

DOI:CNKI:61-1390/S. 20120223. 1724. 014

网络出版时间:2012-02-23 17:24

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120223.1724.014.html

农村辐射状配电网的优化方法

张 宁,马孝义,李 可,陈帝伊

(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] **【目的】**针对城镇配电网的特点,研究辐射状配电网多目标经济性优化模型与算法,为农村中压配电网优化决策系统的建设提供技术支持。**【方法】**利用经济电流密度概念和多目标规划理论,提出计入导线截面策略因子的最小投资费用和年网损费用的多目标函数优化模型,研究并利用实数编码并行优化处理方法、引入退火动态罚因子设计动态罚函数处理约束条件、基于遗传算法的电网络路径与潮流的自识别解码方法、遗传算子的自适应调整方法等,并提高遗传算法在辐射状配电网拓扑约束中的自动识别能力,确保可行解的搜索方向和遗传寻优的顺利进行。**【结果】**通过陕西杨凌示范区新桥变电站 10 kV 配电网待建区域实例验证表明,随着选取种群数目的增多,综合费用逐渐趋向于 1 230 万元。与单目标优化方案的投资费用相比,多目标优化方案的建设投资费用约增加 72 万元,而年网损费用约减少 323 万元,综合费用约降低 250 万元,获得了该配电网的最优建设方案。**【结论】**提出了配电网多目标经济性优化模型及其算法,实现了规划线路长度和导线截面策略因子并行优化,提高了解的搜索精度。

[关键词] 辐射状配电网;多目标优化;遗传算法;经济性

[中图分类号] TM727.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)03-0220-09

Optimal method for rural radial power distribution network

ZHANG Ning, MA Xiao-yi, LI Ke, CHEN Di-yi

(Electrical Engineering Department, Institute of Water Resources and Hydropower Research,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Aiming at the characteristics of town distribution network, optimal multi-objective economic model and algorithm of radial power grid has been researched to provide a technical support for the decision system of the midvoltage distribution network optimal planning in rural area. **【Method】** Concerning the strategy factor of wire section, the multi-objective function of minimum investment costs and annual network loss costs in optimal model were put forward by taking economic current density and theories in multiple objective planning. The processing method of real code parallel optimization, method introducing annealing penalty factor to the design of dynamic penalty function to handle the restrictions, self-recognition decoding method based on genetic algorithm of power grid path and flow and self-adapting adjustment methods of genetic operators were studied and used, to ensure that the genetic algorithm can improve the ability to deploy self-adapting in restrain radial power distribution network topology, the search direction of feasible solution and that the genetic optimization can be carried out smoothly. **【Result】** When the method is used for 10 kV electricity distribution network for planning area in Xinqiao substation of Yangling, the comprehensive cost tends to be 12.3 million yuan along with the increase of the selected pop-

* [收稿日期] 2011-09-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879072);西北农业科技大学拔尖人才专项基金项目(BJRC-2009-01);西安市科技计划创新支撑计划项目(CXY1016(5));西北农业科技大学教学研究项目(JY1102057)

[作者简介] 张 宁(1970—),女,新疆哈密人,讲师,硕士,主要从事农业电气化与自动化研究。E-mail:znaw@163.com

ulation. Compared with the single objective optimization scheme, the multi-objective optimization scheme needs about an increase of 0.72 million yuan investment and the annual network loss costs about an decrease of 3.23 million yuan, so its comprehensive cost is reduced about 2.50 million and therefore realizes the optimal scheme. 【Conclusion】 Results show that the proposed mathematical model and algorithm of multiple objective economic optimization in power distribution network can realize the parallel optimization in power lines and the strategy factor of wire section and improve the searching precision of solution.

Key words: radial power distribution network; multiple objective optimization; genetic algorithm; econo- mization

随着国内外配电网规划优化方法的不断发展,将初期的建设投资费用和运行过程的年网损费用同时作为经济性多目标函数^[1-2],求取考虑综合成本最低的经济方案^[3],目前已在辐射状配电网优化模型和解算方法中取得了阶段性的成果^[4]。但对属于农网的城镇配电网,由于其供电半径短、用电负荷不均衡,直接采用城市大规模供电负荷的优化方法,按电压等级选择同一截面的导线既不经济也不合理,另外基本算法还存在编码冗余,静态罚函数处理约束稳定性不强以及自识别寻优运算差等问题^[5]。为此,本研究利用经济电流密度概念、多目标规划理论和遗传算法,研究实数编码并行优化、动态罚函数约束、配电网路径与潮流自识别解码、遗传算子自适应调整等方法,提出了配电网多目标经济性优化模型及其算法,以确保可行解搜索方向,提高布线效率,实现配电网待建规划线路长度和导线截面策略因子并行优化的最小投资方案,并以陕西杨凌示范区新桥变化站 10 kV 配电网为例验证了其可行性和有效性,以为农村中压配电网的优化决策提供技术支持。

