

基于元件故障率曲线的配电网可靠性评估和 配电终端优化配置

刘坤¹, 王克文¹, 祁小鹏²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 山东省城市服务技术学院, 山东 烟台 264000)

摘要: 为准确评估配电网的可靠性, 提升配电终端优化配置的效率, 提出一种基于浴盆形故障率函数的配电终端优化方法。运用 Weibull 分布对元件故障率浴盆曲线进行建模, 用基于逆流传递和顺流归并的可靠性快速评估方法对配电网可靠性进行评估。在考虑元件故障率浴盆曲线的基础上, 结合配电终端优化的特点, 对配电终端的优化配置进行定性分析。此后, 采用定量计算的方法, 验证配电终端的可靠性是否满足要求。结果表明, 该方法与遗传算法、动态规划、蚁群算法等优化方法相比, 计算量较少。算例验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 浴盆曲线; 可靠性; 配电终端; 优化配置

Reliability evaluation and distribution terminal optimal configuration of power distribution system based on bathtub curve of component failure rate

LIU Kun¹, WANG Kewen¹, QI Xiaopeng²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Shandong City Service Technology Institute, Yantai 264000, China)

Abstract: In order to accurately assess the reliability of distribution network and improve the efficiency of power distribution terminal optimization, this paper puts forward a kind of distribution terminal optimization method based on the tub shape of failure rate function. The Weibull distribution is applied in modelling bathtub curve of component failure rate, and based on the up-stream delivering and down-stream merging of reliability indices of distribution system reliability evaluation method, the reliability of the distribution network is evaluated. Considering the bathtub curve of component failure rate and according to the typical characteristics of distribution terminal optimization, the power distribution terminal configuration is optimized with qualitative analysis. Hereafter, the method of quantitative calculation is adopted to verify the reliability of the power distribution terminal whether meets the requirements. The results show that compared with other optimization methods, such as genetic algorithm, dynamic programming and ant colony algorithm, the method requires less amount of calculation. The correctness and validity of the method are verified by an aerial wire example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307071).

Key words: bathtub curve; reliability; power distribution terminal; optimal configuration

0 引言

随着微电网的接入和配电网作用的提升, 配电网可靠性和经济性越来越受到人们的关注。配电终端的配置对可靠性和经济性有直接的影响, 开展对配电网可靠性和配电终端配置的研究具有重要意义。

配电网可靠性评估方法主要分为模拟法和解析法两大类。模拟法^[1-3]是用抽样的方法进行状态选择,

通过统计的方法得到可靠性指标, 此方法需要模拟数量巨大的运行方式, 计算比较费时。因此, 解析法在工程上得到了广泛应用。传统解析法是故障模式影响分析(Failure Mode Effect Analysis, FMEA)法^[4-5], 然而 FMEA 法计算量大、速度慢。为此, 在 FMEA 的基础上, 后人进行了一些改进, 提出了最短路法^[6]、故障遍历法^[7]、回溯法^[8]、网络等值法^[9]等, 这些算法在可靠性评估时, 计算的速度提高了, 但是可靠性指标的准确度却下降了。

在配电终端的优化方法上, 文献[10-12]分别采

用遗传算法、动态规划法、模拟退火方法,为配电终端的优化提供了新的方法和思路,但由于配电终端优化属于非线性的组合优化,且需要考虑复杂的约束条件,优化计算过程较复杂。

在进行配电网可靠性评估和配电终端优化时,一般不考虑元件故障率浴盆曲线^[10-12],即将元件的故障率视为常值,将开关的使用年限设定为一个固定值。这样求解,在满足一定的精度范围时,在工程上应用有一定的合理性。然而,本文为了使元件故障率更贴近实际,能体现元件在其整个寿命周期中对配电系统可靠性的影响^[13],从而将元件的故障率考虑得更加细化,运用了元件的故障率浴盆曲线。在考虑元件的故障率浴盆曲线后,在分析计算时会增加两方面的内容。其一:在配电终端优化配置时,需考虑整个设备使用周期内,配电网可靠性指标均满足要求,因为在设备的使用后期,由于元件故障率的上升,系统的可靠性水平会下降,这样可能会造成可靠性不满足要求的情况;其二:在配电终端优化时,需要优化开关的使用年限,因为考虑开关的故障率浴盆曲线后,开关如果配置过低,设备使用后期可靠性可能不满足要求,配置过高,则经济性不理想,为兼顾可靠性和经济性,开关有一个最佳使用年限。

