

基于增量最短路径法的全电缆中压配电网规划

顾丹珍,戴海锋,曾 健

(上海电力学院 电气工程学院,上海 200090)

摘要: 电缆化供电是城市中压配电网供电的发展趋势。提出一种实用的基于增量最短路径法的全电缆中压配电网主干网架规划方法,考虑了电缆通道约束以及城市规划约束,将全网整体优化分解为电源供电分区的电缆线路规划和分区间线路联络规划两部分,利用增量最短路径法规划电源供电分区的电缆供电线路,应用最佳匹配算法完成分区间线路联络。通过一实际算例验证了所提方法可应用于全电缆中压配电网的网络新建规划和扩展规划。

关键词: 全电缆中压配电网;增量最短路径法;最佳匹配算法;电缆通道约束;城市规划;网络规划

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.005

0 引言

配电网电缆供电具有美化城市环境、优化网架结构、提升供电安全可靠性的优点,因此提升配电网电缆化水平是城市配电网建设改造的重要内容^[1]。规划设计中,电缆线路路径应按照城市规划统一安排;电缆的敷设方式应根据电压等级、最终数量、施工条件及初期投资等因素确定^[2]。上述2点说明将地理环境因素引入配电网规划,考虑线路走廊和城市规划成果对网架规划的影响,能够从整体上提升方案的实用价值。

国内外学者对配电网网架规划进行了大量的研究^[3-4]。文献[5]将地理信息系统(GIS)和配电网规划相结合,开发GIS空间数据库辅助配电网路径规划。文献[6]在目标函数中加入了与电缆敷设方式相关的走廊土建费用,在约束中考虑了不同敷设方式中电缆回数的限制,但仅考虑了不同走廊类型的土建费用,没有考虑不同类型道路开挖费用的不同,且忽略了与城市规划的通道约束。

中压配电网规划是一个复杂的带约束的组合优化问题,当考虑通道约束条件时,通道约束随电缆敷设情况变化,常用求解方法有启发式算法、数学规划算法和随机优化算法^[7]。随机优化算法包括遗传算法^[8]、粒子群优化算法^[6]、蚁群算法^[9]等,其特点是对问题的复杂性没有要求,全局寻优能力强,但通道约束条件给编码或进化策略的设计造成困难,计算过程中可能会产生大量的不可行解,造成计算速度慢且求解结果不理想。数学规划类方法理论上存在最优解,但存在维数灾问题,实际应用中常用于规划子问题的求解,如最短路径法^[10-11]。文献[10]采用循环最短路生成树法规划电缆沟道路径,并将结果

作为约束条件用于配电网的后续规划。文献[11]提出两层改进的遗传算法与一层最短路径算法相互嵌套的新算法,能够逐渐地从不同范围的局部最优解扩展到全局最优解。此类方法的关键是边权的计算,边权值是通道条件的函数,随规划结果的变化而变化,上述文献中均未涉及此问题。

中压全电缆配电网实行变电站-开关站/环网柜-配变的三级供电结构^[12]。在开关柜/环网柜的位置已确定、供电模式为单环网或双环网的前提下,根据中压配电网“闭环设计、开环运行”的特点,将变电站-开关站/环网柜构成的中压配电主干网络的规划分解为电源供电分区划分、分区电缆供电路径规划和区间供电路径联络3个步骤。本文在已知待规划地区的道路、开关站位置、变电站位置和容量、供电模式、电源供电分区的条件下,提出采用增量最短路径法规划电源供电分区内的电缆路径,通过动态修正备选路径的权值,考虑道路环境、城市规划的约束;然后利用最佳匹配方法计算区间供电路径的联络,从而完成全电缆中压配电网的网架规划。

本文中的“通道”是指划分的道路段,若其下面可走电缆时,也可称为电缆通道;“支路”指的是从电源出发的电缆供电线路;“供电路径”是指从电源点到负荷点串联而成的供电线路。

1 考虑环境约束的中压配电网规划模型

1.1 目标函数

以年综合投资费用最小作为规划目标,如式(1)所示。

$$\min W = W_{\text{fix}} + W_{\text{op}} \quad (1)$$

其中, W_{fix} 为年建设费用; W_{op} 为年运行费用。

采用“现值转年法”将总的建设费用折算成平均分布在每年内的建设费用,包括电缆投资费用和电缆走廊的土建费用。总的建设费用可用路径的通

收稿日期:2018-05-04;修回日期:2018-12-15

基金项目:上海市地方能力建设基金资助项目(16020500900)

Project supported by Shanghai Local Capacity Construction Fund (16020500900)

道建设费和电缆投资的总和表示,也可以电源供电分区为单位,表示为分区建设费用和区间联络的建设费用之和,即相应区域的通道建设费和电缆投资费用之和,如式(2)所示。

$$W_{\text{fix}} = \omega \sum_{i \in D_i} \left(C_{D_i} + \sum_{k \in D_{i,k}} C_{C_{i,k}} \right) L_i = \sum_{m_{\text{zone}} \in Z_{\text{zone}}} W_{\text{fix}, m_{\text{zone}}} + \sum_{n_{\text{conn}} \in C_{\text{conn}}} W_{\text{fix}, n_{\text{conn}}} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1}$$

