

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190655

基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型

唐俊熙¹, 王梓耀², 张俊潇¹, 曹华珍¹, 高崇¹, 余涛²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510030; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 为了进一步完善配电网规划模型, 首先抽象出辐射状、单环网以及两供一备3种接线模式的拓扑图。然后提出适用于多电源的配电网规划模型。以停电风险、投资成本和运行成本为目标函数确定配电网的常规线路, 根据接线模式约束以最短路径法确定配电网的联络线路和备用线路。模型中将接线模式约束转化为接线模式单元, 用函数关系式将负荷重要性和缺供电量 *ENS* 转化为停电风险, 从而达到协同考虑可靠性和经济性的目标。最后运用文化蚁群算法对模型进行优化求解。将提出的模型方法应用于一个29节点的待规划配电网区域, 计算结果表明所提出的方法能够快速得到不同接线模式约束下的配电网规划方案及其对应的经济性、可靠性指标, 为规划人员提供参考和依据。

关键词: 可靠性; 配电网规划; 文化蚁群算法; 接线模式; 停电风险

High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm

TANG Junxi¹, WANG Ziyao², ZHANG Junxiao¹, CAO Huazhen¹, GAO Chong¹, YU Tao²

(1. Power Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., CSG, Guangzhou 510030, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to further improve the distribution network planning model, the topological diagrams of three connection modes, radial, single-loop and two-supply-one-stand-by are abstracted firstly. A planning model of distribution network suitable for multiple power supplies is put forward. This paper takes the risk of power failure, investment cost and operation cost as the objective functions to determine the normal lines of the distribution network, and determine the contact lines and backup lines of the distribution network by the shortest circuit method according to the connection mode constraint. Connection mode constraints are transformed into connection mode units, and load importance and power shortage *ENS* are transformed into blackout risk by functional relationship, so as to achieve the goal of synergistic consideration of reliability and economy. Finally, Memetic Ant Colony Algorithm (MACA) is used to optimize the model. The proposed method is applied to a 29 node for planning of distribution network. The calculation results show that the presented method can quickly get distribution network planning scheme and its corresponding economy and reliability indices under different connection mode restraints to provide the reference and basis for planning personnel.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777078) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. GDKJXM20172942).

Key words: reliability; distribution network planning; memetic ant colony algorithm; connection mode; power outage risk

0 引言

随着经济的发展, 各类重要负荷接入配电网中,

在配电网规划设计中精细考虑配电网可靠性, 对于提升配电网供电可靠性意义重大。广大学者针对配电网规划和配电网可靠性评估做出了深入研究^[1-2]。

配电网规划需要遵循“开环运行, 闭环设计”的原则。文献[3]提出了支路交换算法, 并结合动态规划用于求解大规模辐射状配电网规划模型。文献

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777078); 中国南方电网公司科技项目资助(GDKJXM20172942)

[4]考虑负荷的不确定性因素,采用模糊计算和遗传算法生成辐射状配电网网架初始结构,然后运用遗传算法对配电网网架进行规划。文献[5]建立了考虑不确定性因素的辐射状配电网规划模型,并用模拟退火算法对规划模型进行求解。

但是上述模型都是基于单电源辐射状接线模式约束,而没有考虑多电源情况下各种接线模式约束。在实际规划设计中,标准化接线模式可以为后期配电网升级演化以及配电自动化装置的安装带来便利,具有很大的实际应用需求。文献[6]利用基元接线原理构建不同边界条件下中压配电网典型接线方式,在考虑了安全性、可靠性和经济性等指标的情况下,对不同配电网接线方式进行评价,并得出不同规划区下选择的配电网接线方式。文献[7]提出了一种基于模式空间的配电网规划,在接线模式空间内运用单亲遗传算法进行寻优,考虑了配电网接线模式约束。文献[8]考虑负荷密度、投资、可靠性等因素影响,建立多目标优化模型对某一地区内的接线模式进行选择。

现有多数配电网网架规划往往只考虑网架投资成本和运行成本^[9-10],对于配电网的可靠性通常采用 $N-1$ 通过率作为配电网规划模型的约束条件进行网架优化设计^[11]。然而, $N-1$ 通过率这种侧重容量的可靠性评价标准难以满足高供电可靠性片区的建设要求。为了得到更为准确的可靠性计算结果,可以运用网络等值法^[12],最短路法^[13]、蒙特卡洛模拟法^[14]等方法对配电网网架进行更精确的可靠性评估。然而将配电网可靠性评估算法融入到配电网规划模型的研究仍然较少。