本文运用 Weibull 分布对元件故障率浴盆曲线进行建模^[14-15];采用基于逆流传递和顺流归并的可靠性快速评估方法^[16]对配电网可靠性进行评估,可对含有一个备用电源的任意配电网进行可靠性快速评估,它不仅具有 FMEA 法的准确度,而且计算速度大为提高;针对配电网终端优化的典型特点^[17],提出一种较简单的方法对配电终端进行优化设计,即先采用定性分析确定配电终端的最优配置,然后采用定量计算验证可靠性是否满足要求。最后基于 Matlab 对架空线算例进行分析,验证了该方法的正确性和有效性。

1 故障率浴盆曲线建模

在元件故障率的建模中,常用的分布模型有 4 种:指数分布、正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布。其中,Weibull 分布便于描述浴盆曲线^[18]。

Weibull 模型故障率表达式为 $\lambda(t)$ 。

$$\lambda(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\gamma-1} \quad (1)$$

Weibull 模型的概率密度 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}} \quad (2)$$

式中, θ 和 γ 是正数,分别表示特征寿命和分布形状参数。当 θ 为定值、 γ 变化时,威布尔分布的故障率 $\lambda(t)$ 如图 1 所示,其中 θ 取值为 3.5。

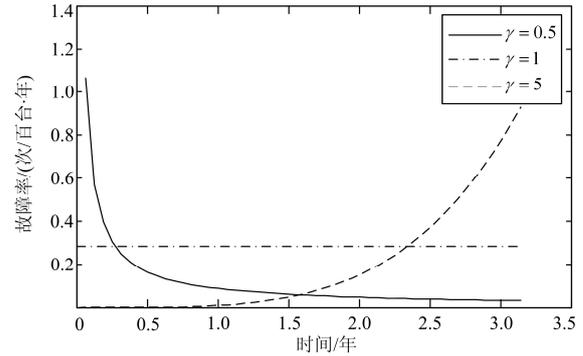


图 1 γ 变化时 Weibull 分布的故障率

Fig. 1 Failure rate of Weibull distribution as γ changes

故障率浴盆曲线的构造采用分段式构造法^[18],把故障率 $\lambda(t)$ 分成三段,分别对应 Weibull 分布形状参数 $\gamma < 1$, $\gamma \approx 1$, $\gamma > 1$,即可代表故障率前期迅速下降、中期恒定、后期递增的浴盆形状。

2 配电网可靠性评估

2.1 “主网络”、“支网络”和“并列片”

图 2 为某配电网的网架结构。如图中虚线框①所示,主网络指从主电源到备用电源之间的简化网络。如图中虚线框②所示,支网络指主网络上的每个分支。在支网络中,功率来自同一公节点的两个或多个电网片称并列片,在虚线框②中,线路 L37、L38 为并列片。

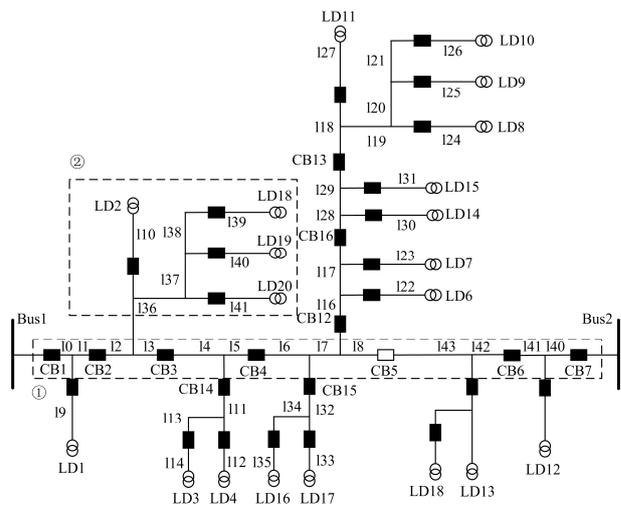


图 2 配电网网架结构

Fig. 2 Structure of power distribution network

2.2 基于逆流传递和顺流归并的可靠性评估算法

逆流传递是指: 在支网络的可靠性计算中, 对于某一个元件 e_j , 其下游元件故障对其上游元件可靠性的影响。顺流归并是指: 在支网络可靠性计算中, 对于某一个元件 e_j , 其上游所有元件故障对下游元件可靠性的影响。