其中, ω 为等年值系数; r_0 为电力工业的投资收益率; n 为电气设备的经济使用年限; D_i 为有电缆通过的通道集合; L_i 为每段通道的长度; C_{D_i} 为电缆通道单位长度的造价,考虑通道类型(直埋、排管、电缆沟、电缆隧道等)、道路环境(中心城区、城市新区等)、道路状况(柏油路面、水泥路面、沙石路面等)等因素; $C_{C_{i,k}}$ 为通道 i 内电缆 k 的单位长度造价; $D_{i,k}$ 为通道 i 内的电缆集合; Z_{zone} 为供电分区集合; $W_{\text{fix}, m_{\text{zone}}}$ 为电源供电分区 m_{zone} 的建设费用; C_{conn} 为区间联络的集合; $W_{\text{fix}, n_{\text{conn}}}$ 为区间联络集合内联络通道 n_{conn} 的建设费用。

年运行费用 W_{op} 包括网损费用和电缆的运行维护成本,本文中仅考虑运行中线损产生的电费损失。线损产生的年度电费损失等于所有供电线路上的有功损耗、电价、年最大负荷利用小时数的乘积,也可表示为各电源供电分区的年度损耗电费之和,如式(3)所示。

$$W_{\text{op}} = \lambda \left(\sum_{i \in D_i} \sum_{k \in D_{i,k}} \Delta P_{ik} \right) \tau_{\text{max}} = \sum_{m_{\text{zone}} \in Z_{\text{zone}}} W_{\text{op}, m_{\text{zone}}} \quad (3)$$

$$\Delta P_{ik} = \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{U_k^2} \rho_{ik} L_i$$

其中, $W_{\text{op}, m_{\text{zone}}}$ 为电源供电分区 m_{zone} 的线损费用总和; λ 为综合电价; ΔP_{ik} 为通过通道 i 支路 k 的有功损耗; P_{ik} 为通过通道 i 支路 k 的有功功率; U_k 为支路 k 的端电压,本文中取为平均额定电压; ρ_{ik} 为所选电缆的单位电阻值; τ_{max} 为年最大利用小时数。取线路的功率因数为 0.9,则通过通道 i 支路 k 的有功损耗为:

$$\Delta P_{ik} = \frac{1.234}{U_k^2} 6P_{ik}^2 \rho_{ik} L_i \quad (4)$$

1.2 约束条件

考虑环境条件后,电缆通道需满足网络约束、路网约束和电气约束。

(1) 网络约束。城市电缆中压配电网的连通性要求及闭式接线开环运行的网络接线运行模式。

(2) 路网约束。规划的电缆通道必须和规划区路网的规划相协调,服从地下管线布置的总体规则,

以及不同敷设方式对道路和电缆回路数的要求。

常见的电缆敷设方式包括直埋、排管、电缆沟和电缆隧道,由于直埋敷设的维护不方便,所以本文暂不考虑该敷设方式。根据路网规划成果及道路的实际情况,按道路可以采用的电缆敷设方式将规划区内的道路进行分级,共分为 5 级,如表 1 所示。表中,“ \checkmark ”表示某等级线路适合某种敷设方式,“ \times ”表示某等级线路不适合某种敷设方式。由表 1 可知,等级为 5 的道路不能敷设电缆,等级为 1 的道路适合各种电缆敷设方式。

表 1 电缆敷设方式与道路分级

Table 1 Cable laying methods and road classifications

| 敷设方式 | 道路等级 | | | | | 通道可敷设最大回路数 |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 排管敷设 | \checkmark | \checkmark | \checkmark | \times | \times | 8,12 |
| 电缆沟 | \checkmark | \checkmark | \times | \checkmark | \times | 24 |
| 电缆隧道 | \checkmark | \times | \times | \times | \times | 32 |

(3) 电气约束。电气约束包括电缆通流能力、线路电压降落、变电站出线回路数、接线模式约束等。

a. 电缆通流能力约束。流经通道 i 中支路 k 的有功功率 P_{ik} 小于线路通流限值,即:

$$P_{ik} \leq P_{ik\text{lim}} \quad i \in D_i, k \in D_{i,k} \quad (5)$$

其中, $P_{ik\text{lim}}$ 为线路通流限值。

b. 变电站出线数目约束。每座变电站的出线数目 m_b 小于等于变电站允许的出线数目限值 m_{blim} , 即:

$$0 \leq m_b \leq m_{\text{blim}} \quad (6)$$

c. 线路电压降落约束。每条供电线路 k 满足 $\Delta U_k \% \leq \Delta U_{\text{max}} \%$, 其中 $\Delta U_k \% \approx \frac{P_k R_k}{U_N^2} \times 100$ (U_N 为额定电压, P_k 为线路 k 的有功功率, R_k 为线路 k 的电阻), 取 $\Delta U_{\text{max}} \% = 5$ 。

d. 接线模式约束。根据规划区供电区域的负荷密度和负荷性质,确定典型供电模式。

2 基于增量最短路径法的分区电缆路径规划

在已知待规划地区的道路、负荷块、变电站、供电模式的条件下,利用最短路径法求取负荷、变电站间的距离,先按最短距离初步确定负荷所归属的供电变电站,再根据变电站的供电能力、规划区的实际情况进行专家手工调整,划分每座变电站的供电分区。

2.1 负荷接入顺序确定

在进行分区电缆供电路径规划时,考虑如下 2 点实际情况:①电缆通道的确定必须和城市地下空间的综合利用相结合进行统筹考虑,可敷设电缆的城市地下综合通道可看作是预选择路径;②重要新

