式中: $F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)$ 为 m 个目标函数; x 为决策变量, $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$; n 为决策变量的个数; $B_j(x), D_j(x), G_j(x)$ 为约束条件; b, d, g 分别为“ \geq ”或“ $>$ ”、“ $=$ ”、“ $<$ ”或“ \leq ”型约束条件个数。

考虑到现代农业示范园配网络供电半径大、线路长和负荷分布不均匀的特点,本次规划主要以供电建设投资费用和电力线路年网损费用最小为目标函数,建立多目标经济性优化模型^[9-10],即 $i=1, 2$ 。为避免出现传统低压供电网中仅按电压等级选择导线截面的不经济不合理的现象,本次投资费用目标函数将综合考虑电压等级与经济电流密度相关因素。

供电建设投资费用目标函数为

$$F_1 = A_p(n, r) \sum_{k=0}^M \sum_{i=1}^N C_{ki} L_{ki} S_{ki}, \quad (2)$$

式中: M, N 分别为园区内所有可供选择的配电线路和负荷节点总数; C_{ki} 为通过第 k 条配电建设线路向第 i 个负荷节点供电的每公里投资费用; L_{ki}, S_{ki} 为决策变量,分别指通过第 k 条配电建设线路向第 i 个负荷节点供电的线路长度和导线截面。

其中,

$$S_{ki} = \frac{P_{ki\max}}{\sqrt{3}U_{e(i-1)k} J_{ki} \cos \varphi_{(i-1)k}}, \quad (3)$$

式中: $P_{ki\max}, J_{ki}$ 为正常运行方式下通过第 k 条建设配电线路向第 i 个负荷节点注入的最大功率和经济电流密度; $U_{e(i-1)k}, \cos \varphi_{(i-1)k}$ 分别为供给第 k 条建设配电线路的上级第 $i-1$ 个负荷节点(包括电源点)的额定线电压、功率因数。

$A_p(v, r)$ 为现值转换为等年值的资金回收系数,

$$A_p(v, r) = \frac{r(1+r)^v}{[(1+r)^v - 1]}, \quad (4)$$

式中, r 为最小资金贴现率, v 为贴现年限。

电力线路年网损费用一般包括运行费和网损费用,主要计入与线路长度和导线截面有关的有功损耗费用。为了简化过程,此次规划依据传统的分级补偿、就地平衡的无功补偿原则进行,只考虑功率因数偏差约束,不再计入无功损耗费用的目标优化,故电力线路年网损费用目标函数为

$$F_2 = T \sum_{k=0}^M \sum_{i=1}^N \alpha R_{ki} P_{ki}^2, \quad (5)$$

式中: T 为最大负荷利用小时数或年网损小时数; α 为折合到当前的单位电能电价; R_{ki}, P_{ki} 分为正常运行方式下,第 k 条建设供电线路向第 i 个负荷节点供电的线路电阻和注入功率。

$$\text{s. t.} \quad P_{ik} = q_i + \sum_{k=0}^M \sum_{i=1}^N P_{ki}, \quad (6)$$

$$I_i \leq I_{i\max}, \quad (7)$$

$$|\Delta U_i| \leq |\Delta U_{i\max}|, \quad (8)$$

$$|\Delta \cos \varphi_i| \leq |\Delta \cos \varphi_{i\max}|, \quad (9)$$

N-1 安全准则,

配电网连通原则,

式中, P_{ik} 为由第 i 个负荷节点(包括电源点)供电的第 k 条线路的功率; q_i 为第 i 个负荷节点的负荷量; $I_i, I_{i\max}$ 分别为第 i 个负荷节点的电流和最大允许电流; $\Delta U_i, \Delta U_{i\max}$ 分别为第 i 个负荷节点允许电压调整率、最大电压调整率; $\Delta \cos \varphi_i, \Delta \cos \varphi_{i\max}$ 分别为第 i 个负荷节点允许功率因数偏差和其最大偏差。电网连通原则:电网中每一个用电负荷节点必须且只有一个供电节点供电,每个用电节点必须与电源点有联通过路。