基于逆流传递和顺流归并的可靠性评估流程如图3所示, 其基本步骤如下。

- (1) 计算支网络各节点的逆流可靠性指标。
- (2) 计算主网络的可靠性指标。

根据步骤(1), 可以得到支网络首节点的可靠性指标, 然后可将支网络等效成一个元件, 此时只剩下主网络, 主网络采用 FMEA 法计算各节点可靠性。

- (3) 计算支网络各节点的可靠性指标。

根据步骤(2), 可得到支网络首节点的顺流可靠性指标, 依据顺流归并可得到支网络各节点顺流可靠性指标, 综合顺流、逆流可靠性指标, 可得到支网络各节点的可靠性指标。

- (4) 计算系统可靠性指标。

根据步骤(3), 可以得到各负荷节点的可靠性指标, 进而可得到系统的可靠性指标。

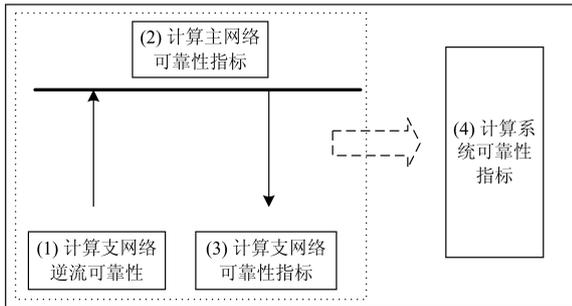


图3 可靠性计算流程

Fig. 3 Process of reliability calculation

2.3 支网络逆流可靠性指标

在支网络中, 下游元件对上游元件的可靠性影响拟通过可靠性指标的逆流传递计入。可靠性指标的逆流传递如图4所示。图中黑色实箭头表示功率流方向, 下方空心箭头表示故障率的逆流传递, e_j 为支网络中的某一元件, i_j 和 j 为元件的首末节点, λ_{jk}^u 和 r_{jk}^u 是下游所有元件的逆流可靠性指标, 即故障率和故障停电时间, $\lambda_{i,j,k}^u$ 和 $r_{i,j,k}^u$ 为元件 e_j 将其下游及其自身的可靠性指标传递到 e_j 上游的值。

支网络各节点 i 的逆流可靠性指标为

$$\lambda_i^u = \sum_{k \in \Omega_i} \lambda_{ik}^u \quad (3)$$

$$r_i^u = \left(\sum_{k \in \Omega_i} \lambda_{ik}^u r_{ik}^u \right) / \lambda_i^u \quad (4)$$

式中, Ω_i 为节点 i 的所有下游元件末节点的集合。

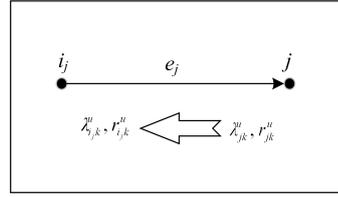


图4 可靠性指标的逆流传递

Fig. 4 Up-stream delivering of reliability indices

2.4 主网络可靠性指标

主网络各节点可靠性指标计算采用故障模式影响分析法。其中各支网络用一个等效元件替代, 其可靠性指标等于支网络首节点的逆流可靠性指标。

主网络中任一节点 i 的可靠性指标——故障停运频率 λ_i^s (次/年)、平均年停运时间 u_i^s (h/年) 和平均停运持续时间 r_i^s (h/次) 计算如下。

$$\lambda_i^s = \sum_{k \in \Omega_s} \lambda_k^e + \sum_{k \in \Omega_p} \lambda_h^e \quad (5)$$

$$u_i^s = \sum_{k \in \Omega_s} \lambda_k^e r_k^e + \sum_{k \in \Omega_p} \lambda_h^e r_h^e \quad (6)$$

$$r_i^s = u_i^s / \lambda_i^s \quad (7)$$

式中: Ω_s 和 Ω_p 分别为主网络中节点 i 上游和下游的节点集合; λ_k^e (λ_h^e) 为元件 k (h) 的故障率; r_k^e (r_h^e) 为元件 k (h) 的故障率导致节点 i 停运的时间。

