

文章编号:1000-582X(2011)11-087-07

考虑环网柜接线方式的城市中压配电网规划

颜 伟^{1a,1b}, 李振文^{1a,1b}, 余 娟^{1a,1b}, 赵 霞^{1a,1b}, 赵 理²

(1. 重庆大学 a. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室;

b. 电气工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆市电力公司, 重庆 400014)

摘 要:在全电缆敷设方式下的城市中压配电网中,由环网柜组成的电缆环网应用广泛。合理确定环网中环网柜的位置和数量,可以优化网络结构并减少不必要的主缆开断。为此,结合地理信息,建立了环网柜接线方式下对环网的环网柜的位置和数量,以及与其相关的环网间公共负荷的归属的优化新模型。根据该模型特点选用遗传算法进行求解,并设计了多信息矩阵级联的编码方法和相应的遗传操作。实际算例的仿真分析说明了所提模型和算法的有效性和实用性。

关键词:配电网;规划;环网;环网柜;遗传算法

中图分类号:TM715

文献标志码:A

Urban medium-voltage distribution network planning considering connection mode with ring main unit

YAN Wei^{1a,1b}, LI Zhen-wen^{1a,1b}, YU Juan^{1a,1b}, ZHAO Xia^{1a,1b}, ZHAO Li²

(1a. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology;

1b. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing, 400010, P. R. China)

Abstract: In urban medium-voltage distribution network with whole cable laying, the ring of cables formed by ring main unit (RMU) is widely used. The appropriate position and number of RMU in a ring can improve the network structure and reduce main cable breaking. Therefore, a new model is proposed to optimize the position and number of RMU and the ascription of common load between rings with the consideration of geographic information. According to the characteristics of the new model, genetic algorithm with a multi-information matrix encoding strategy and the corresponding genetic manipulation is presented. The validity and practicality of the proposed model and algorithm is illustrated by the simulation result of an actual example.

Key words: distribution network; planning; ring network; ring main unit; genetic algorithms

配电网是电力系统的重要组成部分,配电网规划是电力系统规划研究中的热点和难点。提高中压配电网规划的技术水平,可以有效指导中压配电网

的建设和改造,提高对用户的供电可靠性。

配电网中电力线路主要有架空线和电缆两种方式。目前,随着“上改下”工程的逐步进行,电力电缆

收稿日期:2011-06-25

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20090191120019);“输配电装备及系统安全与新技术”国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512710204)

作者简介:颜伟(1968-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究,
(E-mail)equyanwei@163.com。

已广泛地应用于城网供电中。电缆线路常见供电方式大致可分为两种：环网柜方案和开闭所方案^[1]。其中，由环网柜构成的电缆环网接线方式灵活，可根据用户发展的需要随时插入环网柜，并可灵活地接入电源，而传统的开闭所建设规模限制，不易扩建^[2]；同时配电自动化的发展也要求供电线路采用环网接线方式^[3]。因此，电缆线路的环网柜接线方案已成为当前中心城市配电网建设的主流方案。这种接线方式通常采用“高压变电站-环网柜-配变”的三级结构，由环网柜负责直接对各个配变进行供电。合理确定其中环网柜的位置和数量，可以优化网络结构，减少未来不必要的主缆开断，是配电网规划需要解决的关键问题^[4]。现有相关研究中，尽管其研究对象是全电缆敷设方式的配电网规划问题，但大都沿用架空线方式下的配电网规划思路，采用“高压变电站-配变”的两级结构^[5-7]，其分支节点已知或为任意产生的 T 节点，没有考虑环网柜的规划，必然影响其规划方案的实用性。

实际的城市中压配电网往往根据高压变电所的布点、负荷密度和一定的原则划分成了若干个相对独立的供区^[8]。因此，规划时首先在已知变电站的分布及其供电范围和负荷性质及其分布的情况下，根据“联络简单，分区明确，供电可靠，容量充足”的原则，将整个电网规划区域划分为多个独立的供区，然后将负荷按照就近供电的原则归属于各个供区，并根据负荷的重要程度和最高供电需求确定各个供区的供电模式。这里的供电模式是指各个供区采用单环网供电或者双环网供电。进一步，考虑到实际地理环境约束，可以利用确定性的方法确定各个供区的主环网走廊^[9-10]。但是，各供区环网主干线上的环网柜位置和数量如何确定，位于多个供区公共边上的负荷归属于哪一个供区，以及如何分配环网柜对负荷进行供电，这些都是无法直观地给出但都需要解决的问题。