2 优化算法

2.1 多参数编码

由于多目标优化问题中含有多个决策变量,为协调多目标规划方案中各目标之间关系,保证遗传算法过程中始终遵循树状供电网拓扑约束及连通原则,克服浮点编码优化范围窄和二进制编码的冗余的缺点,本次规划借用电路网络拓扑图简化方法,对线路长度和导线截面进行多参数编码优化^[11-12],具体做法如下。

1) 线路长度编码。先将规划区内的电源点和负荷点定义为节点,电源节点编号为 0,负荷节点编号依次为 1, 2, 3, ..., 如图 1 所示;然后定义连接节点之间的待选配电线路为边,并标注边的编号[1], [2], [3], ..., 最后按只考虑分流不考虑汇流的树状接线方式特点标注潮流方向,并将注入各负荷节点

的潮流顺时针编号为 $0, 1, 2, \dots$, 例如注入节点 3 的潮流来自节点 $0, 1, 2$ 。这样, 生成的染色体第 3 个基因即可在 $0, 1, 2$ 中任选一个。配电网长度编码的染色体长度为负荷节点数, 即总节点数减 1, 而每一位基因的取值范围取决于注入该节点潮流数, 故取值范围不等。

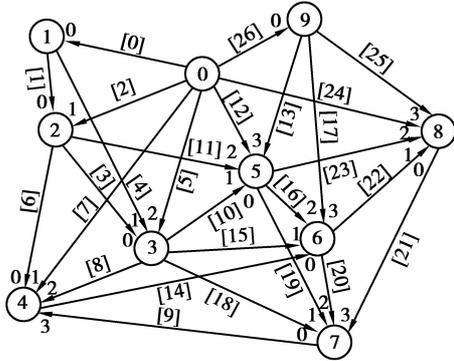


图 1 电路网络初始编码拓扑图

2) 线路截面编码。为了简化导线截面选择和换算的过程, 把综合考虑电压等级和经济电流密度因素确定的线路截面编码与导线标称截面一一对应, 均按递增或递减方式排列, 并生成遗传算法的染色体基因, 每个基因取值范围可取自导线标称截面规格数目。由于市场上导线规格繁多, 如果不限基因取值范围, 将会加大遗传算法操作难度, 为此在规划中应按电压等级选择某系列产品规格数为基因范围。以图 1 为例, 假设电压等级为 10 kV , 可选取 XPLE 系列产品的 YJV 电力电缆, 该电缆标称截面按递增方式排列为 $25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630, 800, 1000 \text{ mm}^2$, 构造相对应线路截面编码为 $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14$, 其中编码的基因范围选取为 15, 即该产品规格数, 染色体长度为负荷节点数。

2.2 约束条件与模拟退火罚函数

本次优化属多目标多约束问题, 采用传统遗传算法处理约束条件后求解时, 静态稳定性和鲁棒性不强, 爬坡能力弱, 收敛速度慢, 为此, 文中将罚函数法和模拟退火等方法相结合, 模拟退火动态罚因子构造罚函数, 力求同时满足式(6, 7, 8, 9)的约束。具体方法是先将带约束的优化问题式(1)通过罚函数法, 转化成下列无约束的优化问题, 以保存可行解或非可行解中部分有用基因^[13-14]; 然后用一种迭代求解策略的随机寻优算法, 获得全局最优解。由式(1)转化的罚函数表达式为

$$P(\delta) = \delta \left[\sum_{j=1}^b \min(0, \lambda_B(B_j(x))) + \sum_{j=1}^d (\lambda_D(D_j(x))) + \sum_{j=1}^g \min(0, \lambda_G(G_j(x))) \right], \quad (10)$$

式中: $\lambda_B, \lambda_D, \lambda_G$ 分别为不同约束条件罚因子; δ 为退火算法中的动态罚因子,

$$\delta = \frac{1}{T_t}, \quad (11)$$

$$T_{t+1} = \epsilon T_t, \epsilon \in [0, 1], t = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