综上,为了进一步精细考虑配电网可靠性,从拓扑上考虑多电源接线模式,本文以配电网投资成本、运行成本、可靠性成本最小为目标函数,以接线模式拓扑和网架运行为约束条件建立配电网规划模型。首先,对常用的三种接线模式(辐射状、单环网、两供一备)进行拓扑结构抽象,使之适用于配电网可靠性计算和规划的拓扑约束。然后建立配电网规划模型,以投资成本、运行成本和可靠性成本为目标函数,确定配电网常规线路,然后根据接线模式约束,运用最短路法确定配电网的联络线路和备用线路。其中,可靠性成本先运用故障后果分析法(Failure Mode Effect Analysis, FMEA)准确计算出各负荷节点的缺供电量(Energy Not Supplied, ENS),然后根据停电损失函数计算得到停电损失作为可靠性成本。由于建立的模型是一个非凸非线性的离散优化模型,结合文化基因算法和蚁群算法提出了一种文化蚁群算法(Memetic Ant Colony Algorithm,

MACA),最后将本文提出的模型算法应用到一个 29 节点的规划片区中进行验证,讨论了三种接线模式下配电网规划的结果,并验证了 MACA 相比与遗传算法(Gernetic Algorithm, GA)和粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)在收敛结果上有了明显改进。

1 配电网接线模式拓扑结构抽象化

配电网的接线模式除了典型的辐射状结构之外,还包括多种接线结构:单环网接线、多分段多联络接线、 n 供 m 备等多种模式。本文主要对城市 10 kV 配电网常用的 3 种接线模式进行介绍。

为了考虑接线模式,需要对每种接线模式的基本单元进行研究抽象,再将接线单元运用在整个配电网规划的拓扑结构上以体现接线模式约束。

1.1 单电源辐射接线模式

单电源辐射状接线模式(Radial Power Supply Connection, RPS)就是从变电站中引出若干馈线,以树状结构将各个负荷点进行连接。

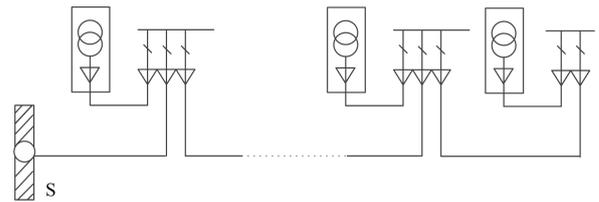


图 1 辐射状供电接线示意图

Fig. 1 Radial power supply connection

从图 1 的接线模式中可以看出,从变电站出线后,经过开关房,开关房下游带有变压器和负荷。于是可以将辐射状接线模式的拓扑图抽象为从变电站出线后放射状地把连接若干负荷节点(节点包括变压器和负荷,支路包含开关房),以一个 10 节点的简单配电网为例,抽象后辐射状接线模式如图 2 所示,其中负荷节点用橙色圆形节点表示,变电站节点用蓝色方形节点表示。

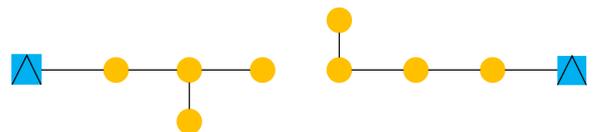


图 2 辐射状供电接线拓扑图

Fig. 2 Radial power supply connection topology

1.2 “手拉手”单环网接线模式

单环网接线模式(Single Ring Network Power Supply Connection, SRN)是在辐射状接线模式的基

础上多了联络开关, 分为站间联络和站内联络, 其接线模式如图 3 所示。

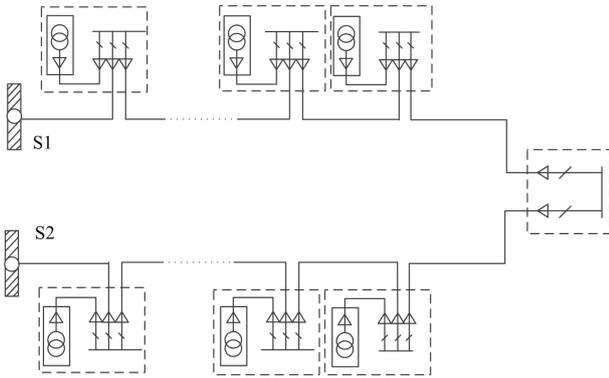


图 3 单环网接线示意图

Fig. 3 Single ring network connection

在两个需要进行联络的负荷点之间用联络线接起来, 若两组馈线来自同一变电站, 则为站内联络, 若两组馈线来自不同变电站, 则为站间联络。抽象后单环网接线模式如图 4 所示。

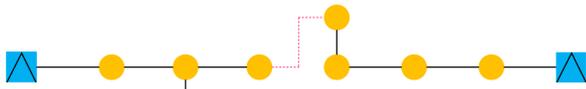


图 4 单环网接线拓扑图

Fig. 4 Single ring network connection topology

1.3 两供一备接线模式

两供一备接线模式(Two Supplies and One Backup Connection, TSOB)是在联络线的基础上多考虑了备用线通常用于给重要的负荷转供电, 其接线模式如图 5 所示。

