

基于路径描述的配电网电力廊道规划方法

徐航¹, 董树锋¹, 朱嘉麒¹, 赵依²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 长安大学电子与控制工程学院, 陕西省西安市 710021)

摘要: 配电网工程的落地依托于充足的电力廊道资源,而电力廊道规划方案的合理性也将影响到后期配电网建设的经济性。为科学指导廊道的选择,提出一种基于路径描述的配电网电力廊道规划方法。首先根据电力廊道与配电网网架之间的耦合关系,搭建电力廊道连通性模型;然后采用深度优先遍历算法获得满足廊道建设情况的供电路径集合。基于此,以电力廊道综合规划费用为廊道规划方案的评估依据,搭建了配电网电力廊道双层规划模型。最后采用嵌套离散粒子群优化算法进行优化求解,外层粒子群算法以电力廊道综合规划费用最小为优化目标,内层粒子群算法以配电网运行规划成本最小为优化目标。算例分析表明,所述模型可兼顾后期配电网建设的可行性与经济性,得到满足负荷需求的电力廊道最优规划方案,有利于提前对廊道站址进行保护,为配电网建设提供参考。

关键词: 配电网; 路径描述; 电力廊道; 双层优化; 离散粒子群优化算法

0 引言

随着中国城市化进程的不断加快,城市对电能质量、供电可靠性的要求逐步提升,城市清洁化建设成为新的诉求,城市配电网电缆化已成为大势所趋。世界上许多发达国家,都把电力电缆化的普及率作为城市现代化程度的重要指标^[1-2]。电力廊道是一种用于电力线路敷设的地基载体,充足的电力廊道资源是实现城市电缆化的重要前提。然而,城市规划与电力系统规划往往脱节,一方面是由于城市规划对电力廊道多为原则性指导,另一方面则是因为电网对于廊道布局缺乏全面的控制,从而导致实际电力廊道布局随意,经常出现电力廊道破坏城市景观、影响用地开发及廊道站址被征用等现象。此外,电力廊道的规划是否合理不仅会影响配电网工程能否顺利落地,还会影响后期配电网建设的经济性。因此,有必要提出科学合理的配电网电力廊道规划方法。

目前关于配电网规划已有较多的研究,文献^[3-4]针对配电网网架的抗灾性能进行了研究,分别提出了以网络抗毁度最大为目标的网架优化模型与骨干网架改造决策方案。文献^[5]基于设备的全生命周期成本,建立了配电网多阶段网架及开关布置

规划新模型。文献^[6]基于栅格化三位地图,建立了考虑路径优化和变电站选址的空间电网规划模型,实现了电源与馈线的综合协调规划。随着分布式电源(distributed generator, DG)在电力系统中的比重不断增加, DG 的不确定性对配电网规划提出了新的要求^[7-8],文献^[9-11]针对有 DG 的配电网提出了多目标网架协调规划模型,使规划方案能够充分适应 DG 的广泛接入。

综上,当前针对电力廊道规划的相关研究较少,尚未有科学的电力廊道规划方法指导廊道站址的选择。然而电力廊道站址保护困难,被侵占现象时有发生,导致配电网规划方案的多次修改,造成人力、财力等资源浪费。文献^[12]提出了城市电力系统规划设计方法,但也仅是廊道规划的一些通用原则。针对上述情况,本文提出了一种基于路径描述的配电网电力廊道规划方法。该方法基于配电网地理信息系统(geographic information system, GIS)与实际调研结果获得待选廊道集合,根据电力廊道与配电网网架之间的耦合关系,搭建电力廊道连通性模型,以保证电力廊道可为后期配电网建设提供充足且合理的空间资源。再通过深度优先遍历的配电网路径搜索算法,获得满足廊道建设情况的配电网供电路径集。基于此,以电力廊道综合规划费用为廊道规划方案的评估依据,搭建了配电网电力廊道双层规划模型。最后利用嵌套的离散粒子群优化(discrete particle swarm optimization, DPSO)算法

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-05-20。

上网日期: 2018-07-16。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

对双层规划模型进行求解。算例结果表明,本文所提模型兼顾后期电网建设的可行性与经济性,通过全面评估电力廊道规划方案,最终输出满足未来负荷需求的电力廊道最优规划方案。