数学上，城市中压配电网规划属于大规模组合优化问题，近年来现代启发式方法如遗传算法^[6-7,9,11-13]、蚁群算法^[14]、粒子群算法^[15]大量应用于配电网规划，并取得良好效果，因此采用现代启发式方法可以比较好地求解城市中压配电网规划问题。

笔者以环网柜接线方式为基础，结合实际地理信息，在主环网走廊和供电模式都已经确定的情况下，研究中心城市新开发区的全电缆敷设配电网规划问题，提出了一种在城市中压配电网规划过程中对环网柜的个数、位置以及与其相关环网间公共负荷归属进行优化的新模型。采用遗传算法求解上述规划问题，并针对新模型特点，提出了相应的多信息级联方式的编码方法和遗传操作，以提高算法的计算效率。

1 考虑环网柜接线的城市中压配电网规划新模型

笔者以供电模式和主环网走廊给定的城市中压配电网规划为对象，重点研究环网柜的位置、数量及公共负荷归属的优化问题。如图 1 所示，首先将规划区域划分为供区 1、供区 2 以及它们之间的交叉供区(供区 1、2 间的公共边)，然后各个负荷按照就近的原则归属于各个供区：负荷 4~6 归属于供区 1，负荷 7~10 归属于供区 2；负荷 1~3 位于交叉供区，它们最终归属于供区 1 还是供区 2 是下面要解决的问题。接下来，因为供区 1 中负荷的最高供电需求为双电源供电(如负荷 5~6)，所以供区 1 采用双环网供电模式，而供区 2 中负荷的最高供电需求为单电源供电(如负荷 7~10)，所以供区 2 采用单环网供电模式，但是各个环网中环网柜的位置和数量还需要进一步确定。笔者以网络的年综合费用最小为目标函数，考虑网络和电气约束，建立了对环网柜的数量、位置以及交叉供区负荷的归属进行优化的新模型，下面对此模型进行详细阐述。

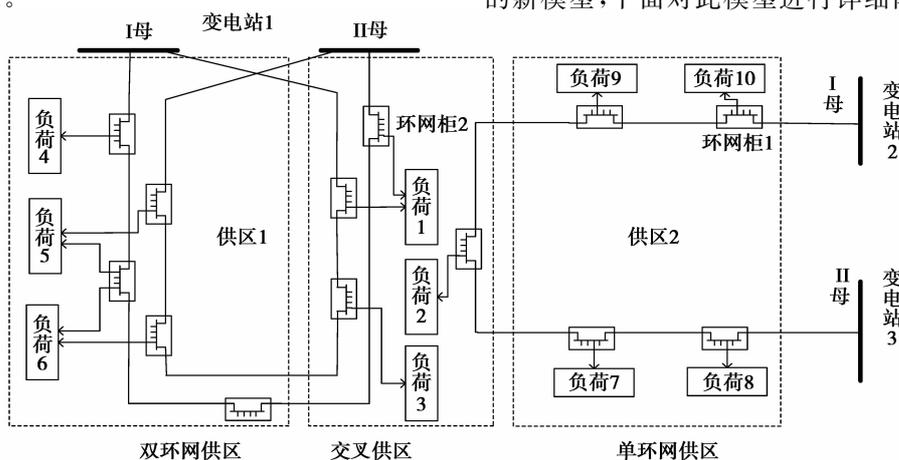


图 1 供区和供电模式

1.1 目标函数

本模型以网络的年综合费用最小为目标函数:

$$\min F = \frac{r_1 \cdot (1+r_1)^{t_1}}{[(1+r_1)^{t_1}-1]} C_{\text{RMU}} N_{\text{RMU}} + \frac{r_2 \cdot (1+r_2)^{t_2}}{[(1+r_2)^{t_2}-1]} \left[\sum_{i=1}^M f_{D_i} \cdot L_i + \sum_{j=1}^N C_{\text{CL}_j} \cdot L_{\text{CL}_j} \right] + \sum_{k=1}^{N_L} \alpha \cdot \Delta P_k \cdot \tau, \quad (1)$$