其中, T_t 为模拟退火初始温度, ϵ 为 $0 \sim 1$ 之间的数。在进化初期, δ 较小, 对不可行解的惩罚较小, 算法有可能在不可行域一定程度的无效搜索; 由于 δ 的时变性, 随着进化代数的增加, T_t 逐渐下降, δ 较大, 算法搜索使优化个体的解群逐渐趋于可行域寻找最优目标可行解。当然, 为防止 δ 无限扩大, 必须限制进化总代数。

故本次模型的罚函数表达式为

$$P(\delta) = \delta \left[\sum_{i=1}^N \min(0, \lambda_I(I_{\max} - I_i)) + \sum_{i=1}^N \min(0, \lambda_{\Delta U} (|\Delta U_{\max}| - |\Delta U_i|)) + \sum_{i=1}^N \min(0, \lambda_{\Delta \varphi} (|\Delta \cos \varphi_{\max}| - |\Delta \cos \varphi_i|) \right], \quad (13)$$

式中, $\lambda_I, \lambda_{\Delta U}, \lambda_{\Delta \varphi}$ 为电流和电压调整率约束罚因子。

2.3 适应度函数的确定

适应度函数将目标函数和约束相结合, 通过调整动态罚因子实现目标函数和约束之间的平衡, 保证可行解的搜索方向, 获得全局满意解。

适应度函数表达式为

$$F_{\text{fit}} = \frac{1}{F_1 + F_2 + P(\delta)}, \quad (14)$$

式中: F_1 为投资费用的目标函数; F_2 为年网损费用的目标函数。

2.4 遗传算子的自调整与操作

传统遗传算法仅仅凭借试算法在选择、交叉和变异概率的常规取值范围, 选取最佳参数值来确定不同状况的适应值, 致使实际工程设计过程变得更加繁琐和耗时。为了提高工作效率, 加快最优解的收敛速度, 文中选择能使适应度值和平均适应度值同比增长的选择概率, 以及能根据群体分散程度和适应度个体大小自动调节的交叉、变异概率的遗传算子进行操作^[5]。

选择概率表达式

$$P_{si} = \begin{cases} \frac{F_l}{\sum_{l \in H} F_l} & h \geq 0.6H, \\ \frac{2(H-l)}{H} & h < 0.6H, \\ \frac{1}{(H+1)} & \end{cases} \quad (15)$$

式中:选择概率 P_{si} ; F_l 为第 l 个染色体个体的适应值, l 为染色体序号; H 为染色体群体个体规模; h 为在群体中适应值大于平均适应值的个体数, 取 $h \geq 0.6H$, 可以放宽优化可行域范围, 促使适应度值随平均适应度值成比例增长。

交叉概率表达式

$$P_c = \begin{cases} P_{\max} - \frac{(P_{\max} - P_{\min})(F_c - F_{av})}{F_{\max} - F_{av}} & F_c \geq F_{av}, \\ P_{\max} & F_c < F_{av}, \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_c 为交叉概率; P_{\max} 及 P_{\min} 分别为交叉率的最大取值和最小取值; F_{\max} 为种群的最大适应度; F_{av} 为种群的平均适应度; F_c 为参加交叉运算的 2 个个体中较大的适应度。

变异概率表达式

$$P_m = \begin{cases} P_{\max} - \frac{(P_{\max} - P_{\min})(F_m - F_{av})}{f_{\max} - F_{av}} & F_m \geq F_{av}, \\ P_{\max} & F_m < F_{av}, \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_m 为变异概率; P_{\max} 及 P_{\min} 分别为变异率最小取值; F_m 为变异个体的适应度。

2.5 精英保留策略

为克服遗传进化的随机性, 避免优良个体丢失, 提高算法寻最优效率, 在算法的每一代循环中, 引入

精英保留策略^[15], 对获得的一些优良个体进行保护, 使其能够继续进化下去。也就是把亲代群体适应值大于子代最佳个体适应值的个体直接遗传到一代, 合并为一个按适应度大小排列的新种群。当然, 为了抑制种群早熟, 保证搜索范围, 顺利完成下一轮的遗传算子的运算, 新种群规模选取应于原种群规模相等, 这样, 可以从整体上提高子代群体个体适应度品质, 保护最优个体, 加快最优解的收敛速度。