1 辐射状配电网优化模型的建立

在建设投资方面,现有的配电网优化分析结果大多只考虑了线路长度的经济性,虽然在线路网损分析中间接表现了线路截面的影响,但尚不够准确全面^[6-7]。因此,考虑到按经济电流密度所选线路截面对小区域面积配电网规划投资建设的影响,在投资费用目标函数中计入经济电流密度截面相关的策略因子,克服传统按电压等级选择同一截面导线的缺点;配电网运行费用和网损费用一般以年网损费用最小为目标,考虑到运行中无功损耗影响甚少,故不予考虑。

本研究利用一般多目标优化模型的思想,目标函数以供应方计入导线截面策略因子的投资费用和年网损费用最小,即

$$\text{Obj min}[F_1(x), F_2(x)]。 \tag{1}$$

式中: $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 分别为供应方计入导线截面策略因子的投资费用和年网损费用目标函数, x 为决策变量。

1.1 投资费用

计入导线截面策略因子的投资费用为:

$$F_1 = A_p(n, r) \sum_{j=1}^N z_j c_j x_j l_j A_j。 \tag{2}$$

式中: $A_p(n, r)$ 为资金收回系数; N 为可供选择的线路总数; z_j 为新建线路 j 的取舍标志, $z_j = 1$ 或 0 ; c_j 为新建线路每公里的投资费用; x_j 为第 j 条待建线路的回路数; l_j 为第 j 条待建线路的长度; A_j 为新建线路 j 馈线截面的策略因子,是能反映导线型号和规格,以及经济电流密度综合经济性能的比例因子。

对 $A_p(n, r)$,有:

$$A_p(n, r) = \frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]}。 \tag{3}$$

式中: i 为资金贴现率, n 为贴现年限。

对 A_j ,有:

$$A_j = \frac{S_{ej}}{S_{Jj}} = \frac{S_{ej}}{\frac{P_j}{\sqrt{3}} U_e J \cos \varphi}。 \tag{4}$$

式中: S_{ej} 、 S_{Jj} 分别为第 j 条待建线路按额定工况下标准规格和型号所选的导线标称截面积,及按导线经济电流密度所选的导线截面积; P_j 为向第 j 个负荷节点的供给功率; U_e 为额定电压; J 为经济电流密度; $\cos \varphi$ 为送电功率因数。

1.2 年网损费用

年网损费用表达式为:

$$F_2 = T \sum_{j=1}^N \beta R_j P_j^2。 \tag{5}$$

式中: T 为年网损时间或最大负荷利用时间, β 为当前的电能单位电价, R_j 为第 j 条线路电阻。

对 P_j ,有:

$$P_j = q_j + \sum_{k=1}^{T_j} P_{jk}。 \tag{6}$$

式中: q_j 为第 j 个负荷节点的负荷量, T_j 为由第 j 个负荷节点供电数, P_{jk} 为由第 j 个负荷节点供电的第 k 条线路的功率。

约束条件: $|P_j| \leq P_{j\max}$ 。(7)

式中: $P_{j\max}$ 为第 j 个负荷节点供给的最大允许功率。

对负荷节点的电压,有:

$V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max}$ 。(8)

式中: V_j 为第 j 个负荷节点的电压, $V_{j\max}$ 、 $V_{j\min}$ 分别为节点电压的最大、最小限值。

另外,还要考虑 N-1 安全准则和网络连通性原则。N-1 安全准则是指一级配电网中 1 条架空线或 1 条电缆,或变电所中 1 组降压变压器发生故障停运时,在正常情况下,除故障段外不停电,并不得发生电压过低和设备不允许的过负荷;在计划停运情况下又发生故障停运时,允许部分停电,但应在规定时间内恢复供电。网络连通性原则是指中低压配电网中每个用电节点必须与电源点有一个通路,不能有孤岛和环路,每个负荷节点必须且只能有一个供电节点供电。

2 辐射状配电网的优化算法

为了简化实际配电网的复杂性,本研究主要以农村配电网辐射状接线方式为例,不考虑实际配电网支路的特性,只强调各支路间的拓扑关系,来构造辐射状配电网拓扑约束有向图。在算法中,为了解决传统遗传算法二进制编码冗余及易产生优化解不可行域的问题,静态罚函数处理约束条件时的约束量纲难以统一、稳定性和鲁棒性不强的不足,计算机

自动识别遗传寻优运算过程的问题,以及求解时容易产生的维数灾、局部最优或优化解过早收敛等问题^[6-7],本研究着重分析了实数编码并行优化、动态罚函数约束、配电网路径与潮流自识别解码、遗传算子自适应调整等方法,以确保可行解搜索方向,获得辐射状配电网多目标经济性优化算法的全局满意解。