1 基于路径描述的电力廊道连通性模型

1.1 电力廊道的主要特点

电力廊道的建设有别于传统配电网的网架建设,其主要区别如下。

1)城市地下资源紧张,目前大多数电缆采取多回路同沟敷设方式,即一条电力廊道可包含多条走线。因此,廊道结构相较网架结构更加精简。

2)电力廊道需为配电网的线路敷设提供充足的资源空间,同时保证至少有一种满足负荷需求的网架规划方案,因此电力廊道可以有冗余、含有环状设计,而配电网网架必须满足辐射状约束。

3)电力廊道一般沿道路建设,与城市土地规划紧密相关,需要考虑更多的实际地理约束。

基于上述三点,首先通过配电网 GIS 实现地理信息与配电网信息的可视化,结合实际调研结果,筛选出可建设廊道的相关道路并编号。根据道路周围的实际地理环境,确定各个廊道 $R_k (k=1, 2, \dots, n)$ 的建设类型与投资成本,其中 n 为配电网廊道总数。定义某一规划阶段的待选廊道集为 J_c , 则有

$$J_c = \{R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_n\} \quad (1)$$

为表征廊道的实际建设情况,定义二进制变量 M_k 描述廊道 R_k 的状态:

$$M_k = \begin{cases} 1 & \text{建设廊道 } R_k \\ 0 & \text{不建设廊道 } R_k \end{cases} \quad (2)$$

1.2 基于路径的配电网拓扑描述

配电网节点主要分为电源节点与负荷节点。一般来说,任意负荷节点有多条可选的供电路径。但是,在辐射状网络中,每一个负荷节点有且仅有一条供电路径,因此,配电网拓扑结构完全可由供电路径集进行描述。传统配电网拓扑分析主要基于支路的概念,如图论算法、关联矩阵。当求解最优化问题时,以上两者均无法采用线性的数学公式清晰地描述配电网的辐射状拓扑结构,即无法采用常规的数学求解器进行求解,使该方法在实际应用中受限,而基于路径描述的算法则不存在上述问题。

定义从负荷节点 i 到某一电源节点的所有路径集合为 $\Pi_{i,L}$, 则

$$\Pi_{i,L} = \{P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,k}, \dots, P_{i,L}\} \quad (3)$$

式中: $P_{i,k}$ 为负荷节点 i 所在的第 k 条供电路径。

根据配电网闭环设计、开环运行的特点,在实际

运行时, $\Pi_{i,L}$ 中的路径有且仅有一条连通,定义二进制变量 $W_{i,k}$ 描述路径 $P_{i,k}$ 的状态:

$$W_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{路径 } P_{i,k} \text{ 连通} \\ 0 & \text{路径 } P_{i,k} \text{ 不连通} \end{cases} \quad (4)$$

配电网辐射状运行约束可表述如下^[13-14]。

1)任一负荷节点 i 的供电路径集中,有且仅有一条为通路,即

$$\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{i,L}} W_{i,k} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

2)若 $P_{i,k}$ 连通,则包含在 $P_{i,k}$ 内的任意路径 $P_{d,h}$ 也连通,即

$$W_{i,k} \leq W_{d,h} \quad \forall P_{d,h} \subset P_{i,k} \quad (6)$$

为便于描述配电网其他运行约束、多阶段规划问题和廊道的通断状态,引入如下路径集合:

$$\Pi_{m,S} = \{\text{从电源 } m \text{ 出发的所有路径}\} \quad (7)$$

$$\Pi_{j,B} = \{\text{经过廊道 } j \text{ 的所有路径}\} \quad (8)$$

式中: $\Pi_{m,S}$ 用于描述电源容量约束; $\Pi_{j,B}$ 用于描述馈线载流量约束、节点电压约束与运行成本的计算。

1.3 电力廊道连通性模型

为保证配电网网架规划是基于廊道资源的实际预留情况,同时至少包含一种满足负荷需求的网架规划方案,本文提出如下约束。

1)任意负荷点 i 的 $\Pi_{i,L}$ 都必须为非空集,即

$$\Pi_{i,L} \neq \emptyset \quad \forall i \quad (9)$$

2)任意 $P_{i,k}$ 都可由 J_c 中二进制数 M_k 为 1 的一个或多个待选廊道 R_k 组合而成。

其中,约束 1)是为了保证任意负荷点 i 都至少有一条到达某一电源点的连通路,使廊道资源足以满足负荷需求;约束 2)是为了保证任意一条供电路径都是基于预留廊道资源的实际情况而筛选出的,这对后期工程的正确实施至关重要。该约束允许电力廊道有冗余、环状设计等情况出现。