3 算例

现以杨陵现代农业示范园配电网待建区域为例, 进一步检验其有效性。其示范园位于杨凌示范区西北部, 规划面积约 55 km²。园内布局建设按“一轴一心八园”格局规划为 1 个电源和 9 个用电负荷, 规划区负荷分布如图 2 所示。园区电源(杨扶路与官赛路十字路口)取自距园区 2.7 km 处的杨凌变电站, 负荷各点坐标以电源为原点测取, 节点 i 、节点坐标 (x_i, y_i) 和节点负荷量 q_i 分配见表 1 所示。

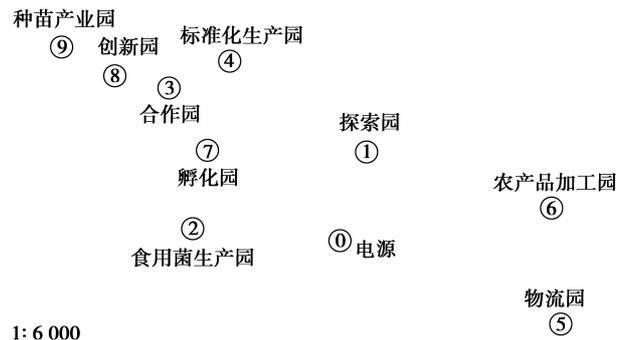


图 2 杨陵现代农业示范园负荷分布图

表 1 杨陵现代农业科技示范园节点坐标与负荷分布

i	$(x_i, y_i)/(m, m)$	q_i/kVA	i	$(x_i, y_i)/(m, m)$	q_i/kVA
0	(1 083.75, -1 530)	0	5	(4 080, -3 123.75)	500
1	(1 402.5, -510)	1 500	6	(3 825, -1275)	2 000
2	(-892.5, -1 466.25)	4 500	7	(-828.75, -510)	1 000
3	(-1 275, 446.25)	1 500	8	(-2 040, 573.75)	1 000
4	(-446.25, 828.75)	200	9	(-2 868.75, 956.25)	200

依照当地电网分布状况、自然环境条件和实际工程需求, 线路可选 XPLE 系列 10 kV YJV22 电力电缆, 其产品的电气参数标称截面 S_c 、空气中载流量 I_c 、20℃直流电阻 $R_{20℃}$ 、电抗 X 和单价

a 见表 2 所示。 J_{ki} 按 $T \geq 2 000$ h/a 选取, 功率基准值 $S_B = 100$ MVA, $v = 15$ a, $r = 7\%$, $\alpha = 0.55$ 元/(kW·h), 然后构建园内初始编码网络拓扑图, 如图 3 所示。

表 2 10 kV YJV22 电力电缆的电气参数和单价表

S_c/mm^2	I_c/A	$R_{20\text{c}}/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$X/(\mu\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$a/(\text{million yuan} \cdot \text{km}^{-1})$
25	140	0.727 0	0.125	0.177
35	170	0.524 0	0.118	0.199
50	250	0.387 0	0.112	0.234
70	260	0.268 0	0.106	0.297
95	315	0.193 0	0.101	0.375
120	360	0.153 0	0.098	0.42
150	410	0.124 0	0.095	0.521
185	470	0.099 1	0.092	0.625
240	555	0.075 4	0.089	0.781
300	640	0.060 1	0.086	0.961
400	745	0.047 0	0.083	1.149
500	855	0.036 6	0.080	1.456
630	980	0.028 3	0.078	1.851