式中:第 1 项为环网柜投资及安装费用;第 2 项为电缆投资费用;第 3 项为线路走廊土建费用;第 4 项为网损费用,其中, r_1 、 r_2 分别为环网柜和电缆的投资收益率,%; t_1 、 t_2 分别为环网柜和电缆的经济使用年限(年); C_{RMU} 、 N_{RMU} 分别为环网柜的单位投资及安装费用(万元/个)和数量; M 为电缆线径的种类数; f_{D_i} 为线径为 D_i 的电缆单位长度造价,万元/km; L_i 为线径为 D_i 的电缆总长度,km; N 为电缆敷设方式的种类; C_{CL_j} 、 L_{CL_j} 分别为第 j 种敷设方式的单位长度土建费用(万元/km)和路段总长度(km); α 为电价,万元/(kW·h); N_L 为供电线路条数; ΔP_k 为第 k 条供电线路的有功损耗,MW; τ 为年最大负荷损耗小时数,h。

1.2 约束条件

本模型考虑的约束条件分为网络约束和电气约束,下面对其分别介绍。

1) 网络约束。

① 环网结构,开环运行:规划时要考虑结构上的环状约束,运行时要满足辐射状约束。

② 环网柜出线回数约束

$$N_{R_i} \leq N_{R_{i\max}} - N_i, i = 1, 2, \dots, N_{\text{RMU}}, \quad (2)$$

式中: N_{R_i} 为第 i 个环网柜的实际出线回数; $N_{R_{i\max}}$ 为第 i 个环网柜的总出线回数; N_i 为第 i 个环网柜需要预留的出线回数。

③ 环网中所有环网柜允许出线回数总和约束

$$2N_{\text{DL}_j} + N_{\text{SL}_j} \leq \sum_{i=1}^{M_{R_j}} (N_{R_{i\max}} - N_i), j = 1, 2, \dots, N_P, \quad (3)$$

式中: N_{DL_j} 、 N_{SL_j} 分别为第 j 个环网所带负荷中双电源负荷和单电源负荷的数量; M_{R_j} 为第 j 个环网中环网柜的个数; N_P 为环网的数量。

2) 电气约束。

① 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), i = 1, 2, \dots, n, \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}), i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_i 、 Q_i 为节点 i 的注入有功和无功功率; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 、 j 的相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 i 行第 j 列的元素的实部和虚部; n 为节点总数。

② 节点电压约束

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max}, j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

式中: $U_{j\min}$ 、 $U_{j\max}$ 分别为节点 j 电压幅值的下限值和上限值。

③ 环网柜容量约束

$$\sum_{j=1}^{N_{F_i}} S_{F_j} \leq S_R, i = 1, 2, \dots, N_{\text{RMU}}, \quad (6)$$

式中: N_{F_i} 为第 i 个环网柜的实际出线回数; S_{F_j} 为其中第 j 条出线上实际所带的负荷容量总和; S_R 为单个环网柜允许带的负荷容量。

④ 环网中所有环网柜允许带的负荷容量总和约束

$$S_j \leq M_{R_j} S_R, j = 1, 2, \dots, N_P, \quad (7)$$

式中: M_{R_j} 为第 j 个环网的环网柜个数。

⑤ 环网容量约束:当环网发生故障时,可以通过倒闸操作恢复供电,此时环网由仅某一端电源供电,且要满足所有负荷供电,因此需要保证电源侧环网柜进线容量能够满足环网所有负荷的供电。

$$S_j \leq S_{j\max}, j = 1, 2, \dots, N_P, \quad (8)$$

式中: S_j 为第 j 个环网实际带的负荷容量总和; $S_{j\max}$ 为第 j 个环网受电源侧环网柜进线容量限制允许带负荷的最大容量。

由于所建优化模型式(1)-(8)是一个离散的非线性优化问题,下面将针对模型的特点设计相应的遗传算法来进行模型的求解。

2 考虑环网柜接线的城市中压配电网规划的遗传算法

针对本文模型特点,笔者设计如下遗传算法进行求解。

2.1 利用启发式规则确定环网柜待选位置

考虑到实际工程中每盘电缆长度要受运输条件的限制,不可能无限长,并且为减少电缆故障,一般是尽量整根使用,因此本文采用如下启发式规则确定环网柜的待选位置:

$$\begin{cases} L=l & \text{对单环网} \\ L=\frac{l}{2} & \text{对双环网} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: L 为单环网或双环网相邻两个环网柜待选位置之间沿环网走廊的距离; l 为每盘电缆的长度。从电源出发,沿环网走廊,每间隔 L 处设一个环网柜待