为便于理解,利用图 1 所示的简单网络为例阐述廊道与路径之间的关系。

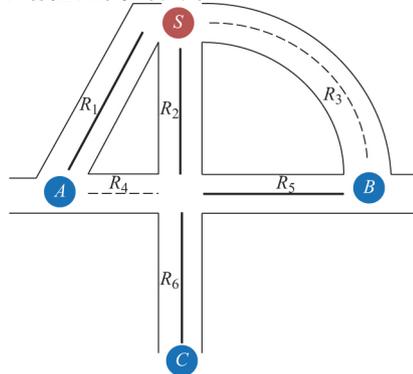


图 1 配电网简单网络示意图
Fig.1 Schematic diagram of a simple network in distribution network

图 1 中, S 为电源点, 有 3 个负荷节点分别用 A, B, C 表示。文中可敷设廊道的待选路径集合为 $J_c = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6\}$, 假设表征廊道的实际建设情况的二进制数为: $\{1, 1, 0, 0, 1, 1\}$, 即选择廊道 R_1, R_2, R_5, R_6 进行建设。网络所有可能路径集合如附录 A 表 A1 所示。可知, 进行建设的廊道 R_1, R_2, R_5, R_6 均满足约束 1), 即所有的负荷节点路径集均为非空集; 负荷路径集中的任意一个元素都可由廊道 R_1, R_2, R_5, R_6 组合而成, 也满足约束 2)。

需要指出的是, 廊道为描述本文模型的基本单元, 与传统的支路概念类似。因此, 基于支路的配电网潮流计算在本文中皆适用。由于配电网中的电源数量远少于负荷数量, 本文采用深度优先遍历算法, 首先遍历按电源分类的所有满足要求的路径, 判断每条路径终点处的节点是否为指定负荷节点, 若是, 则记录该节点, 进而对每一个负荷节点进行上述搜索, 得到按负荷节点分类的路径集。同理可得到包含的指定廊道的路径集。

2 配电网电力廊道双层规划模型

虽然电力廊道规划与配电网网架规划分属不同层次的问题, 且电力廊道建设远超前于网架建设, 但两者之间存在紧密的耦合关系, 具体表现如下。

1) 凡是配电网规划中预留的电力廊道, 才是配电网网架建设的可行通道, 换言之, 网架规划受限于已有的廊道资源。

2) 电力廊道必须可为后期配电网建设提供充足且合理的空间资源, 即保证至少有一种满足负荷需求的网架规划方案。

3) 电力廊道规划的合理性不仅会影响配电网网架的投资建设, 还会影响到电网后期运行的经济性。若后期配电网运行规划成本过高, 则该电力廊道规划方案应不予采纳。

因此, 科学合理的电力廊道规划是配电网工程顺利落地的重要基础, 评估电力廊道规划方案的优劣不应仅考虑电力廊道投资建设成本, 还应兼顾后期电网建设的可行性与经济性。根据分解协调思想, 本文提出电力廊道双层规划模型。外层规划以电力廊道综合规划费用最小为目标, 该费用包括电力廊道投资建设成本与配电网运行规划成本。外层规划模型寻找可行的电力廊道建设方案并传递给内层规划模型, 同时计算电力廊道投资建设费用。内层规划模型基于不同的廊道规划方案寻找最优的网

架建设方案, 并计算配电网运行规划费用最小值, 返回给外层规划模型。外层规划模型完成电力廊道综合规划费用的计算, 以此来评估电力廊道规划方案的优劣, 并最终选出最优方案。

2.1 外层规划模型

外层规划模型的优化目标如下:

$$\min C_U = C_R + C_D \quad (10)$$

式中: C_U 为电力廊道综合规划费用; $C_R = \sum_k M_k C_{R,k}$ 为电力廊道的投资建设成本, 其中 $C_{R,k}$ 为第 k 条待选廊道的投资建设成本; C_D 为配电网运行规划成本。

