

计及终端可靠性的配电终端优化布局方法

卢丹^{1†}, 张琳娟¹, 邱超¹, 郝建国¹, 李成²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 配电终端失效将影响配电网故障定位和故障隔离, 所以在配电终端规划中不考虑终端失效带来的影响是与实际不符的。为此提出了计及终端可靠性的配电终端优化布局方法, 该方法在考虑配电终端故障率和已安装终端与待选安装位置关联关系的基础上, 计算馈线各分段的终端安装重要度, 然后参照终端安装重要度进行配电终端的优化布局。将该方法应用于 RBTS-BUS2 系统, 仿真结果验证了该方法的有效性和寻优效率上的优越性。

关键词: 配电终端; 优化布局; 终端安装重要度; 可靠性评估

中图分类号: TM76

文献标识码: A

Optimal Placement of Distribution Terminal Considering Influence of Terminal Reliability

LU Dan^{1†}, Zhang Linjuan¹, QIU Chao¹, Hao Jianguo¹, Li Cheng²

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou, Henan 450052, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Distribution terminal failure will affect the power supply reliability of distribution network, so it is inconsistent with the reality that the impact of terminal failure is not considered in the optimal layout of distribution terminal. Therefore, a distribution terminal optimization layout method considering the terminal failure rate is proposed. Based on the consideration of the distribution terminal failure rate, this method calculates the installation importance of each node terminal of the distribution network according to the improvement of power supply reliability by installing the distribution terminal, and considers the influence of the installed terminal nodes on the installation importance of the remaining node terminals. Finally, the node installation importance is used to plan the terminal optimization layout. The proposed method are used to optimize the layout of terminal on RBTS-BUS2 system, the layout results verify the effectiveness and superiority of this method.

Key words: distribution terminal; optimization layout model; terminal installation importance; reliability evaluation

配电网故障时, 配电终端可辅助快速隔离故障, 减少用户停电时间, 从而提高供电可靠性。随着我国配电自动化建设和改造的推进, 为达到国家电网公司发布的《配电自动化规划设计技术导则》^[1] 配电自动化有效覆盖率指标要求, 各地市的配电网部署了大量的配电终端, 出于片面对供电可靠性的追求, 造成了三遥终端过度部署, 投资效益

降低, 同时由于终端自身故障或通信原因造成已建成项目的终端在线率并不理想, 对供电可靠性的改善不如规划预期。

配电终端优化布局是在满足供电可靠性等技术指标约束的前提下, 对配电终端安装数量及布局的策略进行寻优, 从而实现最优的经济效益。针对配电自动化终端优化布局问题, 目前国内外学者已

收稿日期: 2024-12-09

基金项目: 河南省电力公司技术项目(HJS2100103)

作者简介: 卢丹(1981—), 男, 河南新乡人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 配电自动化规划, 主动配电网技术。

† 通信联系人, E-mail: ludan_hanson@163.com

经进行了一系列研究。文献[2]在假设负荷均匀的前提下,从供电可靠性及投入产出比的角度分析需要安装三遥、二遥终端的数量。对于大规模配电网的终端数量规划具有指导意义。文献[3]指出馈线自动化终端布点优化是一个 NP 难的非线性组合优化问题,随着待配置配电网的规模增大,计算量呈指数增长,存在组合爆炸问题。文献[4]建立了故障指示器和分段开关选址的混合整数优化模型,并利用第三方优化器 Gurobi 进行求解,但模型中没有考虑终端故障的影响。文献[5]~[7]考虑了智能终端自身的故障率并采用混合整数优化模型对配电自动化终端布局进行求解,通过仿真验证了终端故障对优化方案的影响,但考虑终端故障时寻优时间会有显著增加,甚至可能增长 1000 倍,所以不适用于大规模配网的终端布局规划。文献[8]采用遗传算法对配电自动化终端布局模型进行求解,所提方法能够解决小规模具体配电网中终端配置规划问题,但是对于大规模配电网,遗传算法的求解效率及稳定性可能无法满足要求。文献[9]将粒子群算法和萤火虫算法分别用在终端优化布局的选点和选型上,一定程度上提高了智能算法的求解效率。文献[10]分析了基于二遥和三遥终端配置数量的供电可靠性评估公式,但无法直接指导配电终端配置规划。文献[11]提出了一种配电自动化终端分步选型选址方法。先设定最低的二遥、三遥终端数量,然后根据节点的重要度选择终端类型。该方法能够提高寻优效率,但是终端选址时没有考虑耦合关系对重要度的影响。文献[12]提出了综合考虑二、三遥的基于重要度排序策略,但是没有考虑终端故障对排序的影响。