选位置,由此得到整个规划区域的环网柜待选位置的数量为 N_R 。

2.2 多信息矩阵级联编码

笔者采用3个信息矩阵级联的方式进行染色体编码,即环网柜待选位置信息矩阵 \mathbf{X} 、交叉供区环网柜待选位置的归属信息矩阵 \mathbf{E} 和交叉供区负荷的归属信息矩阵 \mathbf{F} 3个部分。

第1部分为环网柜待选位置信息矩阵 \mathbf{X} ,采用0-1编码,其中 $x_k (k=1,2,\dots,N_R)$ 对应第 k 个环网柜待选位置, $x_k=1$ 表示安装环网柜, $x_k=0$ 表示不安装,则编码结构如下:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_k & \cdots & x_{N_R} \end{bmatrix}$$

第2部分为交叉供区环网柜待选位置的归属信息矩阵 \mathbf{E} ,采用整数编码,其中每一位与 \mathbf{X} 中位于交叉供区的环网待选位置一一对应,用于确定后者的归属信息。假设位于交叉供区的环网柜待选位置数量为 N_{R0} ,其中第 $k (k=1,2,\dots,N_{R0})$ 个环网柜待选位置所在的供区集合为 Ω_k ,对应的基因位为 $e_k, e_k \in \Omega_k$,则编码结构如下:

$$\begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & \cdots & e_k & \cdots & e_{N_{R0}} \end{bmatrix}$$

第3部分为交叉供区负荷的归属信息矩阵 \mathbf{F} ,也采用整数编码。假设位于交叉供区的负荷数量为 N_{D0} ,其中第 $k (k=1,2,3,\dots,N_{D0})$ 个负荷所在的供区集合为 Φ_k ,对应的基因位为 $f_k, f_k \in \Phi_k$,则编码段结构如下:

$$\begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \cdots & f_k & \cdots & f_{N_{D0}} \end{bmatrix}$$

通过以上编码方式,就可以完全描述各个环网的环网柜的位置和数量,以及各个环网的负荷信息。

2.3 种群初始化

因为交叉供区的环网柜待选位置和公共负荷的归属会影响到各个供区可选的环网柜位置以及需要的环网柜个数,所以首先对交叉环网供区待选位置和公共负荷的归属进行初始化,对 $e_k (k=1,2,\dots,N_{R0}), f_k (k=1,2,\dots,N_{D0})$ 分别从对应的 Ω_k, Φ_k 中随机挑出一个元素作为其初始值,然后依据式(3)和式(7),取

$$\begin{cases} M_{R_{\min}} = \max \left\{ \frac{2N_{DLi} + N_{SLi}}{N_{R_{\max}} - N}, \frac{S_i}{S_R} \right\}, i = 1, 2, \dots, N_a, \\ M_{R_{\max}} = \eta M_{R_{\min}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $M_{R_{\min}}, M_{R_{\max}}$ 分别为第 i 个供区需要的环网数量的下限和上限; $N_{R_{\max}}, N$ 分别为环网柜总出线数和需要预留回线数的平均值; N_a 为供区的数量; η

为考虑一定裕量的乘系数。对每个供区从对应的 $[M_{R_{\min}}, M_{R_{\max}}]$ 内随机产生一个整数 M 作为该供区的初始环网柜个数,完成环网柜编码段的初始化。

2.4 适应度计算

首先为每个负荷搜索为其供电的环网柜,笔者采用的方法是将第 $i (i=1,2,\dots,N_a)$ 个供区所带的所有负荷按容量从大到小进行排序,然后依次让每个负荷沿该供区的环网主干线向两侧进行环网柜搜索,搜索到最近的且满足出线回数约束式(2)和容量约束式(6)的环网柜接入,作为其供电环网柜。至此网络结构完全确定下来,可以计算环网柜的投资及安装费用(其中环网柜总数 $N_{RMU} = \sum_{k=1}^{N_R} x_k$),电缆的投资和土建费用。然后在环网的接近中间位置处开断,计算网损费用,依据(1)式得到对应的等年值费用 F 。