外层规划模型的约束为 1.3 节中约束 1) 与约束 2), 即保证廊道建设方案的可行性。

2.2 内层规划模型

内层规划模型以配电网运行规划成本最小为优化目标:

$$\min C_D = C_P + C_O + C_M \quad (11)$$

式中: C_P 为线路投资成本; C_O 为运行成本; C_M 为维护折旧成本。

1) 线路投资成本 C_P

$$C_P = \sum_{R_k \in J_c'} C_{L,k} M_k \quad (12)$$

式中: $C_{L,k}$ 为基于廊道 R_k 敷设电缆的投资成本, 即 $C_{L,k} = C_1 L_{R,k}$, 其中 C_1 为电缆单位敷设成本 (万元/km), $L_{R,k}$ 为廊道 R_k 的长度; J_c' 为有敷设电缆的廊道集合。文献[15]已证明根据路径的状态可推断出廊道/支路的通断状态。

2) 运行成本 C_O

本文主要考虑线路损耗。廊道电缆模型与其符号参数如图 2 所示。

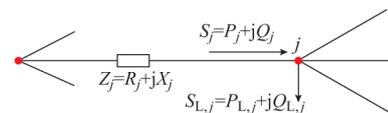


图 2 廊道电缆模型及其符号参数
Fig.2 Corridor cable section model and its notation adopted

在廊道 j 中的电缆有功损耗可由下式表示^[16]:

$$\Delta P_{j,loss} = R_j I_j^2 = R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \quad (13)$$

式中: R_j 为线路阻抗; U_j 为节点电压。

廊道 j 中的电缆有功功率 P_j 等于节点 j 下游的有功需求与廊道 j 中的电缆有功损耗之和。由于线路损耗远小于有功负载, 可忽略不计。廊道 j 中的电缆无功功率 Q_j 同理。即

$$\begin{cases} P_j = \sum_{i \in j} P_{L,i} \\ Q_j = \sum_{i \in j} Q_{L,i} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 的有功和无功负荷需求; $i \in j$ 表示节点集合 i 包括节点 j 及节点 j 下游的节点。

廊道 j 中的电缆有功功率 P_j 和无功功率 Q_j 与配电网拓扑结构紧密相关, 则式(13)可改写为:

$$\Delta P_{j,\text{loss}} = R_j \left[\frac{\left(\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} P_{L,i} \right)^2 + \left(\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} Q_{L,i} \right)^2}{U_j^2} \right] \quad (15)$$

则式(14)可改写为:

$$\begin{cases} P_j = \sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} P_{L,i} \\ Q_j = \sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} Q_{L,i} \end{cases} \quad (16)$$

整个配电网的有功损耗 ΔP_{sum} 为:

$$\Delta P_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^n \Delta P_{j,\text{loss}} \quad (17)$$

运行成本 C_0 可由式(18)表示。

$$C_0 = \Delta P_{\text{sum}} \tau_{\text{max}} C_E \quad (18)$$

式中: τ_{max} 为最大负荷小时数; C_E 为电价。

3) 维护折旧成本 C_M

维护折旧成本主要包括检修人员费用、设备折旧成本、设备故障检修费用等。一般维修成本的管理基于计划投资成本, 取投资成本的某一比例。

$$C_M = \gamma_M (C_R + C_P) \quad (19)$$

式中: γ_M 为维护折旧率, 视地区具体情况而定。

配电网拓扑结构需满足式(5)和式(6), 即网络保证连通且为辐射状。此外, 配电网还需满足电源容量约束、馈线载流量约束、节点电压约束和可靠性约束。

1) 电源容量约束

$$\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{m,S}} W_{i,k} P_{L,i} \leq S_m \quad (20)$$

式中: S_m 为第 m 个电源节点的容量。

2) 馈线载流量约束

$$\left(\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} P_{L,i} \right)^2 + \left(\sum_{P_{i,k} \in \Pi_{j,B}} W_{i,k} Q_{L,i} \right)^2 \leq S_j^{\text{max}} \quad (21)$$

式中: S_j^{max} 为廊道 j 中的电缆最大载流量。

3) 节点电压约束

在忽略线路损耗的前提下, 电源电压与负荷节

点电压之间的关系可表述如下:

$$U_m^2 - U_i^2 \approx 2 \sum_{j \in P_{i,k}} (R_j P_j + X_j Q_j) \quad (22)$$

式中: U_m 和 U_i 分别为电源节点 m 和负荷节点 i 的电压; X_j 为线路电抗。

常见的电压约束可表述如下:

$$U_m - U_i \leq \Delta U_{\text{max}} \quad (23)$$

式中: ΔU_{max} 为电源节点 m 到负荷节点 i 所允许的最大电压降落。

式(23)可改写为 $U_m^2 - U_i^2 \leq \delta_{\text{max}}$, 其中 $\delta_{\text{max}} = \Delta U_{\text{max}} (2U_m - \Delta U_{\text{max}})$ 。则基于路径描述的节点电压约束可表述为式(24):

$$2 \sum_{j \in \Pi_{i,k}} \left[R_j \left(\sum_{P_{i,m} \in \Pi_{j,B}} W_{i,m} P_{L,i} \right) + X_j \left(\sum_{P_{i,m} \in \Pi_{j,B}} W_{i,m} Q_{L,i} \right) \right] \leq \delta_{\text{max}} + (1 - W_{i,k}) \quad (24)$$