由于二遥、三遥存在的终端故障导致许多地市配电自动化在实施过程中并不能达到设计预期。本文提出的考虑配电终端故障率及终端位置关联关系的终端优化布局算法,通过分析在不同位置安装三遥及二遥配电终端对供电可靠性的提升大小来计算终端安装重要度,在设计布局阶段考虑了终端故障对供电可靠性的影响,与配电自动化的运维实际情况更加相符,同时在规划中以终端重要度作为参考可显著提高寻优效率。

1 配电终端布局优化模型

配电终端优化布局的目标是等年值综合费用 C_{year} 最小:

$$C_{\text{year}} = C_1 + C_R + C_E \quad (1)$$

式中, C_1 为设备投资等年值费用, C_R 为设备年运行维护费用, C_E 为用户年停电损失。

$$C_1 = \left(\sum_{k=1}^M N_k C_{zk} \right) \frac{i(1+i)^{n_k}}{(1+i)^{n_k} - 1} \quad (2)$$

式中, M 为设备种类数量; N_k 表示第 k 种终端数量; C_{zk} 表示第 k 种终端的单价; i 为贴现率; n_k 为第 k 种设备的使用年限^[12]。

C_R 由设备投资年等值费用的百分比给出,通常取 $0.03 C_1$, C_E 与故障率和终端的配置布局等因素有关。

配电终端优化布局的约束条件为供电可靠率 (ASAI) 满足式(3)

$$\text{ASAI} \geq \text{ASAI}_{\text{set}} \quad (3)$$

式中, ASAI 为优化过程中规划区域的实际供电可靠率, ASAI_{set} 为规划区域的供电可靠率阈值下限。

2 配电终端安装重要度计算

配电终端安装重要度用来表示在某位置配置终端后对供电可靠性提高的贡献大小,与配电网故障处理流程有关。

2.1 配电网故障处理流程

图 1 给出了馈线发生故障时的处理流程。

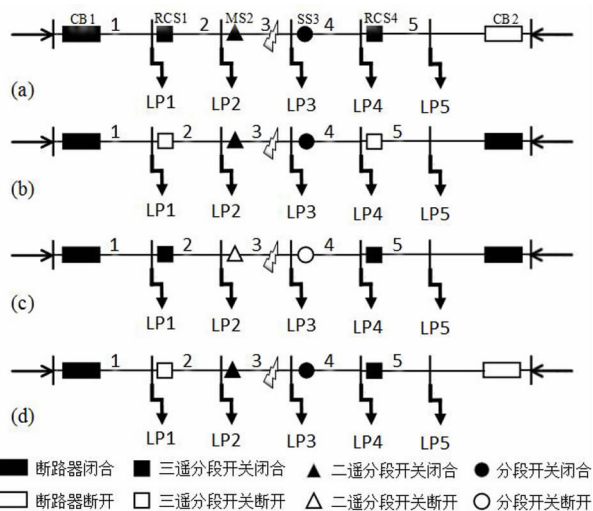


图 1 馈线故障示意图 1

如图 1 (a) 所示, 馈线段 3 故障发生前所有三遥及二遥分段开关都处于闭合状态, 主电源通过 CB1 向所有负载供电, 联络开关 CB2 断开。图 1 (b) 所示为馈线段 3 发生故障后, 自动故障隔离后各开关的状态, 其过程为主站接收到配电终端上传的遥测和遥信信息, 根据故障定位算法^[13-14] 将故