2.5 支网络可靠性指标计算

2.5.1 支网络顺流可靠性指标

通过可靠性指标的顺流归并, 可以计算支网络各节点的顺流可靠性指标, 如图5所示。

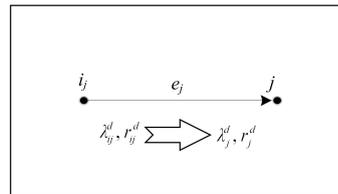


图5 可靠性指标的顺流归并

Fig. 5 Down-stream merging of reliability indices

如图5, 如果在节点 i_j 处, 一个上游元件 e_j 仅连接一个下游元件, 则元件 e_j 下游节点 j 的顺流可靠性指标——故障率 λ_j^e 和故障停电时间 r_j^e 计算如下。

$$\lambda_j^d = \lambda_{ij}^d + \lambda_j^e \quad (8)$$

$$r_j^d = (\lambda_j^d r_{ij}^d + \lambda_j^e r_j^e) / \lambda_j^d \quad (9)$$

式中, λ_j^d 和 r_j^d 为节点 i_j 的顺流可靠性指标, 分别对应故障率和故障停电时间。

如果在节点 i_j 处, 一个上游元件连接多个下游元件, 即除了连接 e_j 外, 还连接其他的元件, 此时记为, 以 e_j 为首的电网片有并列片。此时 e_j 下游节点 j 的顺流可靠性指标 λ_j^d 和 r_j^d 计算如下。

$$\lambda_j^d = \lambda_j^e + \lambda_{ij}^d + (\lambda_{ij}^u - \lambda_j^e - \sum_{k \in \Omega_j} \lambda_{ij,k}^u) =$$

$$\lambda_j^e + \lambda_{ij}^d + \sum_{k \in \Omega_j} \lambda_{ij,k}^u \quad (10)$$

$$r_j^d = (\lambda_{ij}^d r_{ij}^d + \lambda_{ij}^u r_{ij}^u - \sum_{k \in \Omega_j} \lambda_{ij,k}^u r_{ij,k}^u) / \lambda_j^d \quad (11)$$

式中, $(\lambda_{ij}^u - \lambda_j^e - \sum_{k \in \Omega_j} \lambda_{ij,k}^u)$ 为以 e_j 为首的电网片的所

有并列片在 i_j 节点的逆流可靠性指标。

2.5.2 支网络可靠性指标

综合逆流与顺流可靠性指标, 即得支网络各节点 i 的可靠性指标——故障停运频率 λ_i^s (次/年)、平均年停运时间 u_i^s (h/年) 和平均停运持续时间 r_i^s (h/次)。

$$\lambda_i^s = \lambda_i^u + \lambda_i^d \quad (12)$$

$$u_i^s = \lambda_i^u r_i^u + \lambda_i^d r_i^d \quad (13)$$

$$r_i^s = u_i^s / \lambda_i^s \quad (14)$$

2.6 配电网系统可靠性指标计算

在支网络各节点的可靠性指标得到之后, 也即意味着得到了各负荷点的可靠性指标, 则系统可靠性指标计算如下。

$$ASIAI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (15)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (16)$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad (17)$$

$$ENS = \sum L_a(i) U_i \quad (18)$$

式中: λ_i 、 U_i 、 $L_a(i)$ 分别为负荷点 i 的年停电率、年停电时间、负荷功率; N_i 为用户数。

3 配电终端优化配置

3.1 配电终端优化的目标函数、约束条件和变量

1) 目标函数

$$\min M \quad (19)$$

式中, M 为配电终端的投资。

2) 约束条件

(1) 可靠性约束

$$ASAI_i \geq ASAI_g \quad (20)$$

式中: $ASAI_g$ 为可靠性要求值; $ASAI_i$ 为每年的可靠性实际值, $i=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 开关使用年限约束

$$N \leq N_{\max} \quad (21)$$

式中: N 为开关的使用年限; N_{\max} 为开关的最大使用年限, 一般取 10 年。

变量

$$\begin{cases} \bar{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_i] \\ Y = N \end{cases} \quad (22)$$

其中: \bar{X} 变量表示配电终端的配置; x_i 为第 i 个配电终端的配置, 可取“二遥”终端或“三遥”终端; Y 变量为开关的使用年限。

3.2 配电终端优化配置的典型特点

配电终端优化配置的典型特点如下^[19]。

(1) 现阶段采用的开关一般配置“二遥”终端或“三遥”终端, 手动开关已经很少采用。

(2) “三遥”终端的费用远远高于“二遥”终端的费用。“二遥”终端通常采用无线通信, 费用较低, “三遥”终端一般采用光纤通信, 费用较高。

(3) 在“三遥”终端的投资费用中, 光纤所占比例较高, 且光纤的投资费用与其长度成正比。“三遥”终端的投资包括光纤、DTU、ONU 设备, 其中光纤约 2 万元/km, 所占投资比例较大。配置“三遥”终端所需光纤长度 L 可按如下方法计算: 如其到最近“三遥”终端的距离为 L_1 , 其到变电站距离为 L_2 , 则光纤长度 L 取两者的最小值。