式中: $(1 - W_{i,k})$ 是为了使式(24)不受节点 i 的非连通路径的影响。

3 基于 DPSO 的双层模型优化求解方法

本文利用嵌套的 DPSO 算法求解双层规划模型, 电力廊道双层规划模型中存在不同的决策变量, 分别为外层规划粒子与内层规划粒子, 其求解流程如图 3 所示。

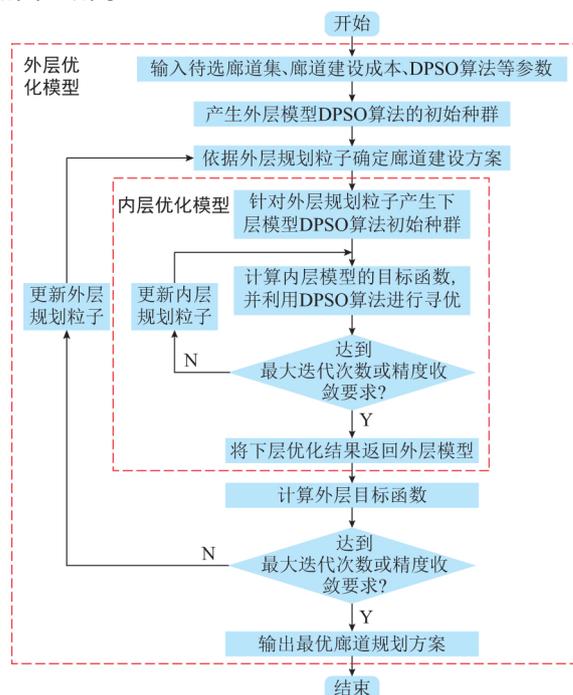


图 3 双层规划模型求解流程
Fig.3 Flow chart of bi-level planning optimization model

3.1 外层模型优化求解

外层规划粒子由描述廊道状态的二进制变量 M_k 组成, 每一个外层规划粒子则代表一种廊道建设方案, 从待选廊道集 J_c 中产生。以廊道作为描述本文模型状态的基本单位, 将各个廊道节点增加负荷为 0 的虚拟负荷点。对外层规划粒子所对应的廊道拓扑图进行负荷路径(负荷不为 0)搜索操作, 检验所有的负荷节点路径是否满足式(9): 若满足, 则将此电力廊道规划方案传递给内层规划模型; 若不满足, 则重新生成新的电力廊道规划方案, 直至满足要求。

外层规划模型将满足连通性约束的电力廊道规划方案传递给内层模型。直至接收到内层优化的反馈后, 外层规划模型计算出电力廊道综合规划费用, 并对外层规划粒子进行寻优更新。重复上述过程, 直至满足迭代收敛要求, 并输出优化结果。

3.2 内层模型优化求解

内层规划粒子由描述路径状态的二进制编码 $W_{i,k}$ 组成, 每一个内层规划粒子代表一种可行的线路敷设方案。基于外层所传递的电力廊道规划方案, 内层规划模型利用 DPSO 算法进行寻优计算, 直至满足迭代收敛要求, 并得到最小配电网运行规划成本, 随后将内层优化结果反馈给外层。

4 算例分析

将上述电力廊道规划方法应用于浙江省绍兴市某区域的局部配电网中, 图 4 为该配电网的具体示意图, 其中实线表示城市道路, 虚线表示待建廊道。该配电网网络包含 1 个电源点、10 个负荷点、20 条代建廊道, 电压等级为 10 kV。