障定位在 MS2 和 RCS4 之间,该区域称为自动故障定位区域,然后主站遥控离故障区域最近的三遥 RCS1 和 RCS2 分闸,接着 CB1 和 CB2 迅速重新合闸,恢复 LP1 和 LP5 的供电,该部分停电时间为故障定位时间及开关自动分合闸时间之和 t_1 。图 1(c)所示为工作人员现场查找并确定故障位置后,手动断开 MS2 和 SS3,然后合上 RSC1 和 RCS4,则 LP2 和 LP4 的停电时间为故障查找时间 t_2 和手动分合闸时间 t_3 之和。LP3 则需要先在故障修复以后才能恢复供电,故障修复后开关状态最终会回到图 1(a),LP3 的停电时间为故障查找时间 t_2 、开关手动分合闸时间 t_3 及故障修复时间 t_4 之和。图 1(a)~(c)是所有配电终端在无故障情况下的情况,图 1(d)所示为 RCS4 发生故障时,在现场处理故障前各配电终端的状态,由于 RCS4 无法自动分闸,LP5 的停电时间将从 t_1 增加到 $t_2 + t_3$ 。

2.2 三遥终端安装重要度计算

故障发生后,馈线上安装的三遥通过遥控分合闸可以让部分负荷恢复供电,但馈线故障位置不同,通过遥控分合闸在 t_1 后能恢复供电的负荷点集合是不同的。如图 2(a)~(b)所示,三遥分段开关安装在馈线第 4 段,当故障发生在馈线第 5 段时, {LP1, LP2, LP3} 的停电时间降低到 t_1 ,当故障发生在馈线第 3 段时, {LP4, LP5} 的停电时间降低到 t_1 。同样当馈线故障在同一位置,但三遥分段开关安装位置不同时,在 t_1 时间后能恢复供电的负荷点集合是不同的。如图 2(b)~(c)所示,馈线故障都发生在第 3 段,但图 2(c)中当三遥分段开关安装在馈线第 2 段时, {LP1} 的停电时间降低到 t_1 。

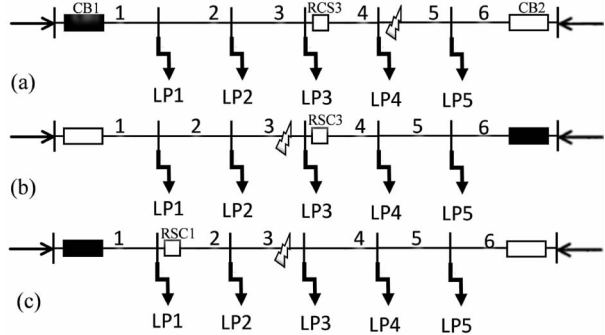


图 2 馈线故障示意图 2

为了表示安装三遥终端后能通过遥控分合闸降低停电时间的负荷集合,参照馈线基段影响矩阵^[15]以及图 2 中的馈线结构构造负荷影响矩阵 T_{RSC}^1 ,上标 1 表示安装首个三遥。

$$T_{RSC}^1 =$$

$$\begin{bmatrix} \{2,3,4,5\} & \{3,4,5\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{3,4,5\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{1,2,3\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{1,2,3\} & \{1,2,3,4\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$T_{RSC}^1(i, j)$ 表示馈线 $(j + 1)$ 段安装了三遥终端,当馈线 i 段发生故障时,能通过遥控分合闸恢复供电的负荷点集合,为了简化此处仅取负荷点的标识数字,比如 {1} 即代表负荷 {LP1}。

忽略三遥对降低故障查找时间的影响,将三遥终端安装重要度 $I_{RSC}^1(j)$ 定义为在馈线 $(j + 1)$ 段配置三遥终端后,不同馈线段发生故障时,通过遥控分合闸恢复供电的负荷量加权。

$$I_{RSC}^1(j) = \sum_{i=1}^{n_L} p_i \left(\sum_{k \in T_{RSC}^1(i, j)} P_k \right) \quad (5)$$