(4) 网络中的“重要开关”, 如进线开关和备用电源联络开关, 对配电网可靠性有显著影响^[20-22]。

3.3 配电终端优化的新思路

综合配电终端配置的典型特点, 在配电终端优化时采取以下策略。

(1) 采用定性分析的方法对配电终端进行优化配置。

① 在初始年份可靠性指标要求较低时, 在满足可靠性约束时, 配电终端可以先采用较低的配置, 如“全二遥”终端; 随着年份的增加, 在可靠性指标要求提高时, 可逐步增加“三遥”终端。

② “三遥”终端增加的顺序可选择为: 先在重要位置——进线开关和联络开关增加“三遥”终端。如可靠性仍不满足要求, 则可按开关离变电站的距

离, 由近及远, 依次配置“三遥”终端。

(2) 采用定量计算的方法, 验证配电终端的配置是否满足约束条件。

对定性分析后的配电终端配置方案进行可靠性定量计算, 以验证可靠性是否满足要求。

3.4 配电终端优化配置的方法和步骤

步骤 1: 对变量 Y 进行优化, 即确定开关的使用年限。

结合图 6 说明如下。

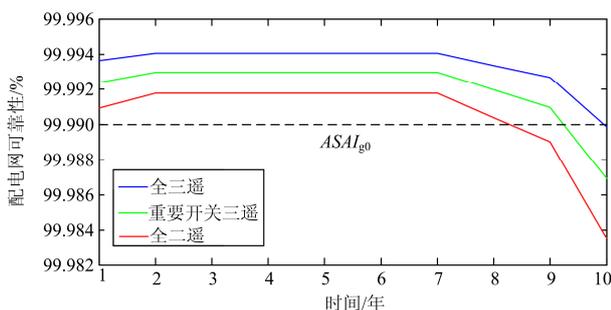


图 6 开关使用年限优化

Fig. 6 Optimization of switch service life period

首先, 选择 3 种典型的配电终端配置方案——“全二遥”、“重要开关三遥”、“全三遥”, 如表 1 所示。计算 3 种方案下每年的可靠性向量值 \overline{ASAI}_{ij} , 绘制成曲线如图 6 所示, 其中 i 表示 3 种组合方案, $i=1,2,3$, j 表示 1~10 年, $j=1, 2, \dots, 10$ 。

其次, 根据初始年份配电网可靠性要求值 $ASAI_{g0}$, 在保证 $\overline{ASAI}_{ij} \geq ASAI_{g0}$ 时, 优先采用较低的配置, 确定开关的使用年限。

如图 6, 如采用全二遥配置, 如开关的使用年限设为 8 年, 则可靠性满足要求, 如图中“全二遥曲线”, 在 1~8 年内, “全二遥曲线”均在配电网可靠性要求值 $ASAI_{g0}$ 上方, 可靠性满足要求。

表 1 3 种典型组合方案

Table 1 Three kinds of typical combination

配置方案	终端配置	目标函数
C_1	全二遥	M_1
C_2	进线开关及联络开关三遥	M_2
C_3	全三遥	M_3

步骤 2: 将变量 \bar{X} 的定义域分成 3 个区间 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$, 与之对应, 将可靠性值域分成 3 个区间 F_1, F_2, F_3 。

以下结合图 7 进行说明。

以变量 \bar{X} 取 3 种典型的配置方案为分界点, 定

义域的 3 个区间为

$$\Omega_1 [0, C_1], \Omega_2 [C_1, C_2], \Omega_3 [C_2, C_3]$$

可靠性 3 个区间计算过程如下。

在 1~ N 年内取每种组合下可靠性最小值, 记为 $ASAI_{L-i}, i=1,2,3$, 这 3 种可靠性指标将可靠性分成 3 个区间。

$$F_1 [0, ASAI_{L-1}]$$

$$F_2 [ASAI_{L-1}, ASAI_{L-2}]$$

$$F_3 [ASAI_{L-2}, ASAI_{L-3}]$$

步骤 3: 确定变量 \bar{X} 的取值区间, 即配电终端配置的范围。

如图 7, 可靠性要求值为 $ASAI_{g0}$, 可判断 A 点的可靠性值在 F_2 区间, 进而可判断 A 点自变量 $\bar{X} \in \Omega_2$, 此时可定性判断出 A 点的目标函数 $M_A: M_1 < M_A < M_2$ 。