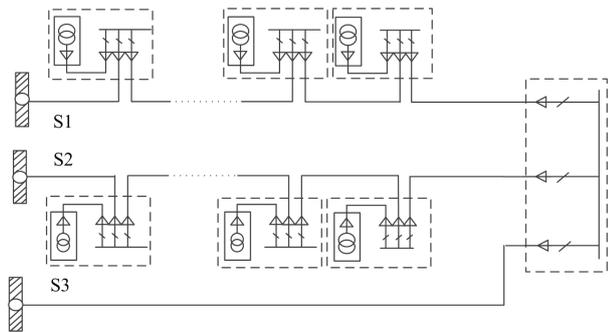


图 5 两供一备接线示意图

Fig. 5 Two supplies and one backup connection

为了保证供电可靠性, 在规划阶段应该将有分支的线路以环网的形式进行设计, 对于某些重要负荷, 引一条备用线接入电源点中形成环网, 如图 6 所示。

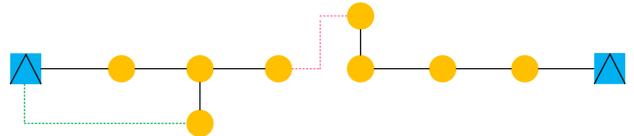


图 6 单两供一备拓扑图

Fig. 6 Two supplies and one backup topology

2 配电网网架规划模型

对接线模式进行抽象后, 配电网规划就转化为从变电站出线后给若干个负荷点供电的问题。以投资成本、运行成本、可靠性成本为目标函数, 采用交流潮流模型, 考虑功率平衡约束, 节点电压约束, 支路功率约束和配电网接线模式约束建立配电网网架规划模型。

2.1 目标函数

1) 投资成本

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{inv}} = (C_{\text{bra}} + C_{\text{equ}}) \frac{r(1+r)^{\tau}}{(1+r)^{\tau} - 1} \\ C_{\text{bra}} = \sum_{l \in NL} L_l [K_D P_{\text{cab}} + (1 - K_D) P_{\text{lin}}] + \\ \quad \sum_{l \in TL} L_l P_T + \sum_{l \in BL} L_l P_B \\ C_{\text{equ}} = \sum_{e \in SE} N_e [K_D P_{\text{box}} + (1 - K_D) P_{\text{swi}}] + \\ \quad \sum_{e \in TE} N_e P_t + \sum_{e \in BE} N_e P_b \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: F_{inv} 表示网架建设投资成本; C_{bra} 和 C_{equ} 分别表示支路建设成本和开关设备建设成本; τ 为规划年限; r 为贴现率; l 表示规划方案中的线路; NL 、 TL 、 BL 分别表示规划方案中常规线路、联络线路和备用线路的集合; L_l 表示各类线路的建设长度, 为了准确反映线路的长度, 本文采用曼哈顿距离(Manhattan Distance)进行计算; K_D 为电缆化率, 因此 $1 - K_D$ 为架空线路的比率; P_{cab} 、 P_{lin} 、 P_T 、 P_B 为电缆线路、架空线路、联络线路和备用线路单位长度的建设成本; N_e 表示各类开关的数量; SE 、 TE 、 BE 分别表示分段开关、联络开关、备用开关集合; P_{box} 、 P_{swi} 、 P_t 、 P_b 分别表示开关柜、柱上开关、联络开关、备用开关的单位建设成本。

2) 运行成本

$$F_{\text{ope}} = \alpha P_{\text{loss}} = \alpha \sum_{l \in L} P_l \quad (2)$$

式中: F_{ope} 表示配电网运行成本, 主要体现为规划网架的损耗 P_{loss} , 规划网架每一条馈线 l 的功率损耗为 P_l , 网架损耗通过交流潮流模型计算得到; α 表示单位网损造成的平均经济损失; L 表示各类线路集合。

3) 可靠性成本

$$\begin{cases} F_{rel} = \sum_{i=1}^n [SCDF(U_i^p) \cdot ENS_i] \\ ENS_i = \lambda_i \cdot U_i^p \cdot P_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_{rel} 表示配电网可靠性成本, 主要体现为规划网的停电损失; $SCDF$ 为单位功率的停电损失函数, 跟输入的负荷停电时间 U 以及负荷类型 p 有关^[15-16]; ENS_i 为负荷节点 i 的缺供电量; λ_i 为通过可靠性解析算法计算^[17]得到的负荷节点 i 的等效故障率; U_i^p 为通过可靠性解析算法计算得到节点 i 的等效停电时间; P_i 为节点 i 的负荷功率。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ij} \\ Q_{ij} = -U_i U_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) + U_i^2 G_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 的有功潮流和无功潮流; U_i 、 U_j 分别表示节点 i 和节点 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的互电导和互电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电压相角差。