上式中各变量定义如下: n_L 表示馈线段总量, p_i 表示第 i 段线路故障率, $T_{RSC}^1(i, j)$ 是负荷影响矩阵中第 i 行 j 列的集合元素; P_k 表示负荷点功率。

在安装后续三遥终端时,通过遥控分合闸降低停电时间的新增负荷集合将会受到已安装三遥的影响,参考图 3。

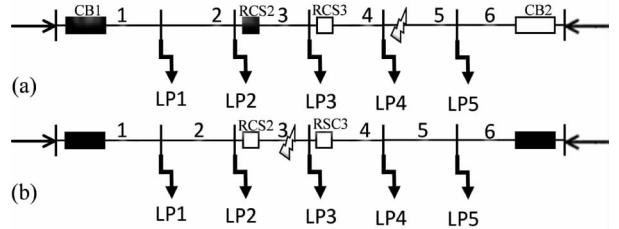


图 3 馈线故障示意图 3

图 3(a)所示,首个三遥安装位置为馈线段 4,如果新增第二个三遥安装位置为馈线段 3,则当故障发生在馈线段 5 时,不会有新增负荷可通过遥控分合闸降低停电时间。但若故障位置发生在馈线段 3,则 {LP1, LP2} 将通过遥控分合闸降低停电时间。安装第 2 个三遥终端所对应的负荷影响矩阵 T_{RSC}^2 如式(6) T_{RSC}^2 可以通过从 $T_{RSC}^1(i, j)$ 中删除 $T_{RSC}^1(i, 3)$ 去除包含的元素得到, $T_{RSC}^1(i, 3)$ 中的 3 对应前一次安装三遥所选的位置。后续三遥不可能继续选择在馈线段 4 安装,所以 T_{RSC}^2 第 3 列所有元素都为空集。

依此类推可得到第 m 次配置三遥时负荷影响矩阵 T_{RSC}^m ,并依此计算第 m 个三遥安装在 $(j + 1)$

段的重要度 $I_{RSC}^m(j)$ 的计算公式如(7)所示。

$$\mathbf{T}_{RSC}^m = \begin{bmatrix} \{2,3\} & \{3\} & \{\} & \{\} \\ \{1\} & \{3\} & \{\} & \{\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{\} & \{\} \\ \{\} & \{\} & \{\} & \{5\} \\ \{\} & \{\} & \{\} & \{4\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I_{RSC}^m(j) = \sum_{i=1}^{n_L} p_i \left(\sum_{k \in T_{RSC}^m(i,j)} P_k \right) \quad (7)$$

2.3 考虑终端故障率的三遥终端重要度

已安装三遥终端如果发生故障,将会影响后续待选位置的安装重要度计算,但与某特定馈线故障处理相关的多个三遥终端同时失效的概率远小于单个终端失效,所以后续计算中仅考虑单个三遥失效对供电可靠性的影响。

令三遥发生故障的概率为 α ,则 $(s+1)$ 段已安装三遥失效对待选 $(j+1)$ 段三遥安装重要度影响值 $I_{RCS}^{m,s}(j)$ 可以定义为由于三遥失效导致的无法通过遥控分合闸恢复供电的负荷量加权。

$$I_{RCS}^{m,s}(j) = \alpha \left[\sum_{i=1}^{n_L} p_i \left(\sum_{k \in T_{RCS}^{m,s}(i,j)} P_k \right) \right] \quad (8)$$

$T_{RCS}^{m,s}(i,j)$ 表示馈线第 i 段发生故障,如选在 $(j+1)$ 段安装第 m 个三遥时,由于 $(s+1)$ 段已安装三遥失效导致无法通过遥控分合闸恢复供电的负荷点集合。