增负荷点的选址考虑了通道的待选方案,即这类负荷节点的位置靠近某条待完善支路,在选择中可以作为路径的已接入节点。因此,分区中的主要路径及负荷接入在规划时已确定,待分配的负荷节点都不具备明确的接入倾向性,可完全按优化目标的结果安排。

当利用最短路径法形成分区供电路径集时,负荷的接入顺序和路径的优化顺序将影响最终的结果。负荷接入路径后的费用包括固定投资和运行费用,前者仅与距离有关,与负荷大小无关;后者与负荷大小及距离均相关。可见,负荷的接入顺序主要影响运行费用,因此,本文引入负荷排序因子,如式(7)所示。

$$\gamma_i = D_{\text{dis}i} P_{\text{Load},i}^2 \quad i=1,2,\dots,M \quad (7)$$

其中, $D_{\text{dis}i}$ 为以电缆长度为权值计算得到的负荷节点 i 到电源点的最短距离; $P_{\text{Load},i}$ 为负荷节点 i 的功率; M 为待分配负荷节点数。 γ_i 正比于负荷节点的最小运行费用,将待分配负荷节点按 γ_i 的大小排序,优先安排 γ_i 大的节点,有利于降低总体运行费用。

保证分区内各供电路径生成机会均等有利于获得总体优化结果。因此,分区内的电缆路径簇是以电源为源节点的供电路径集合,以最短路径为每个负荷点接入时的优化目标,利用增量最短路径法求解。

2.2 负荷接入及分区供电路径形成步骤

设分区可规划电缆支路 N 条,供电路径集记为 $P_{\text{path}} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$,分区内有 M 个待分配负荷节点,按负荷排序因子从大到小排序后记为 $B = \{b_{\text{load},1}, b_{\text{load},2}, \dots, b_{\text{load},M}\}$,基于增量最短路径法的分区负荷接入及供电路径形成步骤如图 1 所示。图中, ΔD_{opt} 为负荷 $b_{\text{load},m}$ 接入时的增量最短距离; P_{pathopt} 为对应的供电路径集; $\Delta D_{m,jl}$ 为负荷 $b_{\text{load},m}$ 接入时供电路径 p_j 上节点 $b_{\text{load},l}$ 的增量最短距离; $p_{j,\text{new}}$ 为对应的供电路径。最后形成的分区优化结果为新的供电路径集 $P_{\text{path}} = P_{\text{pathopt}}$ 。

2.3 增量权值的计算

供电路径 p_j 可表示为从电源节点开始的支路集合,支路编号用 k 表示。在增量最短路径法中,负荷接入供电路径 p_j 的权值仅计算在原有网络基础上的增量,即对于供电路径 p_j ,各通道 i 有:

$$\begin{aligned} \Delta W_i &= \Delta W_{\text{fix},i} + \Delta W_{\text{op},i} = \\ & (\Delta W_{\text{fix},D,i} + \Delta W_{\text{fix},C,i}) + \Delta W_{\text{op},i} \quad (8) \\ \Delta W_{\text{fix},i} &= \begin{cases} \omega [(C'_{\text{fix},D,i} - C_{\text{fix},D,i}) + C_{\text{fix},C,ik}] L_i & \text{通道 } i \text{ 不在供电路径上} \\ 0 & \text{通道 } i \text{ 在供电路径上} \end{cases} \\ \Delta W_{\text{op},i} &= \lambda \Delta P_{i,z} \tau_{\text{max}} \end{aligned}$$