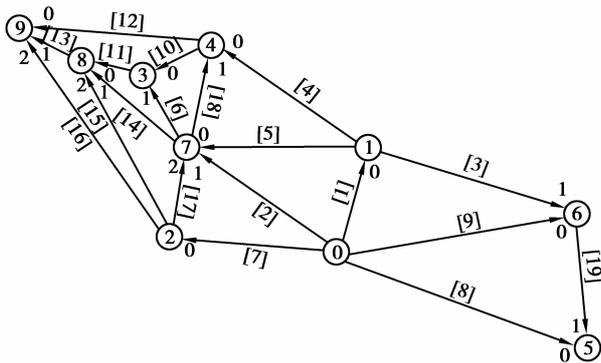


图 3 杨陵现代农业示范园电路网络初始编码拓扑图

由于该模型考虑约束条件较多,进行遗传操作时种群中易产生非约束个体,故取 $N = 600$,最大遗传代数为 5 000, $T_i + 1 = 300$, $\epsilon = 0.999$, $T_0 = 0.1$; $P_{\text{cmax}} = 0.95$, $P_{\text{cmin}} = 0.50$, $P_{\text{rmax}} = 0.1$, $P_{\text{rmin}} = 0.000 5$ 。本次研究用 Matlab 7.0 及其遗传算法工具箱编写程序,在 Windows xp 操作系统的 PC 机上对该实例分别采用传统遗传算法和退火遗传算法运行 50 次,适应度随迭代次数的变化状况如图 4 所示。由图中可以看出在前 100 次迭代过程中,2 种算法的适应度较低,但均趋于 0.3 左右;当迭代次数由 100~330 代之间时,退火遗传算法由于引入了退火动态罚因子,适应度爬坡能力明显比基本遗传算法增强,收敛速度也在加快;进入 330 迭代次数以后,退火遗传算法适应度基本稳定于 1,而基本遗传算法的适应度只有个别接近于 1,而大多数仅趋于 0.94 左右,所以,

退火遗传算法能较快的获得最优满意解。

2 种算法的运算次数(operation times, OT)、迭代代数(iteration times, IT)、全局最优次数(global optimal times, GOT)和运行时间 h 等性能对比如表 3 所示。由表看出,当 OT 和 IT 相同时,退火遗传算法的 GOT 为 19 次, h 为 11 min,而采用传统遗传算法,虽然 h 加长,但 GOT 明显减少,故引入退火动态罚因子,完全可以改善传统遗传算法运算性能。

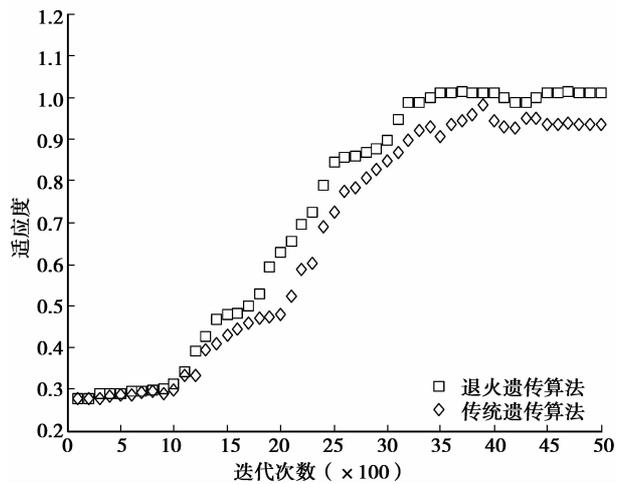
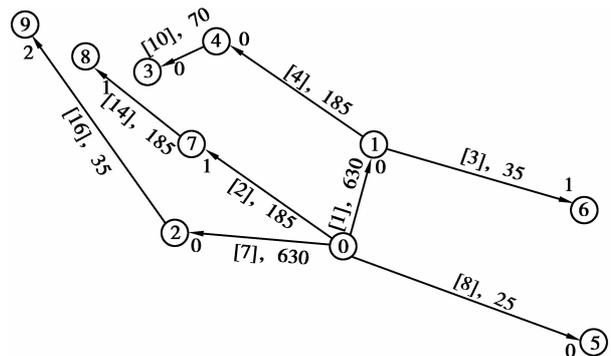