2.1 辐射状配电网拓扑约束有向图的构建

配电网的拓扑约束有向图是配电网强有力的工具,它是将实际的集配电线路、变压器和移相器、开关、电阻、电感、电容等电气设备,按一定形式连接而成的具有输配电功能的整体,简化为一个由支路及连接支路的节点组成的网络抽象图^[7]。它强调的是各支路间连接的拓扑关系,不考虑具体支路的特性,以减少约束冗余。辐射状配电网结构空间拓扑关系清晰,规划区域内的电源点和负荷点均称为顶点,布置线路的交叉处称为交叉点,顶点和交叉点统称为节点,各节点之间可待选布置的线路称为边。配电网拓扑约束有向图的处理原则为^[8]: (1)辐射状配电网的节点为拓扑图的顶点;(2)各节点之间可待选布置的线路抽象为拓扑图的边;(3)线路潮流方向抽象为拓扑图边的方向;(4)电量由电源向多个负荷点供电,只存在分流,不存在汇流。

例如某规划区内有 1 个电源和 9 个负荷点,如图 1(a)所示。将电源和负荷点作为节点;节点之间待选线路按潮流方向构造为边;电源向负荷供电时只有分流没有汇流,则构建其拓扑有向图如图 1(b)所示。

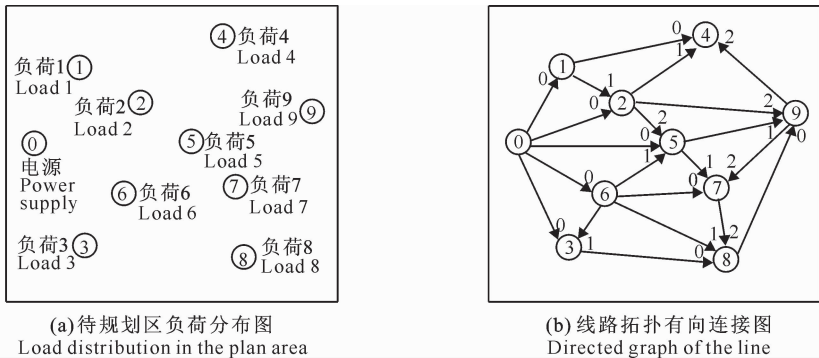


图 1 配电网拓扑约束有向图的构建

Fig.1 Preliminary nodes connection digraph

2.2 考虑最小投资费用和年网损费用的经济性模型的计算

本研究从供电节点出发,对线路长度和导线截

面策略因子进行并行优化;采用遗传算法实数编码方法^[9-10]以及计算网络功率、电压的约束方法,将供电节点矩阵转换为供电路径自识别方式^[11],实现配

电网规划最小投资费用的优化。

2.2.1 遗传算法的实数编码并行优化 根据拓扑有向图,对线路长度和导线截面策略因子进行并行实数编码优化。编码分2段,前半段编码为供电线路编号,后半段编码为导线截面策略因子编号;编码长度分别取为用电节点个数。以图1为例,取供电线路初始编码 $\{0,1,2,\dots\}$,如第5位基因可选用0、1、2等3个整数表示,若为2,表示由编号为2的供电线路向节点5供电。后半段的导线截面策略因子按递增方式排列编码,并与导线标称截面相对应,以方便导线截面的选择和换算,其编码方式如图2所示。

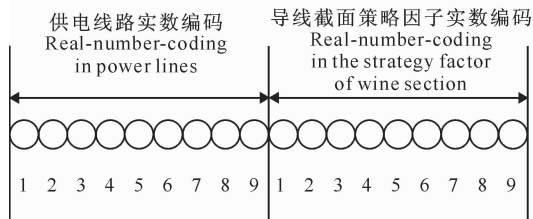


图2 供电线路和导线截面策略因子并行实数编码

Fig.2 Real-number-coding for parallel optimization in power lines and the strategy factor of wire section

2.2.2 遗传算法适应度函数的选择和确立 用遗传算法求解优化问题时,通过计算搜索空间每个染色体的适应度函数值,对遗传操作的适应度函数大小作出个体评价,故其函数构造的合理与否直接影响算法的收敛性和计算速度。为了保证适应性好的个体有更多机会将优良特性遗传给后代,需要将优化问题的目标函数转化为适应度函数。

为了克服静态罚函数处理约束条件时稳定性和鲁棒性不强、各约束量纲难以统一的缺点,本研究引用退火算法中的动态罚因子构建罚函数^[12],以保证可行解的搜索方向,获得全局满意解。其适应度函数表达式为:

$$F_{fit}(x, \sigma_k) = \frac{1}{F_1 + F_2 + \sigma_k \sum_{i=1}^G (q_P \psi_{P_j} + q_V \psi_{V_j})} \quad (9)$$