2) 支路功率约束

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{max}^2 \quad (5)$$

式中, S_{max} 为馈线支路允许通过的最大功率。

3) 节点电压约束

$$U_i \leq U_i^{max}, i \in N \quad (6)$$

式中: U_i 表示节点 i 的电压; U_i^{max} 表示节点 i 允许的最大电压; N 表示规划片区所有节点集合。

4) 配电网拓扑约束^[18]

$$m = n - n_s \quad (7)$$

式中: n 表示规划片区中所有节点的个数; n_s 表示规划片区中所有电源点的个数; m 表示辐射状运行条件下配电网常规支路的条数。对于单环网接线模式和两供一备接线模式的拓扑约束将在 3.3 节中介绍。

3 配电网规划模型的求解

3.1 模型的构建与转化

根据前面所述的目标函数和约束条件可以构成如下的模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mu_1 F_{inv} + \mu_2 F_{ope} + \mu_3 F_{rel} \\ \text{s.t.} \quad & (4)(5)(6)(7) \end{aligned} \quad (8)$$

显然, 这是一个带有多个复杂约束的优化问题, 决策变量是节点的连接关系。由于可靠性解析算法需要对网架的拓扑结构进行搜索计算, 难以将

其转化为显式函数表达式, 因此这是一个非凸非线性的数学模型。

为了对模型进行求解, 需要将其转化为无约束优化问题, 对于功率平衡约束调用 Matpower 交流潮流模型中的 PQ 分解法进行求解, 对于不等式约束采用罚函数的形式转移到目标函数中。其适应度函数 F 表达式为

$$\min F = \mu_1 F_{inv} + \mu_2 F_{ope} + \mu_3 F_{rel} + \eta N \quad (9)$$

式中: μ_1 、 μ_2 、 μ_3 表示投资建设成本、运行成本和可靠性成本对应的权重; η 表示惩罚系数; N 表示规划方案不满足约束条件的越限个数。

3.2 文化蚁群算法

对于离散优化问题, 常用的求解算法有遗传算法, 粒子群算法, 蚁群算法等。其中, 遗传算法由于对个体采用交叉、变异机制, 使得搜索范围扩大, 然而由于遗传操作针对的个体是种群空间中的普通个体, 因此难以收敛到全局最优。蚁群算法尤其适合运用在图的路径搜索问题上, 然而缺点是其计算开销大。

为了解决上述算法的缺点, 本文将局部搜索引入遗传算法中, 得到一种基于种群全局搜索和基于个体的局部启发式搜索的结合体, 也就是文化基因算法^[19-20], 将文化基因算法的框架引入蚁群算法, 得到文化蚁群算法 MACA, 其基本思想是: 每个智能体(蚂蚁)的文化被定义为优化问题的一个解, 同时, 每个智能体按照信息素矩阵进行寻优, 每只蚂蚁有自己独立的文化。

文化蚁群算法的优化框架如图 7 所示, 主要包括以下三部分(主要因素):

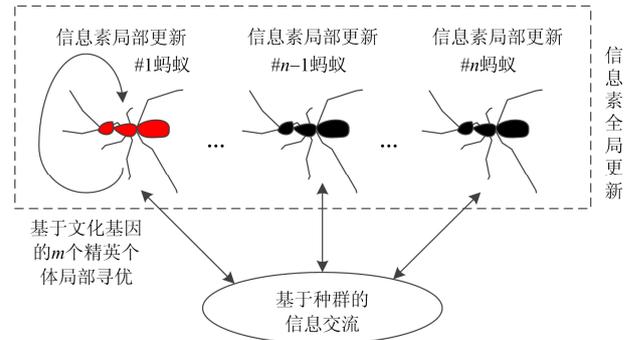


图 7 MACA 优化框架

Fig. 7 Optimization framework of MACA

1) 个体基于信息素矩阵进行路径搜索, 完成搜索后进行局部信息素更新。

2) 所有个体完成路径搜索后, 选出 m 个精英个体, 引入文化基因的框架进行个体与个体之间的相互竞争和协作, 以个体的独立寻优和种群的信息交

流为优化框架, 进一步提升算法的寻优能力。

3) 个体进化完成后, 对全局信息素矩阵进行更新, 个体与种群通过信息素矩阵进行交流合作, 最终使群体协同进化。

3.3 基于 MACA 的配电网网架规划

1) 算法编码与解码: 给规划片区节点进行编号后, 采用待规划负荷节点的定长度整数编码, 为了保证方案负荷辐射状约束, 采用文献[21]中就近选择思想进行解码。以一个带有 2 个变电站的 5 节点系统为例, 染色体 {2,3,5,4,1} 经过解码形成的规划方案如图 8 所示。