如图2所示,若首个三遥安装在馈线段4,则其失效时 $T_{RCS}^{m,s}(i,j)$ 如式(9)所示。

$$\mathbf{T}_{RCS}^{m,s}(i,j) = \begin{bmatrix} \{4,5\} & \{4,5\} & \{\} & \{5\} \\ \{\} & \{4,5\} & \{\} & \{5\} \\ \{\} & \{\} & \{\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{\} & \{\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{\} & \{1,2,3\} \end{bmatrix} \quad (9)$$

第 m ($m > 1$) 个三遥安装在馈线 $(j+1)$ 段的重要度 $I_{RCS}^{m,all}(j)$ 包含两个部分,一是不考虑已选终端发生故障的部分 $I_{RCS}^m(j)$,另一是考虑已安装三遥中有单个故障时对重要度的影响值 $I_{RCS}^{m,plus}(j)$ 有:

$$I_{RCS}^{m,all}(j) = (1-\alpha)n - 1I_{RSC}^m(j) - I_{RCS}^{m,plus}(j) \quad (10)$$

其中 $I_{RCS}^{m,plus}(j)$ 为:

$$I_{RCS}^{m,plus}(j) = \sum_{s \in S_{m-1}} \alpha(1-\alpha)^{n-2} I_{RCS}^{m,s}(j) \quad (11)$$

S_{m-1} 为在选取第 m 次三遥安装位置时,已安装的 $(m-1)$ 个三遥位置集合。

2.4 二遥终端安装重要度计算

主站由已安装二遥终端及三遥终端提供的信息确定故障位置,可减小故障查找时间。 $T_{MS}^m(i,j)$ 表示在安装第 m 个二遥终端时,如在馈线 $(j+1)$ 段配置二遥终端且馈线 i 段发生故障,无需排查

故障的馈线段集合。式(12)给出了安装首个二遥,且馈线中未安装三遥时的无需排查故障的馈线段集合矩阵。

$$\mathbf{T}_{MS}^1 = \begin{bmatrix} \{2,3,4,5\} & \{3,4,5\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{3,4,5\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{4,5\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{1,2,3\} & \{5\} \\ \{1\} & \{1,2\} & \{1,2,3\} & \{1,2,3,4\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

设 L_i 为第 i 段馈线的长度,整条馈线总长度为 L_{total} 。将二遥终端安装重要度 $I_{MS}^m(j)$ 定义为在 $(j+1)$ 段配置第 m 个二遥终端以后,各馈线段发生故障时,停电时间减小的负荷量的加权和[12]。

$$I_{MS}^m(j) = \sum_{i=1}^{n_L} p_i (P_{MS}^{m,i}) \left(\frac{\sum_{k \in T_{MS}^{m,i}(i,j)} L_k}{L_{total}} \right) \quad (13)$$

$P_{MS}^{m,i}$ 为在安装第 m 个二遥时,若第 i 段馈线发生故障,不能通过遥控分合闸恢复供电的负荷量总和。

当馈线 $(s+1)$ 段三遥或二遥终端失效时(考虑三遥失效时也无二遥功能)对 $(j+1)$ 段安装第 m 个二遥安装重要度影响值 $I_{MS}^{m,s}(j)$ 可以定义为二遥失效导致的停电时间增加的负荷量加权和。

$$I_{MS}^{m,s}(j) = \alpha \left[\sum_{i=1}^{n_L} p_i (P_{MS}^{m,i}) \left(\frac{\sum_{k \in T_{MS}^{m,s}(i,j)} L_k}{L_{total}} \right) \right] \quad (14)$$

其中 $T_{MS}^{m,s}(i,j)$ 表示馈线第 i 段发生故障时,由于终端失效导致的故障查找时间增长的馈线分段集合。

参照式(15)可知第 m ($m > 1$) 个二遥安装在馈线 $(j+1)$ 段的重要度 $I_{MS}^{m,all}(j)$ 也分为两个部分:

$$I_{MS}^{m,all}(j) = (1-\alpha)n - 1I_{MS}^m(j) - I_{MS}^{m,plus}(j) \quad (15)$$