式中: F_{fit} 为适应度函数, x 为解码后的决策变量, σ_k 为退火算法中的动态罚因子^[13], 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, G 为不等式约束条件个数, q_P 、 q_V 为功率和电压约束惩罚因子, ψ_{P_j} 、 ψ_{V_j} 为功率和电压约束的罚函数。

$$\psi_{P_j} = \begin{cases} \frac{P_j - P_{j \max}}{P_{j \max}}, & P_j \geq P_{j \max}; \\ 0, & P_j < P_{j \max}. \end{cases} \quad (10)$$

示。若选取导线的标称截面为25,35,50,70,95,120,150,185和240 mm²等多个规格,遗传算法的实数编码并行优化结果为 $[0,0,0,0,2,0,1,0,2,7,9,6,2,4,2,1,4,2]$,其中前半段编码 $[0,0,0,0,2,0,1,0,2]$ 反映图3中的优化线路供电状况,后半段编码 $[7,9,6,2,4,2,1,4,2]$ 反映依据导线截面策略因子所选的相应的导线标称截面。其中图3各条边上的数据,例如 $[7,158]$ 和0分别为导线截面策略因子实数编码值、所选截面(mm²)和供电线路实数编码值。

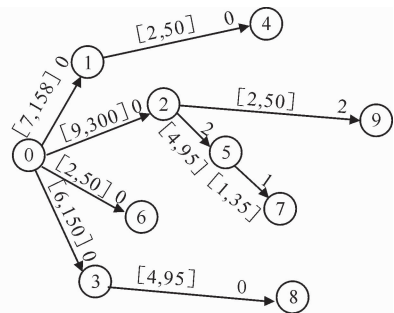


图3 遗传算法的实数编码并行优化图

Fig.3 Typical coding example for simultaneous optimization

$$\psi_{V_j} = \begin{cases} \frac{V_j - V_{j \max}}{V_{j \max}}, & V_j > V_{j \max}; \\ 0, & V_j \leq V_{j \max}. \end{cases} \quad (11)$$

2.2.3 基于遗传运算的电网路径与潮流的自识别解码方法 本研究通过构造用电矩阵及其对应的供电矩阵,以及各支路的初始功率,使运算程序自动从电源点出发,按照供电路径寻优过程,将供、用电矩阵由元素最多(总支路数)的矩阵逐渐化简为空矩阵,最终获得最佳供电路径方式。以图1的优化结果为例,自识别供电路径寻优过程如表1所示。由表1可见,供电路径寻优过程图中,(a)表示只有电源0节点,在供电节点矩阵寻找0节点以及与之相对应用电节点矩阵的节点1、2、3、6;(b)表示连接0-1、0-2、0-3、0-6供电路径,在供电节点矩阵寻找1、2、3、6节点以及与之相对应用电节点矩阵的节点4、5、8;(c)表示连接1-4、2-5、3-8、2-9供电路径,在供电节点矩阵寻找4、5、8、9节点以及与之相对应用电节点矩阵的节点7;(d)表示连接5-7供电路径,供电节点矩阵以及与之相对应用电节点矩阵呈空矩阵。

潮流功率的推求是从末级节点用电负荷出发^[14],构造新的功率传递矩阵;按照供电路径寻优

的逆序过程,逐一计算各支路的功率矩阵,获得各节点实际功率,潮流功率推求过程如表 2 所示。

表 1 供电路径的寻优过程

Table 1 Deduction process of electricity flow route matrix

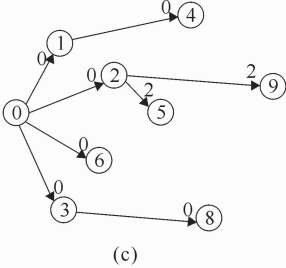
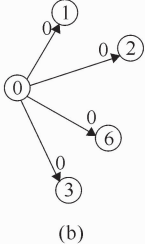
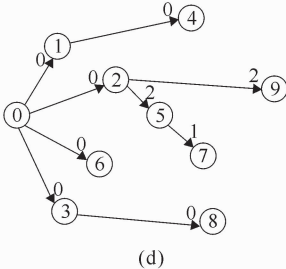
供电路径寻优过程图 The deduction process of electricity flow route matrix	供电节点矩阵 The node matrix of power supply	用电节点矩阵 The node matrix of using electricity	供电路径寻优过程图 The deduction process of electricity flow route matrix	供电节点矩阵 The node matrix of power supply	用电节点矩阵 The node matrix of using electricity
 (a)	[0,0,0,1,2,0,5,3,2]	[1,2,3,4,5,6,7,8,9]	 (c)	[5]	[7]
 (b)	[1,2,5,3,2]	[4,5,7,8,9]	 (d)	[]	[]