当个体的网架规划方案不满足节点电压安全约束式(5)时,本文采用惩罚函数 F_p 来处理:

$$F_p = \lambda \times N_v, \quad (11)$$

式中: λ 为惩罚因子; N_v 为电压越限的节点数。

最后采用如下方式计算个体的适应度:

$$f = C_{\max} - (F + F_p), \quad (12)$$

式中: C_{\max} 是一个与群体规模无关的较大的常数。

2.5 遗传操作

1)选择:依据式(11)和式(12)获得各个个体的适应度之后,采用基于轮盘赌法的非线性排名选择,同时为了避免最优个体被淘汰,还采用了最优个体保持策略^[16]。

2)交叉:因为染色体采用3个相对独立的矩阵级联的方式,所以交叉操作时对应的3个信息矩阵分别进行均匀交叉^[16]。交叉过后得到的两个子代中各个环网的环网柜个数可能越限因而需要进行染色体修补,假设第 i 个供区的环网柜数量越限,修补方式为:

第1步,根据式(10)计算得到 $[M_{R_{\min}}, M_{R_{\max}}]$;

第2步,由信息矩阵 \mathbf{X} 计算第 i 个供区的环网柜个数 M_{Ri} ;

第3步,在 $[M_{R_{\min}}, M_{R_{\max}}]$ 内产生一个随机整数 M ,若 $M_{Ri} > M_{R_{\max}}$,则从属于第 i 个供区的环网柜中随机剔除 $M_{Ri} - M$ 个环网柜,若 $M_{Ri} < M_{R_{\min}}$ 则随机添加 $M - M_{Ri}$ 个环网柜。

3)变异:对染色体的3个信息矩阵分别采用单点变异方式^[16]。

2.6 群体更新

为了保证个体的多样性,改善早熟现象,借用免

疫遗传算法的思想,计算相似度并采用基于染色体浓度的群体更新^[17]。

2.7 搜索终止条件

以达到最大迭代次数或最优个体保持代数作为搜索终止条件,如果不满足搜索终止条件,返回 4),继续搜索。

3 应用实例

图 3 为某新开发区的地理信息示意图,该区域面积约为 36 km²,共 2 座变电站,容量分别为

180MVA 和 80MVA,电压等级 110/10 kV,72 回 10 kV 出线间隔,43 个负荷点,报装容量总和为 118.2 MVA,图 3 中的数字表示街道交叉点、负荷点和变电站的节点编号。将整个规划区划分为 3 个供区,负荷就近归属于各个供区,并确定各供区的供电模式和环网的主干线走廊如图 3 所示。其中负荷 11、12、13、21 位于交叉供区,供区 1~3 都采用双环网供电模式。环网柜和电缆的参数分别见表 1~2,电缆敷设方式的选择及相应的敷设费用见表 3,其他规划参数见表 4。

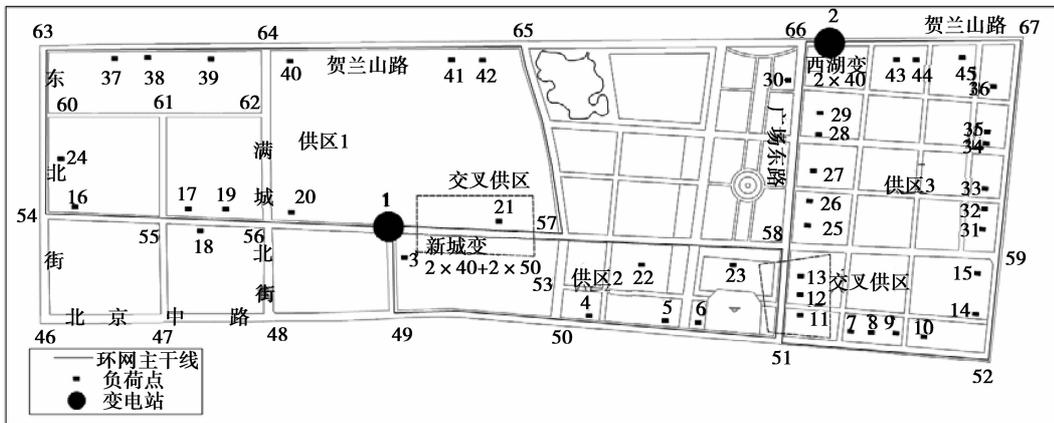


图 3 某新开发区地理信息示意图

表 1 环网柜参数

进线数/回	出线数/回	预留出线数/回	额定电压/kV
2	4	1	10
进线	出线	投资及安装	经济使用
容量/A	容量/A	费用/(万元/台)	年限/年
400	200	40	10