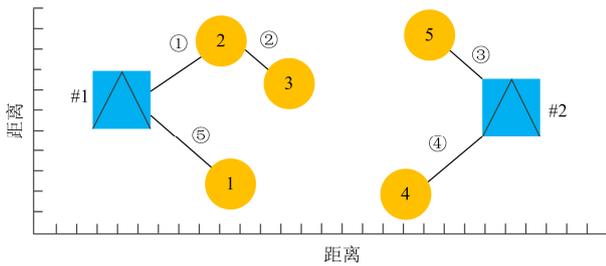


图 8 解码示意图

Fig. 8 Decoding diagram

在解码成单辐射网架后, 再搜索出节点中度为 1 的负荷节点, 联络优先顺序为: ① 基于最短路径法优先将度为 1 的负荷节点进行站间联络; ② 基于最短路径法将度为 1 的负荷节点进行站内联络; ③ 基于最短路径法将度为 1 的负荷节点和电源点进行备用联络。

若为单辐射接线模式, 则直接按就近选择进行解码; 若为单环网接线模式, 则按①②进行联络; 若为两供一备接线模式, 则按①②③进行联络。

2) 初始化种群位置: 为了提高种群的多样性, 将 m 只蚂蚁放置在不同的起点, 若蚂蚁数 m 多于节点数 n , 则先将 n 只蚂蚁放在不同的 n 个节点上, 循环直至所有蚂蚁都放置在某个初始节点。

3) 路径搜索: 基于信息素矩阵和启发式信息的指引, 对路径进行搜索, 局部搜索策略采用禁忌搜索策略, 其中节点访问 s 采用贪婪算法^[22], 如式(10)所示。

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(r)} \{ [A(r, u)]^\alpha \cdot [HE(r, u)]^\beta \}, & q \leq \varepsilon \\ S & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{A_{ij}^\alpha(t) \cdot HE_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} A_{is}^\alpha(t) \cdot HE_{is}^\beta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: q 为 [0,1] 之间的随机数; ε 为贪心策略的比例; 式(10)表示当生成的随机数小于 ε 时选择下一节点按照贪婪策略进行选择, 当生成的随机数大于 ε 时选择下一节点按照式(10)选择。 τ 为信息素矩阵, HE 为启发式矩阵, $HE=1/d_{ij}$, α 、 β 分别为信息素和启发信息的相对重要性, α 越大, 表示随机性作用越强, β 越大, 表示确定性因素作用越强。记录已经访问过的节点到 $Tabu_k$ 矩阵中防止重复访问, 与 $Tabu_k$ 矩阵相对应的矩阵即为 $allowed_k$ 。式(11)表示根据生成的概率集合选择下一节点时, 以轮盘赌算法进行实现。

4) 信息素局部更新: 第 N 代蚂蚁建立路径后, 更新当代蚂蚁的最优路径。对于每一只蚂蚁走过的路径, 更新其信息素矩阵, 信息素更新规则为

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}^k \quad (12)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_{ij}^k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过路径 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ρ 表示挥发系数; Q 表示蚁群算法中的信息素总量; L_{ij}^k 表示蚂蚁 k 经过的 (i, j) 路径长度。

5) 个体协同竞争: 所有个体完成遍历得到 m 组解后, 根据适应度函数 F 对个体进行按顺序进行排列, 选择 m_e 个精英个体, 进行局部搜索, 进行交叉和变异^[23]操作(个体与个体之间相互协作), 若进行遗传操作后的个体优于原先的精英个体, 则将优良的基因传递到下一代; 否则保留遗传操作前的个体(个体与个体之间相互竞争)。区别于遗产算法, 文化基因算法是在筛选出适应性强的优秀代表后, 对其进行遗传操作得到新的个体, 再进行全局进化, 这种局部和全局的混合搜索机制的效率要优于直接在普通个体之间进行搜索。

6) 信息素全局更新: 所有蚂蚁完成遍历后, 种群中信息素基于式(14)和式(15)进行全局更新。

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \gamma) \tau_{ij}(r, s) + \Delta \tau_{ij} \quad (14)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{F_{\text{gbest}}}, & \text{最优个体对应的路径集合} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

式中: γ 表示全局挥发系数; F_{gbest} 表示最优个体路径集合对应的适应度函数。

7) 未满足迭代条件(达到最大迭代代数), 清空禁忌搜索表 $Tabu$, 返回步骤 2)中继续进行寻优迭代。若满足迭代条件, 则输出最优策略。

4 算例分析

依据本文模型算法,对某地区 29 节点(含有 25 个负荷点和 4 个电源点)的 10 kV 中压配电网进行规划^[24]。变电站节点和负荷节点的数据如表 1 所示。节点初始分布如图 9 所示,变电站用蓝色方块表示,负荷节点用黑色节点表示,联络线用红色线表示。