表 2 潮流功率的推求过程

Table 2 Electricity conductors power computation process

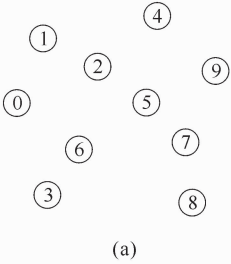
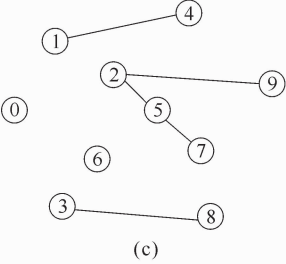
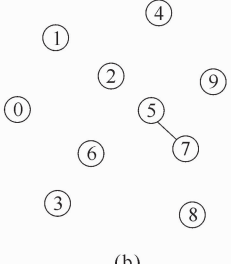
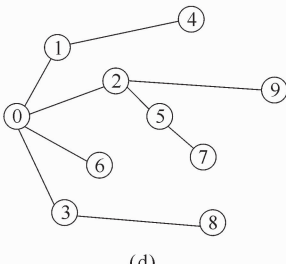
潮流功率推求过程图 Electricity conductors power computation process	功率传递矩阵 The matrix of power transfer	功率叠加 Stacking power	潮流功率推求过程图 Electricity conductors power computation process	功率传递矩阵 The matrix of power transfer	功率叠加 Stacking power
 (a)	$[q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9]$		 (c)	$[q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9]$	$q_1' = q_1 + q_4$ $q_2' = q_2 + q_1' + q_9$ $q_3' = q_3 + q_8$
 (b)	$[q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9]$	$q_3' = q_3 + q_7$	 (d)	$[q_0', q_1', q_2', q_3', q_4', q_5', q_6', q_7', q_8', q_9']$	$q_0' = q_1' + q_2' + q_3' + q_6$

表 2 中, $q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9$ 为功率推求前的各节点功率; $q'_0, q'_1, q'_2, q'_3, q'_5$ 为功率推求后的功率叠加节点功率。(a)是由最初各节点本身的用电负荷组成的矩阵;(b)是按功率推求的方法从末级节点 7 出发,遵循寻优逆序过程,寻找到 5 节点,功率传递矩阵的第 6 个元素由 q_5 增加为 q'_5 ;(c)是按功率推求和寻优逆序过程,继续由新的末级节点 4,5,8,9,寻找到 1,2,3 节点,传递矩阵的第 2,3,4 元素由 q_1, q_2, q_3 增加为 q'_1, q'_2, q'_3 ;(d)是由新的末级节点 1,2,3,6 寻找电源节点,传递矩阵的第 1 个元素由 q_0 增加为 q'_0 。潮流电压的计算与功率推求相反,从配电网的电源点出发,逐级简化,最终求得各节点的电压值。

2.2.4 遗传算子的自适应调整 本研究采用遗传算法中最常用的轮盘赌法,用单点交叉方式和概率变异法进行选择、交叉和变异算子操作^[15]。为了放宽优化的可行域,假设染色体群体个体规模为 N ,选择个体以 $0.5N$ 为界,使适应值和平均适应值成比例增长。选取的选择概率 P_{si} 可表示为:

$$P_{si} = \frac{f_i}{\sum_{i \in N} f_i}, n > 0.5N. \tag{12}$$

式中: f_i 为第 i 个染色体个体的适应值, i 为染色体序号, n 为在群体中适应值大于平均适应值的个体数。

为了降低工程设计的难度,提高遗传算法的收敛速度,本研究引用自适应遗传算法,按个体适应度大小和群体的分散程度自行调节交叉、变异概率。其自适应调节方式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c \max} - \frac{(P_{c \max} - P_{c \min})(f' - \bar{f})}{f_{\max} - \bar{f}}, & f' \geq \bar{f}; \\ P_{c \max}, & f' < \bar{f}. \end{cases} \tag{13}$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m \max} - \frac{(P_{m \max} - P_{m \min})(f - \bar{f})}{f_{\max} - \bar{f}}, & f \geq \bar{f}; \\ P_{m \max}, & f < \bar{f}. \end{cases} \tag{14}$$

式中: P_c 表示交叉概率, P_m 表示变异概率, $P_{c \max}$ 及 $P_{c \min}$ 分别表示交叉概率的最大、最小取值, $P_{m \max}$ 及 $P_{m \min}$ 分别表示变异概率的最大、最小取值; $f_{\max}$ 表示种群的最大适应度; $\bar{f}$ 表示种群的平均适应度; f' 表示参加交叉运算的 2 个个体中较大的适应度; f 表示变异个体的适应度。