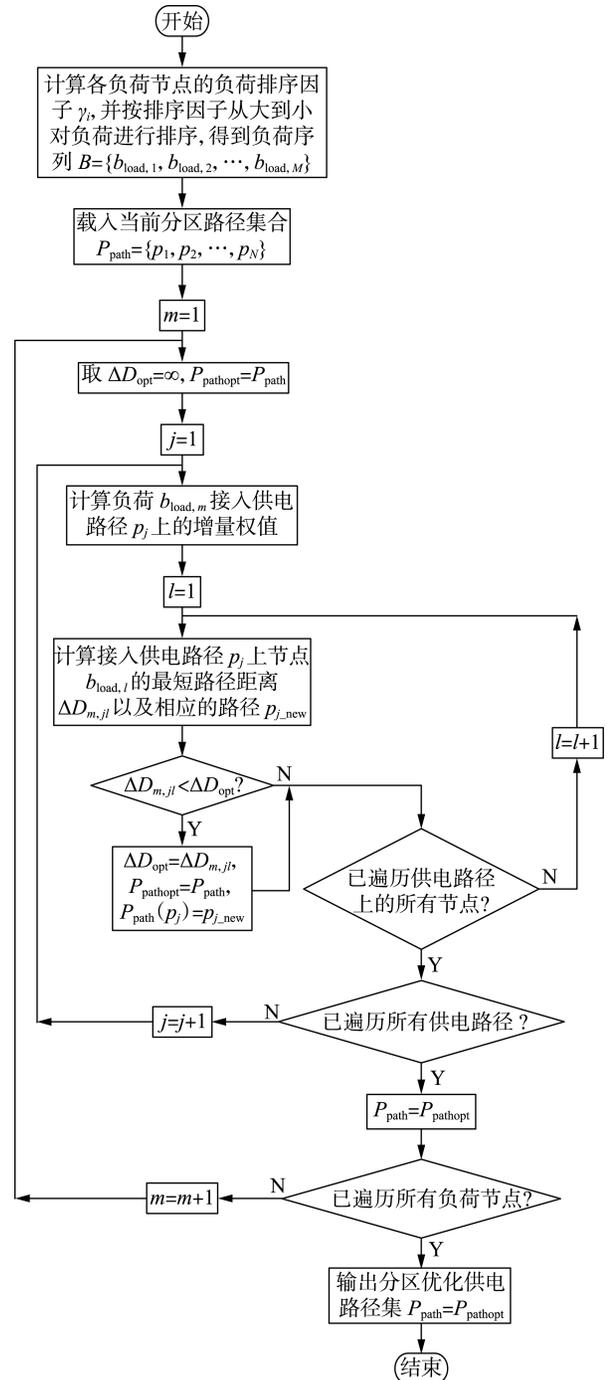


图 1 负荷接入及分区供电路径形成流程

Fig.1 Flowchart of accessing load and forming partition power supply path

$$\Delta P_{i,z} = 1.2346 \frac{P_{ik}}{U_k^2} [(P_{\text{Load},m} + P_{\text{old},ik})^2 - P_{\text{old},ik}^2] L_i$$

其中, $\Delta W_{\text{fix},i}$ 为通道 i 增加的年综合建设费用,包括电缆通道建设费用增量 $\Delta W_{\text{fix},D,i}$ 和电缆材料投资费用增量 $\Delta W_{\text{fix},C,i}$; $\Delta W_{\text{op},i}$ 为通道 i 的年线损费用增量; $C_{\text{fix},D,i}$ 为未加入新节点时通道 i 的单位年建设费用; $C'_{\text{fix},D,i}$ 为加入新节点后通道 i 的单位年建设费用; $C_{\text{fix},C,ik}$ 为通道 i 中支路 k 的单位长度造价; $P_{\text{Load},m}$ 为新增负荷节点的有功功率; $P_{\text{old},ik}$ 为通道 i 中支路 k 的

原始有功功率,当通道 i 不通过支路 k 时, $P_{old,ik} = 0$ 。

3 基于最佳匹配的电源分区路径联络

利用增量最短路径算法决定各电源供电分区间电缆线路联络路径的最短距离,修正路径权值,然后利用最佳匹配算法^[13]得到不同电源供电分区间电缆线路的联络路径,计算流程如图 2 所示。

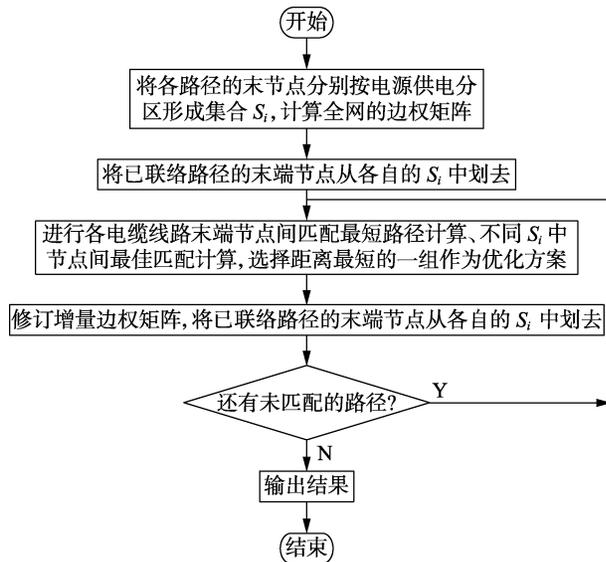


图 2 供电路径联络实现流程

Fig.2 Flowchart of implementing connection among power supply paths

4 算例分析

本文以文献[5]中的算例为例进行仿真分析,规划区内的负荷点包括开关站和分界室,规划区域的地理信息如图 3 所示。该区域规划面积为 8.27 km²,有 61 条街道、104 条路径,共有 3 座 110 kV 变电站、11 座开闭站、16 个电缆分界室。各变电站主变容量为 2×50 MV·A,电压等级为 110 kV/10 kV;

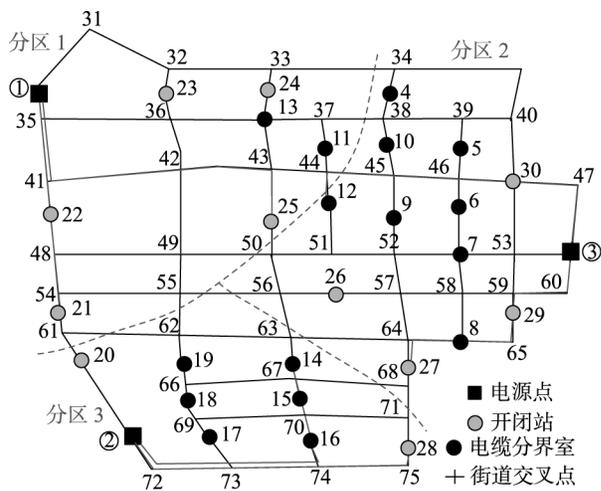


图 3 规划区地理信息示意图

Fig.3 Schematic diagram of geographic information of planning area

每座变电站接 2 回 110 kV 进线有 48 个 10 kV 出线间隔。开闭站节点处最大负荷值为 11 280 kW,电缆分界室处最大负荷值为 5 028.8 kW。规划区域为 A+ 类地区,根据规程采用双环网接线。