步骤 4: 对配电终端的配置进行微调, 最终确定配电终端的配置方案。

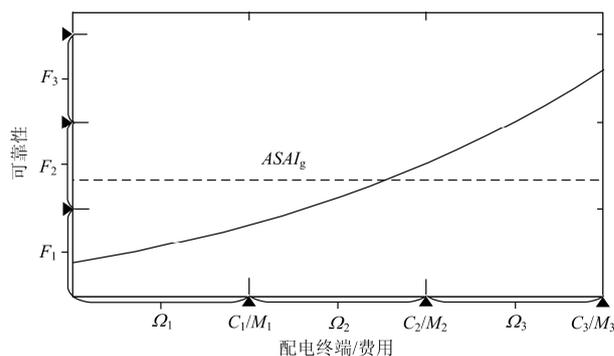


图 7 变量 \bar{X} 与可靠性对应关系

Fig. 7 Relationship between variable \bar{X} and reliability

根据 \bar{X} 不同的取值范围确定微调方案, 最终确定配电终端的配置, 如表 2 所示。

表 2 配电终端微调方案

Table 2 Power distribution terminal fine-tuning

可靠性区间	配电终端的配置方案
$ASAI_g \in F_1$	全二遥配置
$ASAI_g \in F_2$	重要位置配置三遥终端
$ASAI_g \in F_3$	在重要位置配置三遥终端的基础上, 逐步增加三遥开关, 直至可靠性满足要求

微调之后, 目标函数 M_A 是接近最优或是最优的。

步骤 5: 验算可靠性是否满足要求。

按确定的配电终端配置方案进行可靠性计算, 验算是否满足要求。

4 案例分析

以我国北方某城市 A 类供电区域配电网为例，采用以上所提到的方法，采用 Matlab 编程计算。

配电网网架结构如图 8 所示，该系统为一个带有分支馈线的 10 kV 配电系统，有负荷点 20 个，用户 86 户，主干线全长 16 km，负荷容量共 9 MW，各支路参数如表 3 所示，其他设备运行参数如表 4 所示。

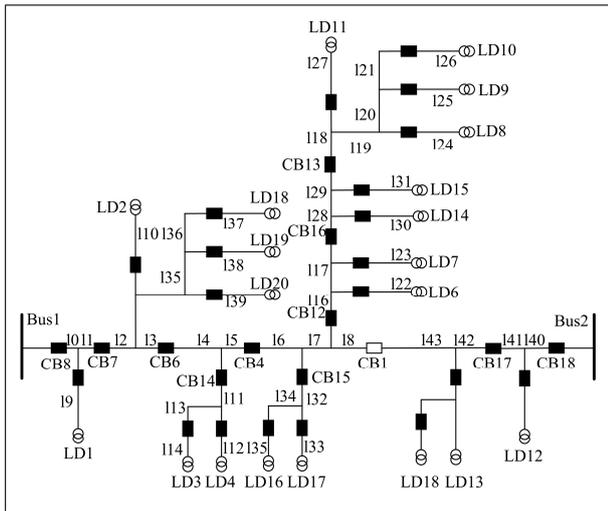


图 8 配电网网架结构

Fig. 8 Structure of power distribution system

表 3 各支路线路长度

Table 3 Length of each branch circuit

线路长度/km	线路编号
1.5	0, 2, 3, 6~8, 28, 30, 31
1	1, 4, 5, 29
0.5	9~12, 14~15, 22~27, 32~39
0.3	13
0.25	18
0.2	21
0.1	17, 19, 20
0.05	16

表 4 配电网设备运行参数

Table 4 Operation parameters of power distribution system

开关修复 时间/(h/ 台次)	三遥开关 开断时 间/h	手动开关 开断时 间/h	三遥开关 合闸时 间/h	手动开 关合闸 时间/h	人工故障定 位时间/ (h/km)	线路修复 时间/ (h/km:次)
1.2	0.03	0.3	0.03	0.3	0.4	1.2