表 1 某地区 29 节点算例数据

Table 1 29-node example data in a region

节点号	x/km	y/km	P/kW	Q/kW	负荷类型
1	0.184	1.602	0	0	—
2	3.272	1.738	0	0	—
3	0.548	0.43	0	0	—
4	3.64	0.474	0	0	—
5	0.48	1.304	180	112	1
6	0.196	1.076	184	114	2
7	1.056	1.026	188	117	5
8	0.524	0.914	172	107	3
9	1.928	1.798	136	84	4
10	1.008	1.586	252	156	4
11	0.664	1.822	180	112	5
12	3.36	0.904	204	99	1
13	2.876	1.808	164	102	5
14	0.916	0.182	160	99	3
15	3.424	1.192	196	122	4
16	2.856	0.182	144	89	3
17	2.488	0.272	172	107	7
18	1.976	1.09	145	120	5
19	2.876	1.56	172	107	5
20	3.112	1.394	292	181	5
21	2.348	0.112	192	119	7
22	2.128	0.334	208	129	1
23	3.3	0.474	136	84	4
24	3.44	1.49	168	104	1
25	2.304	1.556	118	73	1
26	1.172	0.354	68	42	2
27	2.388	0.506	134	83	2
28	2.944	1.196	77	48	4
29	3.616	0.718	68	42	1

4.1 算法对比

为了验证本文提出算法的有效性,将 GA^[25]、PSO^[26]和 MACA 用于求解本文提出的模型,种群数量和收敛迭代次数均设置相同,其他参数根据均衡设计法^[27]调整至最适用于本模型的参数,计算结果如图 10 所示。

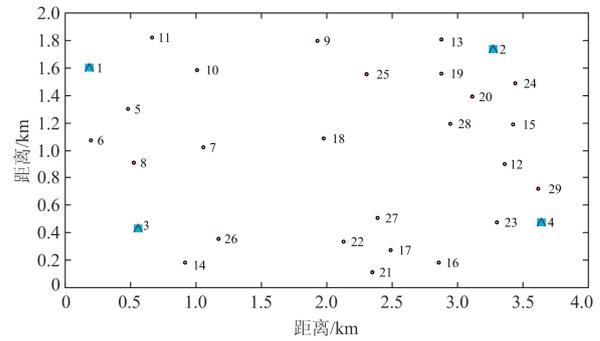


图 9 节点初始分布图

Fig. 9 Initial node distribution diagram

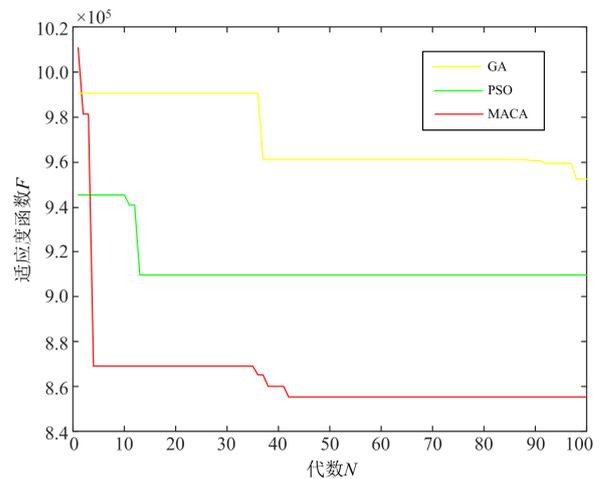


图 10 算法收敛对比图

Fig. 10 Comparison graph of algorithm convergence

从上述收敛图可以看出,采用本文提出的 MACA 在求解本文模型时具备较好的收敛性能,三种算法的收敛结果依次为 9.53×10^5 、 9.09×10^5 、 8.58×10^5 。其中,GA 采用全局搜索策略对空间的探索较为盲目,PSO 更适用于连续型变量的优化,而 MACA 以图中节点的距离为启发式信息,以信息素为全局优化信息,同时加入文化基因算法加强局部搜索能力,可以达到更好的收敛效果,适用于解决图的路径搜索问题。

4.2 不同接线模式方案下对比

为了对比该地区适用的接线模式,本文考虑采用辐射状、单环网、两供一备三种接线模式,其中投资成本、运行成本、可靠性成本取相同的权重。不同接线模式的规划网架如图 11—图 13 所示,投资成本、运行成本和可靠性成本如表 2 所示。