电缆敷设方式仅考虑排管敷设方式,通道开挖成本相同,选用的电缆类型为 YJV-3×300,最大载流量为 533 A,电阻为 0.078 Ω/km,单位造价为 50 万元/km,其敷设方式参数设置如表 2 所示。考虑到 $N-2$ 供电可靠性、负荷同时率,每条线路的供电能力取为 6 MW。计算中 $r_0 = 0.1, n = 30$ a。

表 2 电缆 2 种敷设方式的最大允许回路数及费用

Table 2 Maximum allowable path number and cost for cable under two laying methods

| 敷设方式 | 最大电缆回路数/条 | 预留回路数/条 | 单位造价/(万元·km ⁻¹) |
|------|-----------|---------|-----------------------------|
| 排管 | 10 | 2 | 150 |
| 排管 | 24 | 4 | 250 |

分区划分结果如图 3 所示。对每个分区进行电缆路径规划,考虑以下 3 种情况。

Case 1: 无已完成/预选择路径,仅考虑排管,所有通道均可排管。其中分区负荷的接入顺序考虑以下 2 种方法:①按原有编号顺序逐条接入;②负荷按排序因子从大到小排序,分区中待选路径均可接入(本文所提方法)。Case 1 的分区优化结果如图 4 所示。

Case 2: 无已完成/预选择路径,仅考虑排管,道路 35-36、36-13 不允许采用排管负荷接入方法②。Case 2 的分区优化结果见图 5。

Case 3: 在 Case 1 的基础上考虑预选择路径,预选择路径如图 4 中粗线所示,采用负荷接入方法②。考虑以下 2 种预选择路径方式:

- a. 在原有规划的基础上进行扩展;
 - b. 进行新规划,但部分电缆通道预先指定。
- 2 种方法的规划结果一致,分区结果见图 6。

利用最优匹配算法得到分区间电缆路径联络,计算结果如表 4 所示。

由表 4 中 Case 1 的计算结果可见,在不降低供电可靠性的前提下,利用本文所提分区负荷接入方法进行配电网规划能使总电缆长度从 69.694 km 下降到 61.624 km,降幅达 11.6%,网损费用也同步下降;10 通道和 24 通道的排管长度均减少,排管固定资产投资减少;故年综合投资费用从 809.79 万元/a 下降到 737.20 万元/a,下降幅度为 8.96%。从分区情况看,分区 1 的负荷以开闭站为主,故结果未变化;分区 2、分区 3 中,分界室较多导致负荷接入顺序对结果产生较大的影响。以分区 2 为例,2 个开闭站负荷的供电路径未变化,而分界室的供电路径有较大的变化,电缆长度从 8.644 km 降为 7.940 km,网损电量从 529.79 MW·h/a 降到 514.98 MW·h/a,10 根排管长度从 2.368 km 降为 1.720 km。