开关及线路的故障率浴盆曲线分别如图 9 和图 10 所示。

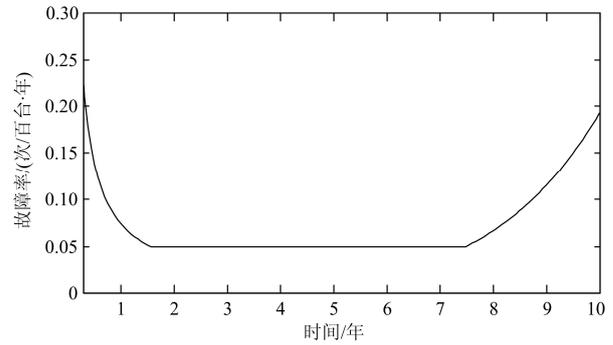


图 9 开关故障率浴盆曲线

Fig. 9 Failure rate bathtub curve of switch

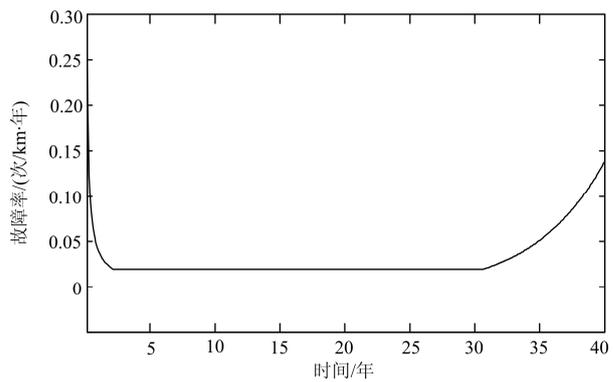


图 10 线路的故障率浴盆曲线

Fig. 10 Failure rate bathtub curve of line

该地区各规划年可靠性要求值如表 5 所示。

表 5 各规划年可靠性要求值

Table 5 Reliability required value of each planning year

年份	2017	2025	2030
ASAI _g /%	99.992	99.9925	99.993

各典型配置方案下的供电可靠性如表 6 所示。

表 6 各典型方案下的供电的可靠性

Table 6 Power supply reliability of each typical scheme

年份	方案 1	方案 2	方案 3
第 1 年	99.9909	99.9924	99.9936
第 2 年	99.9912	99.9926	99.9938
第 3~7 年	99.9918	99.9930	99.9941
第 8 年	99.9904	99.9921	99.9934
第 9 年	99.9890	99.9910	99.9927
第 10 年	99.9835	99.9869	99.9899

根据 3.4 节步骤 1，在初始年——2017 年取方案 2 的配置，并取开关的使用年限为 8 年。

根据 3.4 节步骤 2，在开关使用年限内，供电可靠性的最小值 $ASAI_{L-i}$ 如表 7 所示。

表 7 各典型配置 8 年内可靠性最低值

Table 7 Lowest reliability of typical configuration among 8 years

方案	1	2	3
可靠性/%	99.990	99.9921	99.9934

可靠性值域的 3 个区间为

$$F_1 [0, 99.990]$$

$$F_2 [99.990, 99.9921]$$

$$F_3 [99.9921, 99.9934]$$

根据 3.4 节步骤 3、步骤 4, 按不同目标规划年 $ASAI_{gt}$ 所在区间, 确定配电终端配置方案所在区间; 再对配电终端配置方案进行微调, 最终得配电终端配置方案, 结果如表 8 所示。

表 8 各规划年配电终端配置

Table 8 Power distribution terminal configuration of each plan year

年份	配电终端最终配置
$ASAI_{g2017} \in F_2$	重要开关三遥
$ASAI_{g2025} \in F_3$	重要开关三遥且 CB2, CB3 三遥
$ASAI_{g2030} \in F_3$	重要开关三遥且 CB2, CB3, CB4 三遥

对配电终端配置方案进行可靠性验证。在开关使用年限内, 对各配置方案下可靠性的最低值进行验证, 如表 9 所示。

表 9 验证各配置方案

Table 9 Verification of each configuration scheme

可靠性	配置一	配置二	配置三
	2017	2025	2030
实际值	99.9921	99.9926	99.993 07
要求值	99.992	99.9925	99.993

经过验证, 通过表 9 可以看出, 各配置方案可靠性均满足要求。

该电网阶段性的配电终端优化结果为: 2017 年, 在重要位置配置“三遥”终端, 其余位置配置“二遥”终端; 2025 年, 增加 CB2, CB3 配置“三遥”终端; 2030 年后, 增加 CB4 配置“三遥”终端。