3 辐射状配电网优化模型的计算流程

辐射状配电网经济性多目标优化模型计算流程如图 4 所示。具体步骤如下。

- 1)输入辐射状配电网基本的原始数据,包括线路长度、线径和节点负荷量等。
- 2)定义遗传算法参数,确定各矩阵的大小。
- 3)进行染色体编码,随机产生初始种群。
- 4)构造罚函数的配电网多目标优化的适应度函数。
- 5)执行遗传操作,计算种群中每个个体的适应度函数值。
- 6)判断是否满足停止条件,如果满足,则执行下一步,否则,返回(4),继续计算。
- 7)将当前代中出现的最好个体指定为计算结果并输出,这个结果表示为辐射状配电网多目标的最优方案。

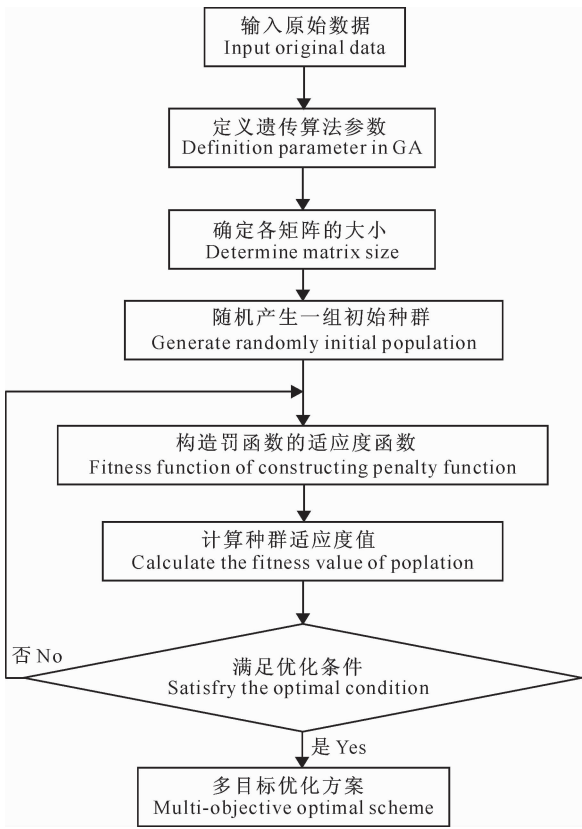


图 4 辐射状配电网优化模型的计算流程
Fig. 4 Flow process chart of model for radial distribution network

4 实例计算与分析

陕西杨凌示范区新桥变电站 10 kV 配电网待建区域约 60 万 m^2 ,包含 9 个用电负荷点。依据拓扑约束有向图处理方法,设定 10 个节点,其分布状况如图 5 所示。其节点间初选线路长度和节点的用电负荷分配见表 3 和表 4。

线路经济电流密度按最大负荷利用时间大于 2 000 h/年选取,资金贴现率取为 7%,贴现年限为 20 年。采用 XPLE 系列产品,选取其标称截面为 25,35,50,70,95,120,150,185,240,300,400,500,630,800 和 1 000 mm² 等。

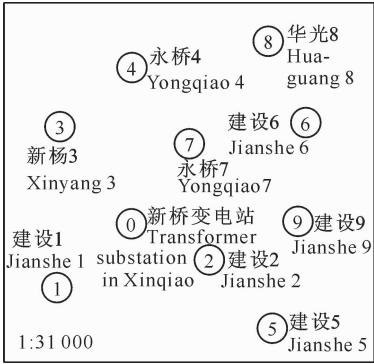


图 5 陕西杨凌示范区新桥变电站 10 kV 待建区域用电负荷分布图

Fig. 5 Load distribution for 10 kV planning area in Xinqiao substation of Yangling Shaanxi

表 3 陕西杨凌示范区新桥变电站负荷点之间初选线路的长度

Table 3 Primary line length between nodes in Xinqiao substation of Yangling Shaanxi

线路 Line	长度/km Length	线路 Line	长度/km Length
0—1	0.667	3—7	0.967
0—2	0.700	4—7	0.667
0—3	0.767	4—8	0.103 4
0—7	0.767	5—9	0.834
0—9	0.126 7	6—8	0.567
1—5	0.150 0	7—6	0.767
2—5	0.600	7—8	0.900
2—9	0.700	7—9	0.900
3—4	0.700	9—6	0.667

优化过程中,选取种群规模 $N=50$,交叉概率最大 $P_{c \max}=0.95$ 、最小值 $P_{c \min}=0.50$,变异概率最

大值 $P_{m \max}=0.1$ 、最小值 $P_{m \min}=0.001$ 。单位建设投资成本选取为 100 万元/km,功率基准值 $S_B=100 \text{ MV} \cdot \text{A}$,当前单位电价取为 0.5 元/(kW·h),最大、最小交叉概率取值为 $P_{c \max}=0.90$, $P_{c \min}=0.60$,最大、最小变异概率取值为 $P_{m \max}=0.1$, $P_{m \min}=0.000 5$ 。为验证本次优化的有效性和可行性,在此选取 3 个较为接近的多目标优化方案,并与单目标优化方案进行对比,结果见表 5。