其中, 电力廊道的投资建设成本与周围实际地理情况及电力廊道类型相关, 可通过实际调研获得相关数据。各条廊道的长度与投资建设成本、各个节点负荷、粒子群寻优参数如附录 A 表 A2 至表 A4 所示。为简化计算, 假设所敷设电缆都为同一型号 JKLY-120, 其单位电阻为 $0.223 \Omega/\text{km}$, 单位电抗为 $0.348 \Omega/\text{km}$, 电缆单位敷设成本为 $1.03 \text{ 万元}/\text{km}$, 馈线载流量约束为 $1.5 \text{ MW}+1.2 \text{ Mvar}$ 。其他参数如下: 电价为 $0.4 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 最大负荷小时数为 3000 h , 折旧率为 3% , 电源最大容量为 $9.87 \text{ MW}+7.54 \text{ Mvar}$, 电压约束为 $\Delta U_{\max}=20\%U_m$ 。

寻优结果与费用明细如表 1 和图 5 所示, 线路敷设方案即路径规划结果如附录 A 表 A5 所示。规划结果表明, 粒子群在第 120 次迭代之后收敛于“综

合规划成本=220.01 万元”, 其优化时间为 327 ms, 优化时间较短且收敛性能好。

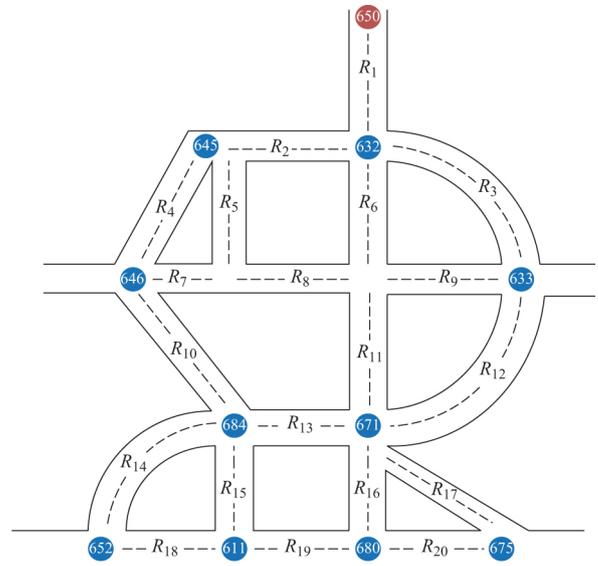


图 4 绍兴市某区域局部配电网示意图
Fig.4 Schematic diagram of local distribution network in a region of Shaoxing city

表 1 电力廊道规划结果
Table 1 Planning results of power corridor

规划方案	廊道投资建设成本/万元	线路投资成本/万元	运行成本/万元	维护折旧成本/万元	综合规划费用/万元
最优方案 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{10}, R_{12}, R_{15}, R_{16}, R_{18}, R_{20}$	136.70	29.93	52.49	0.90	220.01
次优方案 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{12}, R_{13}, R_{15}, R_{16}, R_{18}, R_{20}$	131.01	29.30	63.04	0.88	282.63

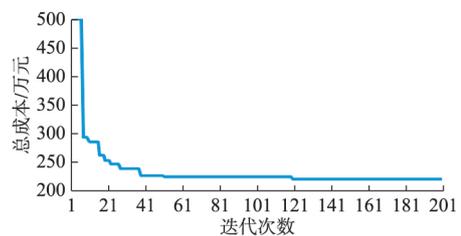


图 5 DPSO 算法寻优结果
Fig.5 Optimization results of DPSO algorithm

对比最优规划方案与次优规划方案可知, 次优方案的初期投资成本之和小于最优方案, 但其后期配电网运行规划成本大于最优方案规划成本, 使其电力廊道综合规划费用较高。因此, 电力廊道投资建设成本最小的规划方案并不能代表最优规划

方案。

由于外层的廊道规划结果是内层配电网网架规划的基础,廊道前期的投资建设成本往往会对后期运营阶段的成本造成较大的影响,合理提升廊道投资成本可降低配电网的运行成本,使规划方案的综合费用降低。因此,引入配电网运行规划结果作为电力廊道规划方案的评估依据,可全面评估电力廊道规划方案,得到更优的方案。

5 结语

本文针对配电网电力廊道规划问题,提出了基于路径描述的电力廊道双层规划模型。外层规划模型将满足连通性约束的电力廊道建设方案传递给内层规划模型。内层规划模型基于此计算配电网运行规划费用最小值,并返回给外层规划模型,完成电力廊道综合规划费用的计算。以此评估电力廊道规划方案的优劣,并选出综合费用最低的最优方案。本文所提的电力廊道规划方法,存在如下优势。