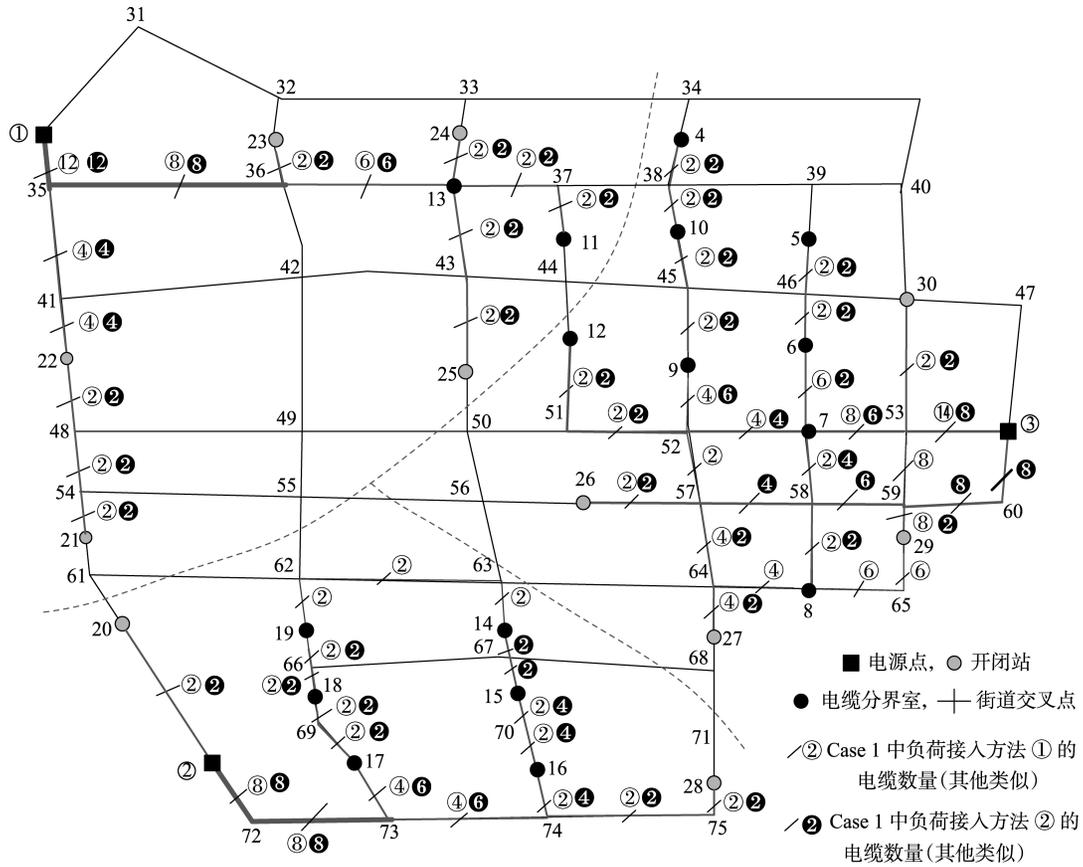


图 4 Case 1 的分区优化结果
Fig.4 Optimized partition result of Case 1

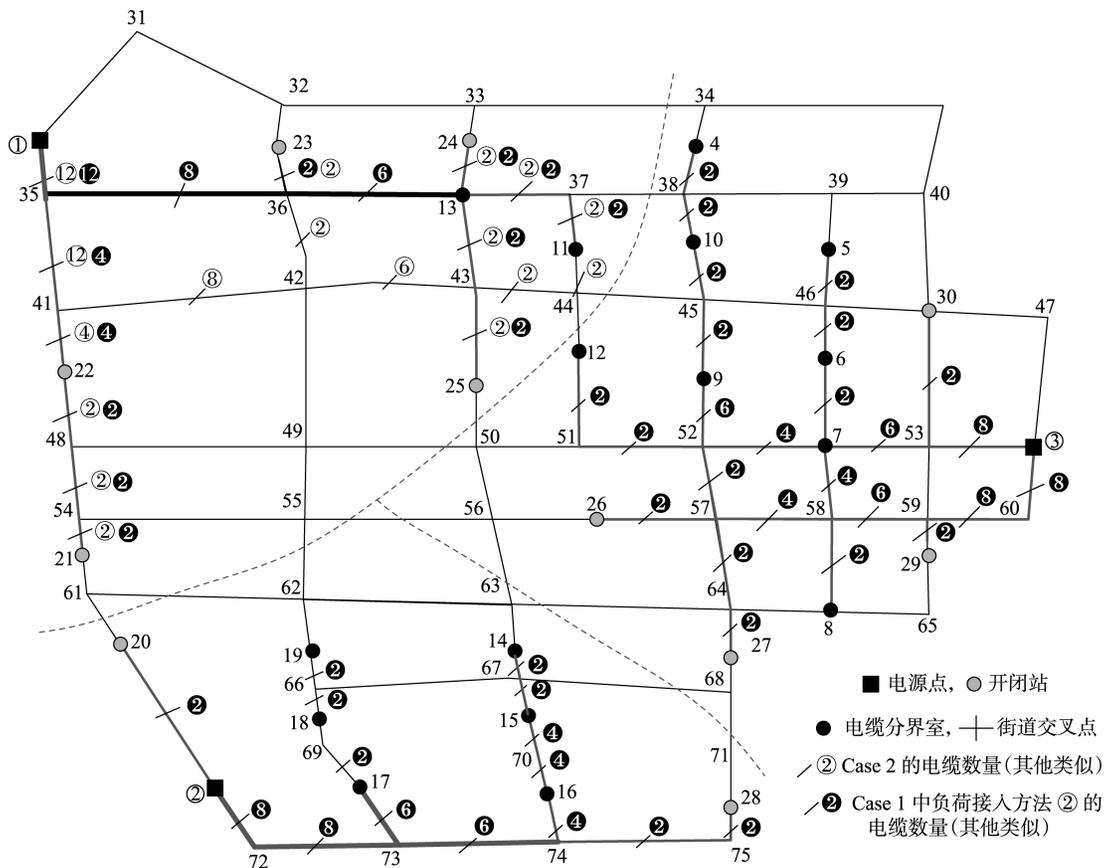


图 5 Case 2 的分区优化结果
Fig.5 Optimized partition result of Case 2

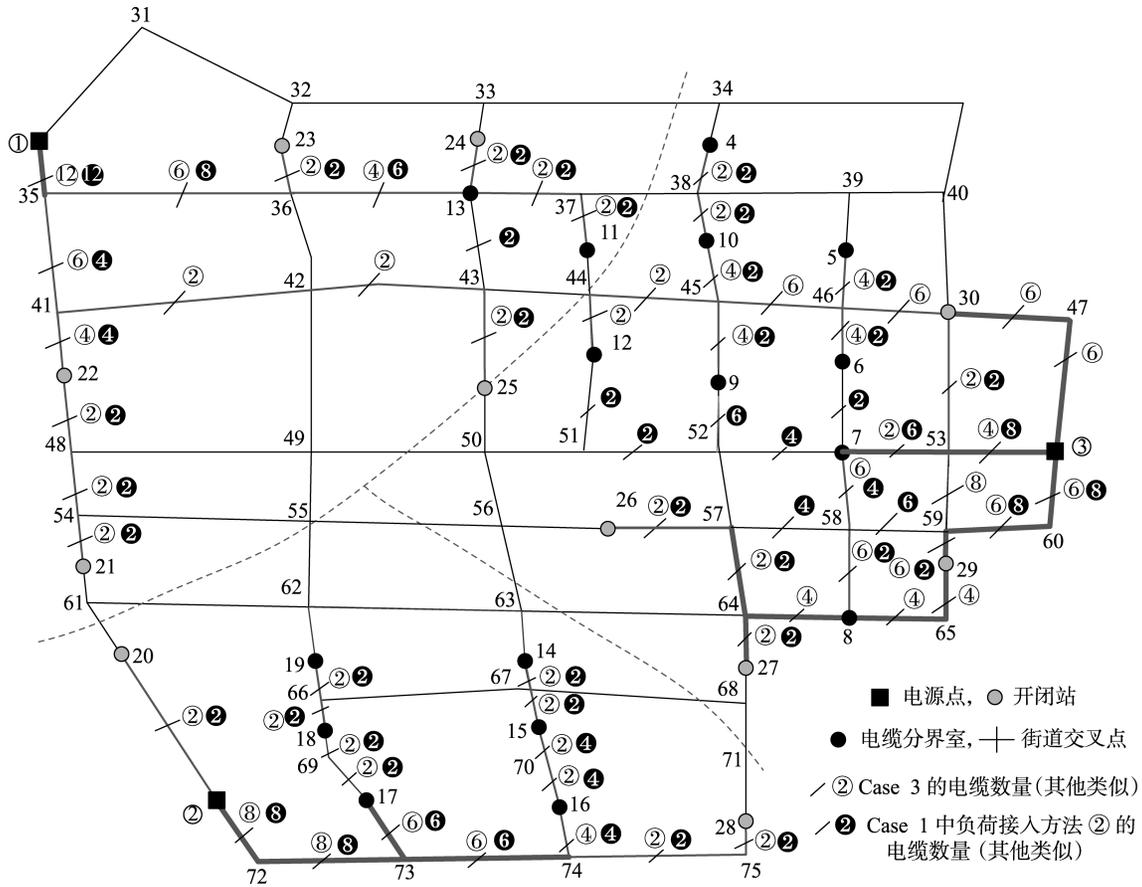


图 6 Case 3 的分区优化结果

Fig.6 Optimized partition result of Case 3

表 4 计算结果

Table 4 Calculative results

| 情况 | 电缆长度/km | 电缆固定资产投资/(万元·a ⁻¹) | 排管长度/km | | | 排管固定资产投资/(万元·a ⁻¹) | 固定资产投资/(万元·a ⁻¹) | 网损电量/(MW·h·a ⁻¹) | 网损电费/(万元·a ⁻¹) | 总费用/(万元·a ⁻¹) | |
|--------|-----------|--------------------------------|----------|----------|-------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------|
| | | | 10 根排管通道 | 24 根排管通道 | 总长 | | | | | | |
| Case 1 | 负荷接入方法① | 69.694 | 369.65 | 14.305 | 0.460 | 14.765 | 239.82 | 609.47 | 4 006.2 | 200.31 | 809.79 |
| | 负荷接入方法② | 61.624 | 326.85 | 14.180 | 0.062 | 14.242 | 227.27 | 554.13 | 3 661.6 | 183.08 | 737.20 |
| Case 2 | 负荷接入方法② | 68.780 | 364.83 | 13.120 | 0.744 | 13.861 | 228.45 | 593.27 | 3 910.0 | 195.50 | 788.78 |