表 4 陕西杨凌示范区新桥变电站负荷节点与用电负荷的分配

Table 4 Electricity load of different nodes in Xinqiao substation of Yangling Shaanxi

节点 Node	用电负荷/(kV·A) Electricity load	节点 Node	用电负荷/(kV·A) Electricity load
0	0	5	2 500
1	1 600	6	1 600
2	1 600	7	1 600
3	2 000	8	1 600
4	2 500	9	1 600

由表 5 可以看出,随着选取的种群数目的增多,综合费用逐渐趋向于 1 230 万元,与单目标优化方案的投资费用相比,多目标优化方案的建设投资费用约增加 72 万元,而年网损费用约减少 323 万元,综合费用约降低 250 万元。采用单目标优化方案时,虽其投资费用均较 3 个多目标优化方案的小,但由于未同时考虑年网损费用的优化问题,其年网损费用远高于 3 个多目标优化方案,导致单目标优化方案的综合费用要远高于多目标优化方案,所以单目标优化方案往往不是最优选择方式。由于采用了导线截面策略因子的并行优化方法,按输送功率大小和经济电流密度选择导线截面,克服了传统的按电压等级统一选择导线截面的缺陷,大幅度降低了配电网的总投资费用。在不同优化方式下,陕西杨凌示范区新桥变电站待建区域接线方案如图 6 所示。

表 5 陕西杨凌示范区新桥变电站待建区域优化结果的对比

Table 5 Different optimal plans of multi-objective model for planning area in Xinqiao substation of Yangling Shaanxi

项目 Item	单目标方案 Single objective plan	多目标方案 Multi-objective plan					
		1		2		3	
		费用 Cost	与单目标方案差额 And single objective plan difference	费用 Cost	与单目标方案差额 And single objective plan difference	费用 Cost	与单目标方案差额 And single objective plan difference
投资费用 Investment cost	778.7	783.2	4.5	868.9	90.2	899.0	120.3
年网损费用 Year network loss cost	705.5	375.7	−329.8	386.2	−319.3	384.9	−320.6
综合费用 Comprehensive cost	1 484.2	1 158.9	−325.3	1 255.1	−229.1	1 283.9	−200.3

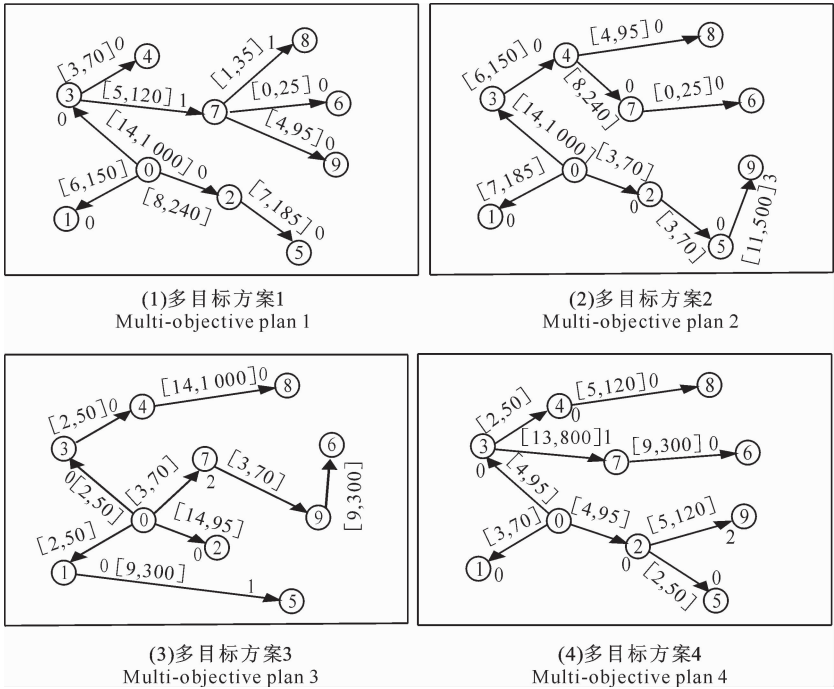


图 6 陕西杨凌示范区新桥变电站待建区域线路多目标优化方案图

Fig. 6 Multi-objective optimization scheme for planning area in Xinqiao substation of Yangling Shaanxi

5 结 论

本研究提出的配电网多目标经济性优化数学模型及其算法具有如下特点。

1)分析了经济电流密度与导线截面之间的关系,提出了计入导线截面策略因子的最小投资费用的目标函数。考虑到运行中无功损耗年网损费用的影响甚少,仅建立有功损耗的最小年网损费用目标函数,以简化计算。