1)充分考虑电力廊道与配电网网架之间的耦合关系,兼顾后期电网网架建设的可行性与运行的经济性,获得更优、更符合实际的电力廊道规划方案。

2)根据规划结果,可提前对电力廊道站址进行保护,从而保证配电网工程落地有充足的廊道资源,可为配电网建设提供参考。

随着能源互联网的快速发展,冷、热、电、气等能源子系统的行业壁垒逐渐被打破,能量可实现自由传输与交互,而多能流的传输依赖于各类管廊,各类廊道的合理规划更是实现能源高效互联的重要前提。目前,本文尚未考虑各类不同廊道之间的影响,下一步将深入研究综合管廊的协同规划方法。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 苏韵掣,刘俊勇,刘友波,等.大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J].电网技术,2017,41(1):201-210.
SU Yunche, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its solution method[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 201-210.
- [2] 国家能源局关于印发配电网建设改造行动计划的通知[EB/OL]. [2018-06-04]. http://www.nea.gov.cn/2015-08/c_134572118.
Notification on printing and distributing action plan of construction and transformation of distribution network by National Energy Administration [EB/OL]. [2018-06-04]. http://www.nea.gov.cn/2015-08/c_134572118.
- [3] 吴霜,卫志农,孙国强,等.考虑网络抗毁性的配电网网架多目标规划[J].电力系统自动化,2014,38(3):137-142.DOI:10.7500/AEPS20130227006.
WU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multi-objective planning of distribution network considering network survivability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 137-142. DOI: 10.7500/AEPS20130227006.
- [4] 彭显刚,林利祥,翁奕珊,等.基于模糊综合评判和综合赋权的抗灾型配电网骨干网架规划[J].电力系统自动化,2015,39(12):172-178.DOI:10.7500/AEPS20140910007.
PENG Xiangang, LIN Lixiang, WENG Yishan, et al. Decision-making method for anti-disaster distribution network backbone upgrade based on fuzzy comprehensive evaluation and comprehensive weights [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 172-178. DOI: 10.7500/AEPS20140910007.
- [5] 苏海锋,张建华,梁志瑞,等.基于LCC和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J].中国电机工程学报,2013,33(4):118-125.
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125.
- [6] 舒隽,韩冰,陈学姣.计及线路路径优化的空间电网规划[J].中国电机工程学报,2014,34(4):570-577.
SHU Juan, HAN Bing, CHEN Xuejiao. Spatial power network planning considering electric line route optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 570-577.
- [7] 方陈,张翔,程浩忠,等.主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J].电网技术,2014,38(4):823-829.
FANG Chen, ZHANG Xiang, CHENG Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 823-829.
- [8] 曾鸣,韩旭,李博.考虑不确定性的多阶段主动配电网规划模型研究[J].电力建设,2015,36(1):65-71.
ZENG Ming, HAN Xu, LI Bo. Study of multistage planning for active distribution networks under uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 65-71.
- [9] 李志铿,王钢,陈志刚,等.计及区域自组网的含分布式电源配电网网架柔性规划[J].电力系统自动化,2013,37(6):42-47.
LI Zhikeng, WANG Gang, CHEN Zhigang, et al. Flexible network planning considering islanding scheme for distribution systems with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 42-47.
- [10] GAO Yajing, HU Xiaobo, YANG Wenhui, et al. Multi-objective bilevel coordinated planning of distributed generation and distribution network frame based on multiscenario technique considering timing characteristics [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1415-1429.

- [11] HU Xiaobo, GAO Yajing, ZHAO Yang. Multi-objective coordinated planning of distribution network frame incorporating multi-type distributed generation considering uncertainties [C]// International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), October 17-18, 2015, Beijing, China.
- [12] 许小良.现代城市电力设施布局规划研究[D].杭州:浙江大学, 2011.
XU Xiaoliang. The study on layout planning of modern urban power facilities[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [13] RAMOS E R, EXPOSITO A G, SANTOS J R, et al. Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 556-564.
- [14] LLORENS-IBORRA F, RIQUELME-SANTOS J, ROMERO-RAMOS E. Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 88(1): 137-145.
- [15] 孙明,董树锋,夏圣峰,等.基于路径描述的馈线分区 $N-1$ 可装容量计算方法[J].电力系统自动化, 2017, 41(16): 123-129. DOI:10.7500/AEPS20161101003.
SUN Ming, DONG Shufeng, XIA Shengfeng, et al. Path-based calculation method for feeder partition available capability satisfied with $N-1$ security criterion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 123-129. DOI: 10.7500/AEPS20161101003.
- [16] 韩祯祥.电力系统分析[M].杭州:浙江大学出版社, 2009.
HAN Zhenxiang. Power system analysis [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009.