| Case 3 | 预选择路径方式 a | 49.060 | 260.29 | 8.279 | 0.062 | 8.341 | 133.40 | 393.69 | 3 975.8 | 198.79 | 592.48 |
| | 预选择路径方式 b | 67.450 | 357.76 | 15.480 | 0.062 | 15.540 | 247.96 | 605.72 | 3 975.8 | 198.79 | 804.51 |

Case 2 考虑了实际工程中某些道路不允许敷设电缆的情况,当这些路段位于优选路径时,会导致费用增加。算例中,由于道路 35-36、36-13 位于分区 1 中,所以仅有分区 1 的电缆路径发生了变化:如原来沿道路 35-36-13 的电缆改沿道路 35-41-42-43-13。考虑分区间联络情况后,两者的结果对比见图 4、5 和表 4。相较于 Case 1,Case 2 的电缆长度增加,同时导致网损电量及费用增加,虽需要排管的道路减少,但固定资产投资和总费用均增加。

Case 3 考虑了在原有电缆路径的基础上进行扩展规划,同时考虑城市规划及电缆布线中专家提出

的建议,实际工程中最合适敷设电缆的道路路径如图 6 中粗线所示。在这些路径的基础上规划分区电缆路径时,首先是完善当前路径,然后再新增路径。当已有路径和 Case 1 的优化路径大体一致时,两者扩展规划的结果相差不大,分别如图 4 和图 6 中分区 2 的结果所示;当已有路径和 Case 1 的优化路径相差较大时,两者扩展规划的结果差别较大,分别如图 4 和图 6 中分区 3 的结果所示。当这些路径为预选择路径时,扩展规划的结果和 Case 1 的结果相比,新增电缆长度和需要排管的道路长度略微增加,网损电量和网损费用也略微增加。如果考虑到这些路

径是已有路径,则新建的电缆长度、新开挖的道路长度减少,即固定投资减少,从而使总的新增费用降低。

5 结论

本文提出一种实用的全电缆中压配电网线路规划方法,尝试解决配电系统规划和城市规划的衔接,以及通道约束和网损约束随电缆敷设变化而变化、规模大且约束多的问题,所得结论如下:

a. 针对全电缆中压配电网线路规划中较少考虑与城市总体规划相协调的问题,提出在优化模型中考虑通道条件约束及城市总体规划的约束,使规划方案更实用;

b. 提出先在电源供电分区内规划开环线路,再实现不同分区线路联络的规划思想,实现控制局部优化计算规模,可避免出现维数灾难,提高了计算速度;