图 4 退火遗传算法与传统遗传算法的适应度变化状况

表 3 2 种算法的运行性能比较

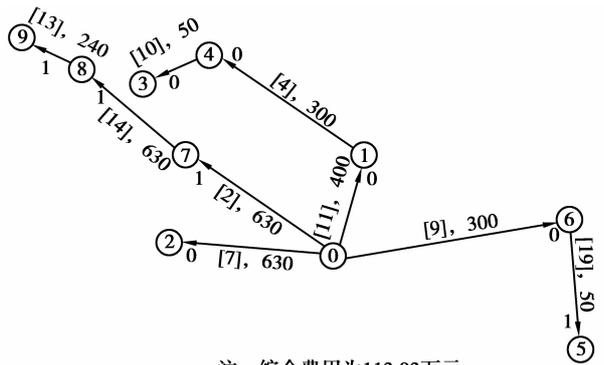
算法	OT/次	IT/次	GOT/次	h /次
退火遗传算法	50	5 000	19	11
传统遗传算法	50	5 000	3	20

图 5 为 2 个较为接近退火遗传优化方案和 1 个传统遗传优化方案。其中,退火遗传优化方案的综合费用均趋于 113 万左右,比传统遗传优化方案降低了近 50 万元,从而达到了进一步优化的目的。



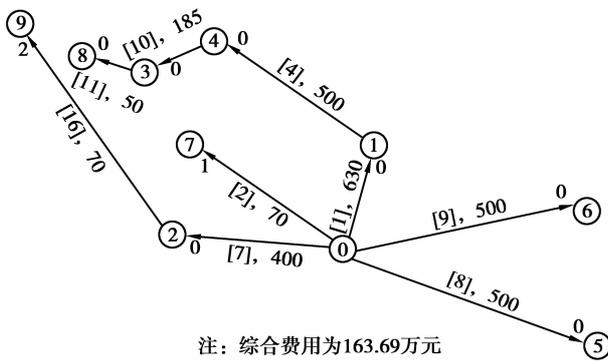
注:综合费用为 113.06 万元, [4], 185 为 [边号], 截面/ mm^2 , 0 为来自节点 1 注入节点 4 的潮流

(a) 退火遗传优化方案 1



注: 综合费用为113.93万元

(b) 退火遗传优化方案2



注: 综合费用为163.69万元

(c) 退火遗传优化方案3

图 5 杨陵现代农业示范园配电线路优化方案

4 结 论

以经济电流密度、电压、电流、功率和功率因数为约束条件,分析建设投资费用和线路年网损费用多目标函数时,引入电路网络拓扑图简化方法,以线路长度和截面 2 个变量为决策变量同时进行多参数编码优化;用退火动态罚因子构造罚函数,对配电网进行退火遗传优化研究。通过杨陵现代农业示范园配电网规划工程实例验证表明,此算法与传统遗传算法相比,适应度爬坡能力明显加强,适应度稳定于 1 的几率提高,收敛于全局最优次数增多,运行时间缩减,而且综合费用比传统遗传优化方案降低了近 50 万元,从而达到了进一步优化的目的。

参考文献:

- [1] 朴在林,孟晓芳,解东光,等. 农村电网改造中网架更新的优化方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 250-254.
PIAO Zailin, MENG Xiaofang, XIE Dongguang, et al. Optimal approach on renewing framework for rural power network upgrading [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 250-254.
- [2] 井天军,谭元刚,杨明皓. 农村微电网优化调度模型的

建立[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 127-132.

JING Tianjun, TAN Yuangang, YANG Minghao. Optimal operation model for microgrid in rural areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 127-132.

- [3] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-173.

ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-173.

- [4] 苏海锋,张建华,梁志瑞,等. 基于 GIS 空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 92-98.

SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm [J]. Chinese Society of Electrical Engineering, 2012, 32(16): 92-98.

- [5] 李可,马孝义,甘学涛,等. 配电网架结构和馈线截面同步优化模型与算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 13-20.

LI Ke, MA Xiaoyi, GAN Xuetao, et al. Electricity distribution structure and conductor cross sections simultaneous optimization method [J]. Chinese Society of Universities, 2010, 22(1): 13-20.