其中 $I_{MS}^{m,plus}(j)$ 为

$$I_{MS}^{m,plus}(j) = \sum_{s \in S_{m-1}} \alpha(1-\alpha)^{n-2} I_{MS}^{m,s}(j) \quad (16)$$

需要指出的是,由于三遥终端也具有二遥的功能,所以 $I_{MS}^m(j)$ 和 $I_{MS}^{m,plus}(j)$ 的计算中需要考虑已安装三遥终端。

3 基于重要度排序的配电终端布局

终端布局流程如图4所示,通过枚举二遥和三遥终端数量和位置不同的方案来实现,逐次增加三遥终端,对三遥进行布局后枚举可能的二遥布局,针对满足约束条件的布局方案计算等年值综合费用值,从而获得综合费用值最小的布局方案。需要指出的是无论对三遥还是二遥的布局都参考了终

端重要度,优先在终端重要度大的位置进行布局,当增加二遥终端且综合费用也增加时则需增加三遥终端数量后重新进行二遥终端的布局,当增加三遥终端时综合费用也增加则布局结束。可见本布局流程与文献[5]中混合整数规划的方法相比,不会枚举所有可能的布局方案从而具有更快的寻优能力;另外,由于重要度的计算仅考虑了对供电可靠性提高的主要因素,这有利于降低计算代价,但却可能无法获取最优方案。