由表 2 可知,在三种接线模式中,由于两供一备接线模式比辐射状接线模式和单环网接线模式投

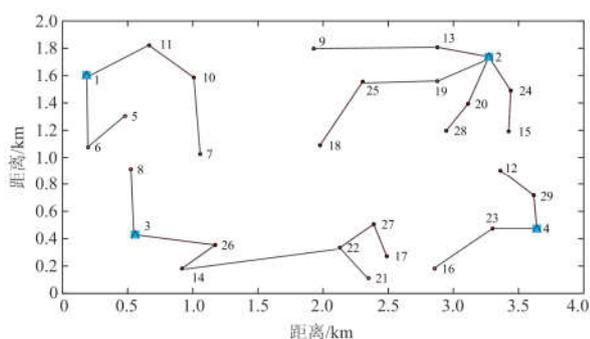


图 11 辐射状接线模式最优网架

Fig. 11 Optimal network structure in radial connection mode

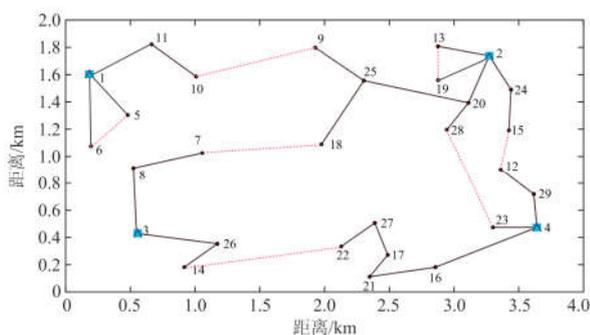


图 12 单环网接线模式网架最优接线图

Fig. 12 Optimal network structure in single ring network connection mode

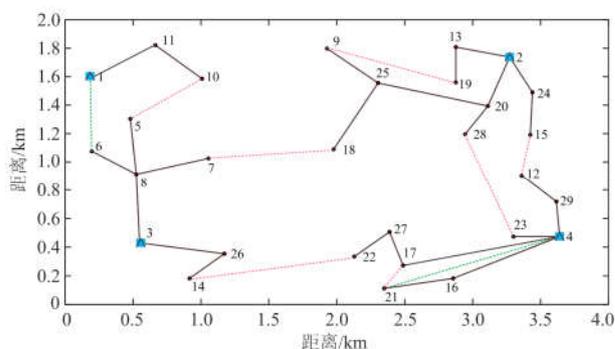


图 13 两供一备接线模式网架最优接线图

Fig. 13 Optimal network structure in two supplies and one backup connection mode

资费有所增加, 网损费用上没有太大变化, 而可靠性成本则大幅降低, 可靠性指标有了明显提升。这是由于选择两供一备接线模式时, 从网架可以看到 6 号节点和 21 号节点(6 号节点和 21 号节点分别属于工业用户和事务所机构类型的负荷, 停电损失费用较高)有备用线与电源相连接, 因此需要采用两供一备能够减少重要负荷的停电时间, 从而提高整个网架的效益。

表 2 不同接线模式计算结果

Table 2 Calculation results of different connection modes

接线模式	F_{inv} /万美元	F_{opc} /万美元	F_{rel} /万美元	SAIDI/(h/户)	SAIFI/(h/户)	CAIDI/(h/户)	ASAI/%
RPS	10.16	5.57	114.87	5.362 0	1.160 1	4.622 0	99.938 8
SRN	16.56	5.92	90.03	2.875	3.05	2.875	99.965 0
TSOB	22.41	5.96	63.16	0.922 4	2.624 8	2.884 4	99.970 2

5 结论

本文将配电网可靠性用解析算法进行准确计算后, 提出了高可靠性多电源配电网规划模型, 并运用 MACA 对模型进行求解, 主要贡献如下:

1) 运用可靠性解析算法准确计算缺供电量 ENS , 结合停电损失函数, 将可靠性转化到目标函数中, 提出一种高可靠性配电网规划模型, 为配电网规划人员进行网架规划设计提供参考和依据。

2) 提出了一种考虑接线模式, 适用于多电源配电网规划方法, 运用就近选择思想的编码方法, 克服了以往多数配电网规划中只考虑单电源进行网架规划的缺点。

3) 针对提出的配电网网架规划模型, 提出了 MACA 进行求解, 求解结果表明 MACA 在求解离散非凸非线性优化问题, 其收敛性能有了明显改善。

本文后续将考虑运用分区算法先对规划片区进行划分, 先优化子分区内的接线, 再优化子分区之间的接线, 建立双层规划模型, 这样便可以在一个规划片区中考虑多种接线模式混合的规划方案。

参考文献

- [1] 肖白, 郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 200-211, 217.
XIAO Bai, GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 200-211, 217.
- [2] HE Ying. Reliability of distribution network components[C] // International Conference & Exhibition on Electricity Distribution, June 8-11, 2009, Prague, Czech Republic.
- [3] MOREIRA J C, MIGUEZ E, VILACHA C, et al. Large-scale network layout optimization for radial distribution