表 2 电缆参数

型号	每盘长度/m	阻抗参数/(Ω·km ⁻¹)
YJLV22-3×300	300	0.063+j0.382
投资费用	经济使用	
/(万元·km ⁻¹)	年限/年	
27	20	

表 3 电缆敷设方式的选择和相关土建费用

型号	最少回路数	最大回路数	造价/(元·m ⁻¹)
1.2m×1.4m 钢混沟	16	20	3 000
1.0m×1.2m 素混沟	8	16	1 800
8 回管井	8	8	1 600
7 回管井	7	7	1 530
6 回管井	6	6	1 450
5 回管井	5	5	1 370

续表

型号	最少回路数	最大回路数	造价/(元·m ⁻¹)
4 回管井	4	4	1 080
3 回管井	3	3	960
2 回管井	2	2	760
1 回管井	1	1	680

表 4 其他规划参数

投资	平均电价	负荷功率	负荷	年最大负
收益率/%	/(元·km ⁻¹ ·h ⁻¹)	因数	同时率	荷损耗/h
10	0.5	0.85	0.49	3 500

采用 MATLAB 语言编写算法程序,对实际算例系统进行仿真计算,算法参数见表 5,得到的优化规划方案见图 4,交叉供区的负荷归属见表 6,规划方案的费用见表 7。

表 5 算法参数

种群规模	交叉率	变异率	最大进化代数	最优个体保持代数
30	0.85	0.05	100	5
群体相似度阈值	η	λ	C_{max}	
0.375	1.15	1 000	15 000	

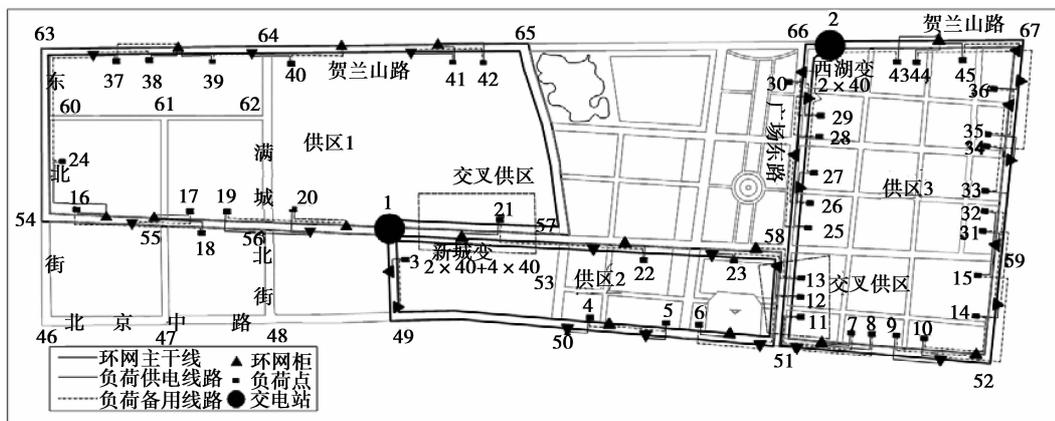


图4 优化规划方案

表6 交叉供区负荷归属

负荷节点编号	11	12	13	21
归属供区	3	2	2	2

表7 规划方案费用 万元

项目	电缆电 气投资	敷设 费用	环网柜 投资	网损 费用	年综 合费用	总投资
优化 方案	2 058.3	2 786.3	1 560	28.748	851.68	6 404.6

由表6可知,优化过后负荷12、13、21归属于供区2,负荷11归属于供区3。从表7可以发现,环网柜投资占总投资的比例高达24.4%,因而对环网柜的位置和数量、交叉供区负荷的归属进行优化,均衡环网柜投资与电缆投资费用、敷设费用、线损费用是很有必要的,可以优化网络结构和节省一定数量的投资,在保证负荷安全供电的前提下提高规划方案的经济性。

总体上,笔者所采用的优化模型,考虑了实际工程中广泛使用的环网柜接线方式,接近工程实用可以使规划方案满足各种电气和网络约束,同时尽量减少主缆开断并节省一定数量的投资,现已成功应用于银川市新开发区的配网规划中。