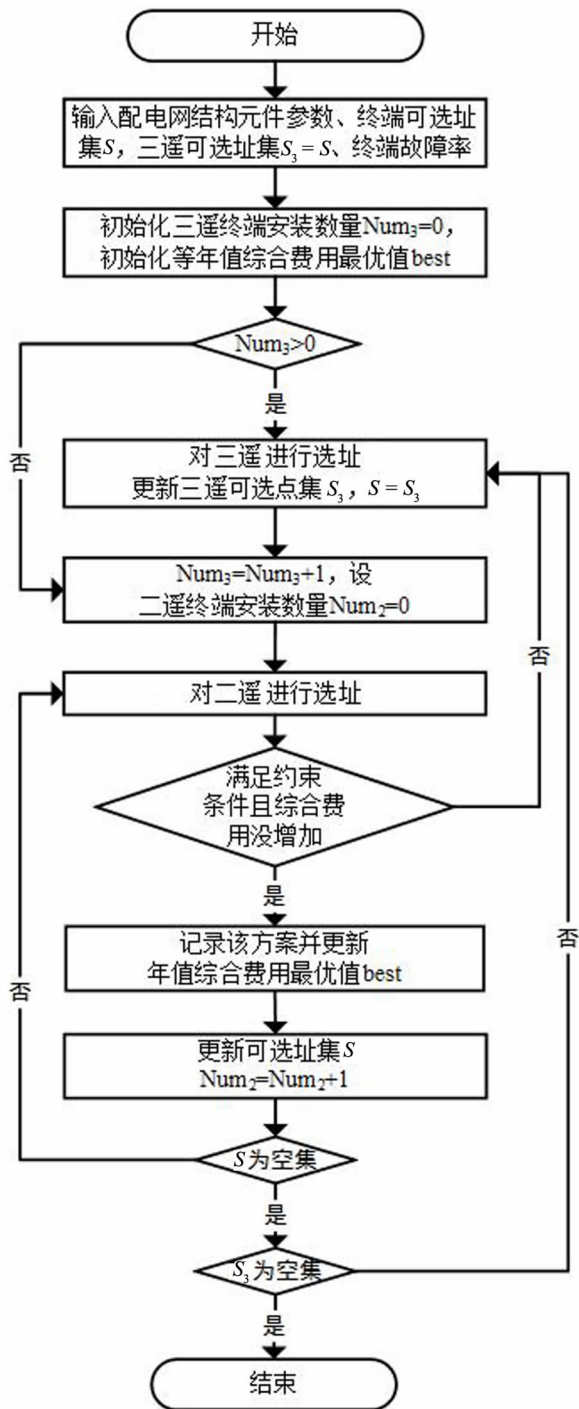


图 4 终端布局流程图

4 实例分析

选 IEEE RBTS BUS2 作为配电终端优化布局仿真模型,如图 5 所示。线路长度等参数见文献[16]。

对 S1~S10 处分段开关的选型和布局进行仿真,仿真中设定分支馈线已安装出线断路器和熔断器,且联络开关处已安装三遥终端,各点负荷调整为原负荷的 2 倍,终端设备费用等见文献[8],其中三遥终端及其配套的通信设备单价为 5.4 万元/组,二遥终端及其配套的通信设备单价为 1.05 万元/组。设备的使用寿命为 10 年;年运行维护费用占投资费用的 3%,贴现率取 10%,单位停电电量电价设为 11.25 元/kWh。终端故障概率取值参见文献[5],其中三遥终端故障概率取 0.02,二遥终端故障概率取 0.015。故障处理过程中的时间参数如表 1^[1]所示。

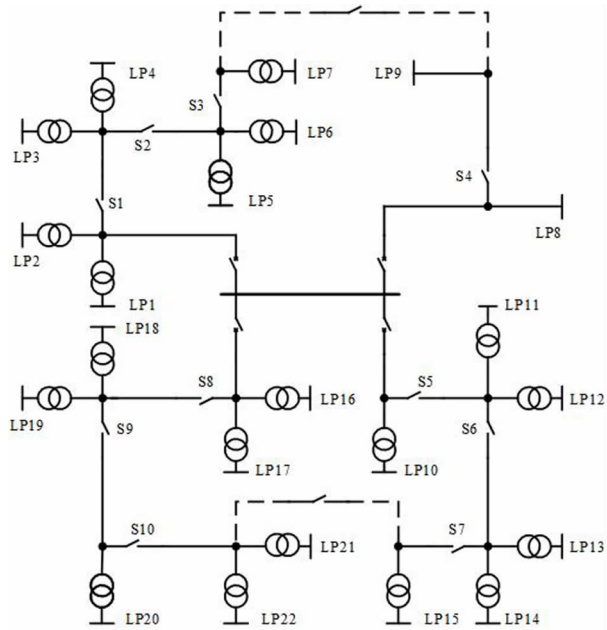


图 5 IEEE RBTS BUS2 算例图

表 1 时间参数

参数类别	整条线路故障查找时间	线路故障修复时间	开关自动切换时间	开关手动切换时间
时间/h	2	4	0.05	1

在 S1~S10 都没配置配电终端的情况下,系统供电可靠率指标为 99.988%,将供电可靠率指标约束值 ASAI_{set} 设为 A 类地区供电可靠率要求值 99.99%^[1]。

分别运用本文方法、文献[5]中混合整数规划方法以及遗传算法三种方法对该系统进行终端优

化布局,遗传算法的参数设置为:种群规模 50,最大迭代次数为 20,交叉率 0.8,变异率 0.2,终端布局结果及结果取 20 次计算中的最优解,计算时间为 20 次计算的平均时间。

表 2 给出了各方法仿真的对比结果,表 2 前三行结果是三种方法在不考虑配电终端故障率的情况下的优化布局,本文方法耗时最短且布局结果与混合整数规划方法一致,混合整数规划方法规划时间稍长,但在不计终端故障时与本文方法差别不大,遗传算法耗时最长且 20 次仿真中还有 1 次未获得全局最优。当考虑配电终端故障时,本文方法与混合整数规划方法仍然都获得了最优布局方案,

表 2 RBTS-BUS2 终端布局优化结果

方法	终端类型	安装位置	计算时间/s	供电可靠率/%	等年值综合费用/万元	设备一次投资费用/万元	设备年投资费用/万元	年运行维护费用/万元	年停电损失费用/万元
本文方法 不计故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S8	0.0529	99.9925	18.1455	19.35	3.1491	0.0945	14.9019
文献[5] 不计故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S8	0.0914	99.9925	18.1455	19.35	3.1491	0.0945	14.9019
遗传算法 不计故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S8	4.29	99.9925	18.1455	19.35	3.1491	0.0945	14.9019
本文方法 考虑故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S7,S8	0.473	99.9924	18.5202	20.4	3.32	0.0996	15.1006
文献[5] 考虑故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S7,S8	17.572	99.9924	18.5202	20.4	3.32	0.0996	15.1006
遗传算法 考虑故障	三遥 二遥	S2,S6,S9 S1,S4,S7,S8	179.351	99.9924	18.5202	20.4	3.32	0.0996	15.1006