- networks by parallel computing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1946-1951.
- [4] 沈依婷, 武鹏, 张菁, 等. 模糊不确定性负荷下的配电网网架规划方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报:1-7[2019-5-31].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000208>.
SHEN Yiting, WU Peng, ZHANG Jing, et al. Distribution Network Planning Method under Fuzzy Uncertainty Load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA: 1-7[2019-5-31]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000208>.
- [5] NAHMAN J M, PERIC D M. Radial distribution network planning under uncertainty by applying different reliability cost models[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 1-8.
- [6] 刘向军, 马爽, 许刚. 基元接线模型构建的配电网典型接线方式[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 58-63.
LIU Xiangjun, MA Shuang, XU Gang. Formation of typical connection mode for distribution network by elementary connection model[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 58-63.
- [7] 章文俊. 基于接线模式的配电网优化规划[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
ZHANG Wenjun. The optimal planning of power distribution network based on connection mode[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [8] 李响, 白首华, 付金光, 等. 中压配网接线模式的GA-Pareto 优选模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 63-68.
LI Xiang, BAI Shouhua, FU Jinguang, et al. GA-Pareto optimization model of mid-voltage distribution network connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 63-68.
- [9] 张光亚, 赵莉莉, 边小军, 等. 考虑供需互动和分布式电源运行特性的主动配电网网架规划[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 81-87.
ZHANG Guangya, ZHAO Lili, BIAN Xiaojun, et al. Framework planning of active distribution network considering supply and demand interaction & DG operation characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 81-87.
- [10] 牛文娟, 谈健, 李璇, 等. 考虑需求响应的苏州地区典型电网规划研究[J]. 供用电, 2018, 35(4): 32-36, 59.
NIU Wenjuan, TAN Jian, LI Hu, et al. The study on suzhou typical power grid planning considering demand response[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(4): 32-36, 59.
- [11] 徐笑, 李志铿, 杨海森, 等. 主动配电网可靠性规划[J]. 电气自动化, 2018, 40(6): 67-70.
XU Xiao, LI Zhikeng, YANG Haisen, et al. Reliability planning of active distribution networks[J]. Electrical Automation, 2018, 40(6): 67-70.
- [12] BILLINTON R, WANG P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.
- [13] ZHOU J, BILLINTON R, XIE K. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path[J]. IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [14] 尹超雄, 唐武勤, 温灵锋, 等. 台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 138-143.
- [15] 姜明月. 基于可靠性效益最优的配电网网络重构[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
JIANG Mingyue. Network reconfiguration for optimal reliability worth[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [16] 韩俊, 谢珍建, 黄河, 等. 基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 63-68, 117.
HAN Jun, XIE Zhenjian, HUANG He, et al. Unit mesh reliability planning for distribution network based on outage cost calculation and cost analysis[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 63-68, 117.
- [17] 彭建春, 何禹清, 周卓敏, 等. 基于可靠性指标逆流传递和顺流归并的配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 40-46.
PENG Jianchun, HE Yuqing, ZHOU Zhuomin, et al. Distribution system reliability evaluation based on up-stream delivering and down-stream merging of reliability indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 40-46.
- [18] 郭贤, 郭贺, 程浩忠, 等. 考虑用户停电损失的微电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 301-308.
GUO Xian, GUO He, CHENG Haozhong, et al. Optimal architecture planning of microgrid considering user outage costs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 301-308.

- [19] 刘漫丹. 文化基因算法(Memetic Algorithm)研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(11): 1-4, 18.
LIU Mandan. The development of the memetic algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2007, 26(11): 1-4, 18.
- [20] 杨博, 钟林恩, 朱德娜, 等. 部分遮蔽下改进樽海鞘群算法的光伏系统最大功率跟踪[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 339-352.
YANG Bo, ZHONG Lin'en, ZHU Dena, et al. Modified SALP swarm algorithm based maximum power point tracking of power-voltage system under partial shading condition[J]. Control Theory and Application, 2019, 36(3): 339-352.
- [21] 李游, 常鲜戎. 考虑馈线自动布局和联络接线费用的配电网智能规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 30-35.
LI You, CHANG Xianrong. Distribution network intelligent planning considering feeder line automatic layout and tie-line wiring investment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 30-35.
- [22] 于文鹏, 刘东, 翁嘉明. 含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 23-30.
YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 23-30.
- [23] 陈智勇, 刘昊. 基于信息素遗传算法的校园物联网信息多路传输优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(8): 1719-1726.
CHEN Zhiyong, LIU Hao. Multi-channel transmission optimization of campus internet of things based on pheromone genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(8): 1719-1726.
- [24] 徐芮, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 48-55.
XU Rui, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Primary and subordinate distribution network planning considering load clustering partition and DG integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 48-55.
- [25] 王坤, 王蕾, 赵兴亮. 基于 LCC 与模拟退火遗传算法的配电网网架优化研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(增刊 1): 95-100.
WANG Kun, WANG Lei, ZHAO Xingliang. Distribution network structure optimization based on LCC and simulated annealing genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(S1): 95-100.
- [26] 张宪, 苑津莎, 杨薛明, 等. 基于粒子群算法的配电网网架规划[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 14-17.
ZHANG Xian, YUAN Jinsha, YANG Xueming, et al. Distribution network planning based on particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(3): 14-17.
- [27] FANG K T, LIN D K J, WINKER P, et al. Uniform design: theory and application[J]. Technometrics, 2000, 42(3): 237-248.

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-08-12

作者简介:

唐俊熙(1989—), 男, 硕士, 研究方向为配电网规划及可靠性评估。E-mail: tangjunxi89@163.com

(编辑 周金梅)