c. 提出基于增量最短距离法的电源供电分区供电线路规划,动态考虑通道约束对规划的影响,应用中考虑已建线路/规划通道,可用于城区电缆网络的扩展规划。

但是,本文所提方法不是全局寻优的方法,因此只能得到一个相对较好的解,需要进一步探索和其他方法结合,得到全局最优解。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于加快配电网建设改造的指导意见[EB/OL]. (2015-08-20) [2017-08-21]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201509/t20150902_750025.html.
- [2] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则:Q/GDW 156—2006[S]. 北京:国家电网公司,2006.
- [3] 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):48-55,63.
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):48-55,63.
- [4] 刘佳,程浩忠,徐谦,等. 网源协调驱动下考虑网络转供能力的配电系统多目标双层近期规划[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):42-49.
LIU Jia,CHENG Haozhong,XU Qian, et al. Multi-objective bi-level short-term planning of distribution system considering network transfer capability under network-generation coordination drive[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):42-49.
- [5] SHU J,WU L,LI Z Y, et al. A new method for spatial power network planning in complicated environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):381-389.
- [6] 李瑶,潘江蒙,姚李孝,等. 考虑通道规划的城市中压配电网规划[J]. 电网与清洁能源,2010,26(3):58-62.
LI Yao,PAN Jiangmeng,YAO Lixiao, et al. Planning of urban mid-voltage distribution network with consideration of cable trench[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(3):58-62.
- [7] 孔涛,程浩忠,李钢,等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术,2009,33(19):92-99.
KONG Tao,CHENG Haozhong,LI Gang, et al. Review of power distribution network planning[J]. Power System Technology,2009,33(19):92-99.
- [8] 王金凤,杨丽徙,臧睿,等. 基于改进遗传算法的配电网优化规划[J]. 电力自动化设备,2002,22(5):64-66.
WANG Jinfeng,YANG Lixi,ZANG Rui, et al. Optimal planning for distribution system based on improved GA[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(5):64-66.
- [9] 赵强,敬东,李正. 蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(2):52-54.
ZHAO Qiang,JING Dong,LI Zheng. Application of ant colony algorithm for distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(2):52-54.
- [10] 马旭. 城市电缆配电网优化规划[D]. 西安:西安科技大学,2010.
MA Xu. Optimal planning of cable based city distribution networks[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2010.
- [11] 张李盈,范明天. 配电网综合规划模型与算法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):59-64.
ZHANG Liying,FAN Mingtian. A new model and methodology for distribution network integration planning[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(6):59-64.
- [12] 颜伟,李振文,余娟,等. 考虑环网柜接线方式的城市中压配电网规划[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2011,34(11):87-93.
YAN Wei,LI Zhenwen,YU Juan, et al. Urban medium-voltage distribution network planning considering connection mode with ring main unit[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition),2011,34(11):87-93.
- [13] 王海英,黄强,李传涛. 图论算法及其 MATLAB 实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:93-108.

作者简介:



顾丹珍

顾丹珍(1971—),女,上海人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统建模、规划和优化(**E-mail**:gudanzhen@shiep.edu.cn);

戴海锋(1991—),男,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统建模、特高压交直流(**E-mail**:595239850@qq.com);

曾健(1993—),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统建模、特高压交直流(**E-mail**:543953829@qq.com)。

(下转第 44 页 continued on page 44)

zju.edu.cn);

徐立中(1983—),男,浙江杭州人,博士,主要研究方向
为电网调度运行(E-mail:150067105@qq.com);

倪秋龙(1976—),男,浙江杭州人,高级工程师,主要

研究方向为电网安全稳定分析、调度运行管理(E-mail:
10131415@qq.com)。

Switch sequence optimization of distribution network reconfiguration considering process security

ZHU Jiaqi¹, ZHU Bingquan², XU Weiwei³, DONG Shufeng¹, XU Lizhong², NI Qiulong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Rational and reliable switch operation sequence should be adopted in the process of distribution network reconfiguration to avoid impact on the stable operation of distribution network. An improved binary particle swarm optimization algorithm is used to obtain the solution set of distribution network reconfiguration, and the coordinates of invalid particles in the iterative process are modified randomly to improve the search efficiency. The safety constraints should be satisfied during loop closing and unwinding in distribution network reconfiguration are proposed, and Thevenin equivalent model is applied to calculate the surge current due to closing loop. A recursive algorithm is proposed for solving the switch sequence of distribution network reconfiguration with the consideration of process safety, and the greedy strategy is followed in the search process. The invalid intermediate solutions in the recursive process are recorded with binary coding to avoid repeated calculation. Case results of IEEE 33-bus and PG&E 69-bus systems verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: switch sequence of distribution network reconfiguration; process safety; binary particle swarm optimization algorithm; surge current due to closing loop; recursive algorithm

(上接第 36 页 continued from page 36)

Full-cable medium voltage distribution network planning based on incremental shortest path method

GU Danzhen, DAI Haifeng, ZENG Jian

(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Cabling reconstruction has become the development trend for urban medium voltage distribution network power supply. A practical planning method for the backbone network of full-cable medium voltage distribution network is proposed based on the incremental shortest path method considering the cable channel constraints and urban planning constraints. The overall optimization of the whole network is divided into two parts: the cable line planning of power supply zones and the line connection planning among power supply zones, and the two parts are completed by the incremental shortest path method and the best matching algorithm respectively. An actual example shows that the proposed method can be applied to the network construction and expansion planning of the full-cable medium voltage distribution network.

Key words: full-cable medium voltage distribution network; incremental shortest path method; cable channel constraints; urban planning; network planning