2)采用遗传算法实数编码方式,以及计算网络功率、电压的约束方法,将供电节点矩阵转换为遗传运算电网路径与潮流的自识别解码方法。从辐射状接线的供电节点出发,实现配电网待建规划线路长度和导线截面策略因子并行优化。

3)引用退火算法中的动态罚因子构建罚函数,提高解的搜索精度,保证可行解的搜索方向;实现遗传算子的自适应调整,避免优化解过早地收敛或出现局部最优等现象。

[参考文献]

[1] 王秀丽,李淑慧,陈皓勇,等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12):11-17.
Wang X L, Li S H, Chen H Y, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,

2006, 26(12):11-17. (in Chinese)
[2] 王 一,程浩忠. 计及输电阻塞的帕累托最优多目标电网规划 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13):132-137.
Wang Y, Cheng H Z. Pareto optimality based multiobjective transmission planning considering transmission congestion [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13):132-137. (in Chinese)
[3] 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): 59-65.
Kong T, Cheng H Z, Wang J M, et al. United urban power grid planning for network structure and partition scheme based on bilevel multiobjective optimization with genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10):59-65. (in Chinese)
[4] Carlos H A, Dulce F P, Carlos B, et al. A mutiobjective evolutionary algorithm for reactive power compensation in distribution networks [J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8):977-984.
[5] 罗智慧,李建兵,李爱武. 电网规划的多目标满意优化 [J]. 电力学报, 2010, 25(1):62-64.
Luo Z H, Li J B, Li A W. The multi-objective satisfactory optimization for power network planning [J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1):62-64. (in Chinese)
[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 N, Ma X Y, Chen D Y, 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. (in Chinese)
[7] 李 可,马孝义,甘涛涛,等. 配电网架结构和馈线截面同步优化模型与算法 [J]. 电力系统及自动化学报, 2010, 22(1):13-

20.
Li K, Ma X Y, Gan X T, et al. Electricity distribution structure and conductor cross sections simultaneous optimization method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 13-20. (in Chinese)

[8] 刘 健, 毕鹏翔, 杨文宇, 等. 配电网理论及应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 21-300.
Li J, Bi P X, Yang W Y, et al. Distribution network theory and application [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 21-300. (in Chinese)

[9] Gallego R A, Alves A B, Monticelli A, et al. Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 181-188.

[10] 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 X F, Zhang L Z. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 65-69. (in Chinese)

[11] 王新坤. 基于混合编码遗传算法的机压微灌干管管网优化 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 209-213.
Wang X K. Optimization of pumping microirrigation main pipe based on genetic algorithms with hybrid coding [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(9): 209-213. (in Chinese)

[12] 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 W J, Ma X Y, Zhang J X, et al. Optimal water delivery marshalling model based on simulated annealing genetic algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 210-214. (in Chinese)

[13] 宋松柏, 康 艳. 3 种智能优化算法在设计洪水频率曲线适线法中的应用 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 205-208.
Song S B, Kang Y. Design flood frequency curve optimization fitting method based on 3 intelligent optimization algorithms [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2008, 36(2): 205-208. (in Chinese)

[14] 马孝义, 于国丰, 李安强, 等. 渠系配水优化编组通用化软件的研发与应用 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 119-123.
Ma X Y, Yu G F, Li A Q, et al. Research and development of general softw are for optimal irrigation water distribution and its application [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 119-123. (in Chinese)

[15] 赵 亮, 睢 刚, 吕剑虹. 一种改进的遗传多目标优化算法及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 69-101.
Zhao L, Ju G, Lü J H. An improved genetic algorithm in multiobjective optimization and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 69-101. (in Chinese)

(上接第 219 页)

[15] Li X C, Wang J, Wang F. The pattern of multiple attribute and multiple dimension grey decision making [J]. Journal of Grey System, 2007, 20(3): 273-280.

[16] 谢乃明, 刘思峰. 考虑概率分布的灰数排序方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(4): 169-175.
Xie N M, Liu S F. On comparing grey numbers with their probability distribution [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(4): 169-175. (in Chinese)

[17] 罗 党, 刘思峰. 灰色对指标风险型决策方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1057-1060.
Luo D, Liu S F. Research on grey multi-criteria risks decision-making method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8): 1057-1060. (in Chinese)

[18] 王开荣, 杨 红. 基于直觉模糊集的多属性决策方法 [J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(3): 114-118.
Wang K R, Yang H. Multiple attribute decision making method based on intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy System and Mathematics, 2010, 24(3): 114-118. (in Chinese)

[19] 范 平, 梁家荣, 李天志. Vague 集的多目标模糊决策方法 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(1): 142-144.
Fan P, Liang J R, Li T Z. Multi-criteria fuzzy decision-making method of vague sets [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(1): 142-144. (in Chinese)