该方法在初始年采用相对较低的配置, 在可靠性标准要求逐步提高时, 逐步增加“三遥”终端的配置, 既确保了可靠性和经济性, 也避免了大拆大建和重复建设, 在工程实际中有较好的可拓展性。

5 结论

基于元件故障率浴盆曲线对配电网可靠性进行评估, 在此基础上, 根据配电终端优化的典型特点, 提出一种简单的方法对配电终端进行优化配置。该

方法采用定性分析的方法优化开关的使用年限和配电终端的配置, 通过定量计算验算优化结果是否满足约束条件。最后通过架空线实例, 验证了本方法的正确性和实用性。

参考文献

- [1] 胡美玉, 胡志坚, 邓奥攀, 等. 基于元件层级和电源可达性的配电网可靠性混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 22-29.
HU Meiyu, HU Zhijian, DENG Aopan, et al. Hybrid algorithm for reliability evaluation of distribution network based on element hierarchy and power accessibility[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 22-29.
- [2] 郑幸, 颜秋容. 基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
ZHENG Xing, YAN Qiurong. Reliability evaluation of distribution system based on Monte-Carlo method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [3] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38-42.
DING Ming, ZHANG Jing, LI Shenghu. A sequential Monte-Carlo simulation based reliability evaluation model for distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 38-42.
- [4] 唐开成. 配电自动化条件下配电系统供电可靠性评估[D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
TAND Kaicheng. Reliability evaluation for distribution systems with distribution automation[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006.
- [5] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purpose-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [6] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 复杂配电系统的可靠性评估[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(8): 9-13.
BIE Zhaohong, WANG Xiuli, WANG Xifan. Reliability evaluation of complicated distribution systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(8): 9-13.
- [7] XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, BILLINTON R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electric distribution networks based on the shortest path[J]. IEE Proceeding-Generation, Transmission, and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [8] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84.
ZHANG Peng, WANG Shouxiang. A novel interval

method for reliability evaluation of large scale distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 77-84.

[9] 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.

[10] LEVITIN G, MAZAL-TOV S, ELMAKIS D. Optimum switch allocation in electric distribution system by genetic algorithm[J]. Electric Power Systems, 1994, 31: 97-102.

[11] 谢开贵, 刘柏私, 赵渊, 等. 配电网开关优化配置的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 29-34.

XIE Kaigui, LIU Bosi, ZHAO Yuan, et al. Placement of optimal switching devices in radial electrical distribution networks based on dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 29-34.

[12] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. Optimal switching device placement in radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1646-1651.

[13] 齐先军, 彭翔天, 张晶晶. 基于浴盆形故障率函数的配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 81-87.

QI Xianjun, PENG Xiangtian, ZHANG Jingjing. Reliability evaluation algorithm of power distribution system based on bathtub-shaped hazard function[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 81-87.

[14] CHOWDHURY A A, KOVAL D O, 王守相, 等. 配电系统可靠性实际方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 32-57.

[15] ELSAYED E A, 杨舟. 可靠性工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 14-16, 161-183.

[16] 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.

[17] 郑玲玲, 王铮, 杨丽徙. 不同网络结构及可靠性要求环境下 FTU 的最优配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 69-74.

ZHENG Lingling, WANG Zheng, YANG Lixi. FTU optimal conjunction under different distribution network structures and reliability requirement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 69-74.

[18] 邢兆飞. 威布尔分布可靠度的近似置信限和浴盆形失效率函数及其统计分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2009.

XING Zhaofei. Approximate confidence limit of Weibull contribution and tub-shaped failure rate function[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2009.

[19] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70.

[20] 葛少云, 季时宇, 刘洪, 等. 基于多层次协同分析的高中压配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 172-181.

GE Shaoyun, JI Shiyu, LIU Hong, et al. Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 172-181.

[21] 汪隆君, 郭俊宏, 王钢, 等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 136-146.

WANG Longjun, GUO Junhong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming model for islanding partition of active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 136-146.

[22] 张晓雪, 牛焕娜, 赵静翔. 含微电网的配电网优化调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 165-173.

ZHANG Xiaoxue, NIU Huanna, ZHAO Jingxiang. Optimal dispatch method of distribution network with microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 165-173.

收稿日期: 2016-07-01; 修回日期: 2017-06-08

作者简介:

刘坤(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网终端优化、可靠性与规划; E-mail: 361333671@qq.com

王克文(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究与教学工作。E-mail: kwwang@zzu.edu.cn

(编辑 魏小丽)