4 结 语

笔者从实际工程的角度提出了一种考虑环网柜接线的城市中压配电网规划新模型,对作为负荷转供点的环网柜的位置和数量以及环网间公共负荷的归属进行优化,可以在满足负荷可靠供电和规划原

则的前提下优化网络结构并尽量减少主缆开断。对于模型的求解,笔者根据模型的特点设计了相应的遗传算法,最终得到的优化规划方案接近工程实际应用,实用性强。算例结果表明了所提模型和算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 刘东,盛珑. 配电自动化实用模式[J]. 电力系统自动化, 2001,25(5):40-44.
LIU DONG, SHENG LONG. Some practical scheme of distribution automation [J]. Automation of Electric Power System, 2001,25(5):40-44.
- [2] 但刚,赵云龙. 城市中压配电网接线方式及配电自动化探讨[J]. 华北电力技术,2007(1):18-21.
DAN GANG, ZHAO YUN-LONG. Study on connection modes of urban middle voltage distribution network and distribution Automation [J]. North China Electric Power, 2007(1):18-21.
- [3] 张建功,杨子强,王建彬,等. 配电自动化实用模式探讨[J]. 电网技术,2003,27(1):80-87.
ZHANG JIAN-GONG, YANG ZI-QIANG, WANG JIAN-BIN, et al. Research on several practical modes of distribution automation [J]. Power System Technology, 2003, 27(1):80-87.
- [4] 黄煜珊. 揭阳市区配电网电缆化改造带来的问题及对策[J]. 电网技术,2008,32(增刊2):317-318.
HUANG YU-SHAN. Problems and countermeasures of Jieyang urban distribution network reconstruction using underground cable lines [J]. Power System Technology, 2008, 32(supplement 2):317-318.
- [5] RAMIREZ-ROSADO I J, DOMÍNGUEZ-NAVARRO J

- A. New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems[J]. *Power Systems*, 2006, 21(1): 224-233.
- [6] MENDOZA F, BERNAL-AGUSTIN J L, DOMÍNGUEZ-NAVARRO J A, et al. NSGA and SPEA applied to multiobjective design of power distribution systems [J]. *Power Systems*, 2006, 21(4):1938-1945.
- [7] 孔涛,程浩忠,许童羽. 基于组件式 GIS 网络分析与多目标遗传算法的城市中压配电网规划[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(19): 49-55.
- KONG TAO, CHENG HAO-ZHONG, XU TONG-YU. Urban medium-voltage distribution network planning based on ComGIS network analysis and multi-objective genetic algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(19): 49-55.
- [8] DL/T 599-1996 城市中低压配电网改造技术导则[S]. 北京:中国电力出版社, 1996.
- [9] 朱涛,肖峻,王成山. 计及通道因素的城市中压配电网规划[J]. *继电器*, 2007, 35(13): 33-38.
- ZHU TAO, XIAO JUN, WANG CHENG-SHAN. Planning of urban mid-voltage distribution network considering cable trench [J]. *Relay*, 2007, 35(13): 33-38.
- [10] 于德龙,刘子俊,胡少强. 基于地理信息的配电网智能布线算法[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会, 2006.
- [11] RAMÍREZ-ROSADO I J, BERNAL-AGUSTÍN J L. Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems [J]. *Power Systems*, 1998, 13(2): 696-703.
- [12] SKOK M, SKRLEC D, KRAJCAR S. Genetic Algorithm and GIS Enhanced Long Term Planning of Large Link Structured Distribution Systems [C]// *Proceedings of IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, June 26-28, 2002, Halifax, Nova Scotia, Canada: LESCOPE '02 Secretariat, 2002, 55-60.
- [13] BLAGAJAC S, FILIPEC M, KRAJCAR S, et al. CADDIN = DATA + GIS + GA [C]// *Proceedings of the 9th Mediterranean Electrotechnical Conference*, Tel-Aviv, Israel: IEEE Press, 1998, 2: 1117-1121.
- [14] GOMEZ J F, KHODR H M, DE OLIVEIRA P M, et al. Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits [J]. *Power Systems*, 2004, 19(2): 996-1004.
- [15] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems using particle swarm optimization [C]// *Proceedings of International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, Sharjah: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [16] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [17] JIAO L C, WANG L. A novel genetic algorithm based on immunity Systems [J]. *Man and Cybernetics (Part A: Systems and Humans)*, 2000, 30(5): 552-561.

(编辑 王维朗)