5 结论

针对配电自动化终端优化布局问题,提出了一种考虑终端故障率的配电终端优化布局方法,该方法与配电自动化系统的实际情况更相符合。

优化布局中通过分析不同终端配置在不同位置对供电可靠性提升的差异来评估终端重要度,重要度的计算过程中考虑已配置终端发生故障时对剩余位置重要度的影响。应用本文方法对 RBTS-BUS2 模型进行终端优化布局,结果表明相较于遗传算法以及混合整数规划方法,在保证终端布局结果质量的同时,本文的方法计算效率有明显的优势,对于求解大规模终端优化布局问题有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 配电自动化规划设计技术导则:Q/GDW 11184—2014[S]. 北京:国家电网公司,2013.
- [2] 刘健,程红丽,张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):44—50.
- [3] 杨强. 基于和声搜索算法的含分布式电源配电网重构研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [4] LI B, WEI J, LIANG Y F, et al. Optimal placement of fault indicator and sectionalizing switch in distribution networks[J]. IEEE Access, 2020(8):17619—17631.

该方案与不计故障的布局结果有所不同,差别在于为了满足供电可靠性的约束增加了一个二遥终端,而且由于考虑了终端故障率对供电可靠性的影响,虽然增加了一个二遥终端但供电可靠率反而略有下降。从计算时间来看,两种方法在考虑终端故障率时的优化布局耗时都大大增加,但本文方法与混合整数规划方法的时间差别被拉大到将近 30 倍。其原因在于本文方法参考了终端安装重要度,优先在对供电可靠率提升显著的位置进行终端布局,所以在寻求等年值费用最低的目标时,并不会对所有可能的布局方案进行枚举,从而降低了考虑终端故障率所带来的计算代价。

- [5] FARAJOLLAHI M, FOTUHI M, SAFDARIAN A, et al. Optimal placement of sectionalizing switch considering switch malfunction probability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):403—413.
- [6] KHANI M, SAFDARIAN A. Effect of sectionalizing switches malfunction probability on optimal switches placement in distribution networks[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2020 (119) : 105973—105984.
- [7] MAJID S, MAHMOUD-REZA H, MANSOUREH Z. A hybrid method for recloser and sectionalizer placement in distribution networks considering protection coordination, fault type and equipment malfunction[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021(15) : 217—2190.
- [8] 李子韵,成乐祥,王自桢,等. 配电自动化终端布局规划方法[J]. 电网技术,2016,40(4) : 1271—1276.
- [9] 刘小春,伍惠敏,李映雪,等. 配电自动化终端配置的双层优化模型[J]. 电力系统保护与控制,2020, 48(24) : 136—144.
- [10] 荣秀婷,赵峰,朱刘柱,等. 基于配电自动化终端配置方案的供电可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(1):1—7.
- [11] 胡智豪,童宁,刘琦,等. 计及通信可靠性影响的配电终端分段选址选型及组网策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(13) : 89—97.
- [12] 李猛,张庆庆,许长青,等. 基于重要度排序的配电自动化终端优化布局方法[J]. 计算技术与自动化, 2022, 4(41) : 33—39.
- [13] 赵晓慧,梁标,李海波,等. 城市配网自动化可靠性评估与成本效益分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1) : 73—79.
- [14] 商海涛,吴林,赵渊,等. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5):129—135.
- [15] 周劭,张波,杨红磊,等. 基于终端配置影响关系的可靠率评估算法[J]. 电测与仪表,2021,58(2) :19—24.
- [16] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes: basic distribution system data and results [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991,6(2):813—820.