- [6] 张宁,马孝义,陈帝伊,等. 输配电网规划优化模型的研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 10-16.

ZHANG Ning, MA Xiaoyi, CHEN Diyi, et al. Progress of researches on optimal models of planning of power transmission and distribution Networks [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(1): 10-16.

- [7] 孔涛,程浩忠,王建民,等. 城市电网网架结构与分区方式的两层多目标联合规划[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 59-66.

KONG Tao, CHENG Haozhong, WANG Jianmin, et al. United urban power grid planning for network structure and partition scheme based on bilevel multi-objective optimization with genetic algorithm [J]. Chinese Society of Electrical Engineering, 2009, 29(10): 59-66.

- [8] Antunes C H, Pires D F, Barrico C, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for reactive power compensation in distribution networks [J]. Applied Energy, 2009, 86(7-8): 977-984.

- [9] Abouel-ela A A, Kinawy A M, El-sehiemy R A, et al. Optimal reactive power dispatch using ant colony optimization algorithm [J]. Electrical Engineering, 2011, 93(2): 103-116.

- on modified factors for 1-D calculation of embankment settlement considering soil lateral deformation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5):763-768.
- [8] 王峰,金武,王宏坤,等.考虑侧向变形影响的客运专线路基沉降的修正[J].*岩土工程学报*,2010,32(Sup2):245-248.
WANG Feng, JING Wu, WANG Hongkun, et al. Amendment of subgrade settlement of passenger dedicated line considering the lateral deformation effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32 (Sup 2): 245-248.
- [9] 曾国熙.垂直荷载下软粘土地基的侧向变形[J].*浙江大学学报*,1962(1):93-124.
ZENG Guoxi. Lateral deformation of soft clay foundation under vertical load [J]. *Journal of Zhejiang University* 1962(1): 93-124.
- [10] 蒋关鲁,王海龙,李安洪,等.土质路基荷载下地基反力试验研究[J].*铁道学报*,2012,34(6):69-74.
JIANG Guanlu, WANG Hailong, LI Anhong, et al. Experimental study on ground reaction under subgrade [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012,34(6):69-74.
- [11] 蒋关鲁,王海龙,李安洪.高速铁路路基基底应力计算方法研究[J].*铁道建筑*,2009(4):65-69.
JIANG Guanlu, WANG Hailong, LI Anhong. Study on the calculation method of High Speed Railway substrate base-stress [J]. *Railway Engineering*, 2009 (4): 65-69.
- [12] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2003.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 80 页)

- [10] Moreira W S C, Mussoi F L R, Teive R C G. Investment prioritizing in distribution systems based on multi-objective genetic algorithm [C]//Proceedings of the 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, November 8-12, 2009 Curitiba, Brazil. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [11] 雷英杰,张善文,李继武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [12] 麻秀范,张粒子.基于十进制编码的配网重构遗传算法[J].*电工技术学报*,2004,19(10):65-69.  
MA Xiufan, ZHANG Lizi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(10): 65-69.
- [13] 赵文举,马孝义,张建兴,等.基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编组模型研究[J].*水力发电学报*,2009,28(5):210-214.  
ZHAO Wenju, MA Xiaoyi, ZHANG Jianxing, et al. Optimal water delivery marshalling model based on simulated annealing genetic algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(5): 210-214.
- [14] 陈浩,李军,唐宇,等.基于动态罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法[J].*国防科技大学学报*,2009,31(2):44-50.  
CHEN Hao, LI Jun, TANG Yu, et al. An approach for electromagnetic detection satellites scheduling based on genetic algorithm with dynamic punish function [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(2): 44-50.
- [15] 王瑞琪,张承慧,李珂.基于改进混沌优化的多目标遗传算法[J].*控制与决策*,2011,26(9):1391-1396.  
WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke. Multi-objective genetic algorithm based on improved chaotic optimization [J]. *Control and Decision*, 2011, 26 (9): 1391-1396.

(编辑 詹燕平)