徐航(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统建模与分析。E-mail: xuhang_1994@zju.edu.cn

董树锋(1982—),男,通信作者,副教授,主要研究方向:电力系统高性能计算、电力系统建模与分析等。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

朱嘉麒(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:配电网优化运行。E-mail: m18868127260@163.com

(编辑 章黎)

Path Description Based Planning Method for Power Corridor of Distribution Network

XU Hang¹, DONG Shufeng¹, ZHU Jiaqi¹, ZHAO Yi²

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

2. College of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The construction of distribution networks depends on available resources of power corridors. The reasonable planning of the power corridor will affect the economy of later construction of distribution networks. To scientifically guide the power corridor planning, a path description based method for power corridor planning is proposed. Firstly, a power corridor connectivity model is built, according to the relationship between the power corridor and the distribution network frame. The set of power-feeding paths is obtained using the depth-first traversal algorithm. The effectiveness of the power corridor planning scheme is evaluated by the comprehensive planning cost. Next, a bi-level optimization model of power corridors in distribution networks is formed based on the thought of decomposition and coordination. Finally, a nested discrete particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to solve the problem. The outer layer of PSO algorithm takes the minimum cost of power corridor planning as the optimization objective, and the inner layer of PSO algorithm takes the minimum cost of distribution network planning as the optimization objective. The simulation studies show that the proposed model can give consideration to the feasibility and economy of the later distribution network construction and get the optimal planning of electric corridors satisfying the load demand, which will benefit the protection of the corridor site and provide a reference for the construction of the distribution network.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901300).

Key words: distribution network; path description; power corridor; bi-level optimization; discrete particle swarm optimization algorithm

附录 A

表 A1 图 1 负荷路径集

Table A1 Load paths for example of fig.1

负荷节点	路径	路径节点	组合路径的廊道集
A	P_1^A	S,A	R_1
B	P_1^B	S,B	R_2, R_5
	P_2^B	S,C,B	R_2, R_5, R_6
C	P_1^C	S,C	R_2, R_6
	P_2^C	S,B,C	R_2, R_5, R_6

表 A2 电力廊道相关参数

Table A2 Related parameters of power corridor

廊道编号	廊道长度/km	投资建设成本/万元
R ₁	2.32	30.5
R ₂	3.10	12.37
R ₃	3.62	10.36
R ₄	2.87	8.03
R ₅	2.53	9.36
R ₆	3.56	6.35
R ₇	2.13	10.23
R ₈	3.09	17.36
R ₉	2.63	13.02
R ₁₀	2.98	15.79
R ₁₁	3.32	10.36
R ₁₂	4.28	22.71
R ₁₃	2.37	10.265
R ₁₄	3.36	16.37
R ₁₅	2.57	9.65
R ₁₆	2.58	8.43
R ₁₇	3.77	14.25
R ₁₈	2.32	6.03
R ₁₉	2.38	10.59
R ₂₀	2.42	8.85

表 A3 负荷点数据

Table A3 Load nodes data

节点编号	有功功率/MW	无功功率/Mvar
645	0.60	0.30
632	0.75	0.60
646	0.60	0.45
633	0.35	0.20
684	0.50	0.26
671	0.75	0.55
652	0.40	0.30
611	0.50	0.38
680	0.55	0.41
675	0.31	0.20

表 A4 DPSO 仿真参数

Table A4 DPSO simulation parameters

参数	数值	参数	数值
c_1	0.0135	ω_1	0.9
c_1	0.3678	ω_2	0.4
上层粒子个数	20	上层迭代次数	200
下层粒子个数	20	下层迭代次数	100

表 A5 路径规划结果

Table A5 Path planning results

路径编号	路径节点
1	S650-L632
2	S650-L632- L645
3	S650 -L632 -L645-L646
4	S650-L632-L645-L646-L684
5	S650-L632-L645-L646-L684-L611
6	S650-L632-L645-L646-L684-L611-L652
7	S650-L632-L633
8	S650-L632-L633-L671
9	S650-L632-L633-L671-L680
10	S650-L632-L633-L671-L680-L675-