

基于浴盆形故障率函数的配电系统可靠性评估算法

齐先军, 彭翔天, 张晶晶

(安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

摘要: 为揭示配电系统元件在其寿命周期内实际工作过程及对配电系统可靠性的影响, 将浴盆形故障率函数的概念应用于配电系统元件可靠性建模中。使用改进威布尔分布和对数正态分布分别模拟元件寿命周期和修复时间, 更加符合工程实际; 利用序列运算理论来计算配电系统可靠性指标的分布和期望, 克服了传统配电系统可靠性评估解析法不能应用于非指数系统中的缺陷, 为配电网可靠性评估提供了一种新的思路。通过对 RBTS-BUS6 测试系统的算例分析, 验证了所述方法的可行性。

关键词: 配电系统可靠性; 浴盆形故障率函数; 改进威布尔分布; 对数正态分布; 非指数系统; 序列运算理论

Reliability evaluation algorithm of power distribution system based on bathtub-shaped hazard function

QI Xianjun, PENG Xiangtian, ZHANG Jingjing

(Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To reflect the components' real working process during the lifespan and its impact on the reliability of power distribution system, the concept of bathtub-shaped hazard function is applied to components' reliability modeling. It is more agreeable with the engineering practice to use the modified Weibull distribution and the logarithmic normal distribution to describe the lifespan and the time to repair respectively. The sequence operation theory is applied to calculate the probability distributions and the expectations of power distribution system reliability index, thus overcoming the defect of traditional analytical method that cannot deal with the non-exponential distribution system, and providing a new approach to reliability evaluation. The effectiveness of the proposed method is verified by a case study of RBTS-BUS6 system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007017).

Key words: power distribution system reliability; bathtub-shaped hazard function; modified Weibull distribution; logarithmic normal distribution; non-exponential distribution system; sequence operation theory

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0081-07

0 引言

配电系统是电力系统中直接与用户相连并向用户分配电能的环节, 主要有变压器、配电线路、开关、母线等电气设备组成, 这些设备统称为元件。所谓配电系统可靠性分析, 就是利用配电系统拓扑信息和配电系统元件可靠性参数, 如元件故障率、平均修复时间等, 采用解析法或模拟法评估配电系统的各项可靠性指标。通过分析可靠性指标, 配电系统规划和设计人员可以对不同的增强性措施所带

来的效益进行定量计算, 以保证把有限的资金用来最大可能地增强配电系统的可靠性^[1]。

国内外学者在配电系统可靠性方面做了大量的研究和实践, 取得了丰硕的成果。文献[2]提出一种利用可达性分析理论进行配电网可靠性评估, 该方法可以方便地实现配电网的区域划分和故障后果类型判断。文献[3]采用最小割集法评估少环状配电网可靠性, 该方法根据负荷点的最小割集, 更易发现系统中的薄弱环节, 以指导电网的改造建设。文献[4]提出基于 B-C-N-M 域子网络故障扩散的配电网可靠性算法, 该方法可以减少计算量, 适用于复杂配电系统。文献[5]在配电系统中应用贝叶斯网络推

理法,该方法结构清晰、物理意义明确,便于查找电力系统中的薄弱环节。文献[6]提出基于图论和联系数法的配电系统可靠性评估,可以灵活地处理多种元件可靠性参数不确定因素的共存问题。上述文献为配电系统可靠性评估提供了很多新的方法和思路,但都是从优化网络结构、简化计算的角度出发,而未充分考虑配电网中元件的可靠性建模问题。

配电系统中最基本的组成部分是元件,因此配电系统可靠性评估是建立在元件的可靠性建模基础之上的。元件建模的精确性和真实性直接决定了配电系统可靠性评估结果的准确性和可信度。一般的配电系统可靠性评估算法^[7]假设元件的状态转移率为常数,即假定状态停留时间服从指数分布。该假设既有合理部分也有不合理部分,其合理部分在于:配电网中的元件一般具有可靠性高、运行稳定的特点,当元件进入偶然失效期,其故障率可以近似看成是常数,以便简化运算;其不合理部分在于:元件的故障率受环境污染、元件维护水平、元件使用年限和内部老化等诸多因素协同影响^[8],其故障率一般服从浴盆曲线。因此,采用指数分布来计算配电网的可靠性指标,虽可以简化建模和计算过程,但会产生较大的误差,且不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。而使用浴盆形故障率函数来计算配电系统的可靠性指标则更具普遍性和适用性。关于浴盆形故障率函数的构造,国内外学者做过很多研究,提出了各种不同的构造方式和方法,大体可以分为分段式和求和式两种构造方式^[9]:文献[10]采用分段式构造法,该方法实际上是将分布函数写成几个分布,这样在分段点处分布函数一般不光滑,而且又引入了新的参数(分段点),会给参数估计带来不便;文献[11]采用求和式来构造浴盆形故障率函数,但参数众多,构造过程比较复杂。

本文采用文献[12-13]提出的改进威布尔分布来描述元件的寿命周期分布,通过求和法构造浴盆形故障率函数,具有参数较少、结构简单等特点。由于元件采用浴盆形故障率函数模型,配电系统不再是指数分布系统。为克服传统配电系统可靠性评估中解析法不适用于非指数分布系统、蒙特卡洛仿真法计算时间长的缺点,将康重庆教授等提出的序列运算理论^[14]应用于基于浴盆形故障率函数的配电网可靠性评估中,可以处理非指数分布系统,且运算过程简单、易于编程实现。通过评估 RBTS-BUS6-F4 馈线测试系统的可靠性指标,验证了本文所提方法的可行性。

1 配电系统中元件模型

1.1 元件的寿命周期分布模型

本文采用一种改进的威布尔分布^[12](New Modified Weibull, NMW)来描述配电系统中元件的寿命周期 t 的分布。NMW 的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} [\alpha + \beta(1 + 2\lambda t) \exp(\lambda t)] \cdot \exp[-\alpha\sqrt{t} - \beta\sqrt{t} \exp(\lambda t)] \quad (1)$$

故障率函数(Hazard Function)为

$$h(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} [\alpha + \beta(1 + 2\lambda t) \exp(\lambda t)] \quad (2)$$

式中, α 、 β 、 λ 均为非负数, α 、 β 为形状参数, λ 为加速参数。可以证明^[12],当 α 、 β 、 λ 取值合适时,故障率函数符合浴盆曲线的特征。

1.2 改进威布尔分布的参数估计

本文主要考虑元件在其整个寿命周期内对配电系统可靠性的影响,元件寿命周期一般为 40~50 年^[15],可以根据元件寿命统计数据,对式(1)中的参数进行极大似然估计。但式(1)中的参数的极大似然方程组难以求解^[12],为简化计算,对其参数作如下变换^[12]:令 $q = \exp(-\alpha)$, $b = \beta/\alpha$, $c = \exp(\lambda)$,可将 NMW 的累积分布函数 $F(t)$ 改写为

$$F(t) = 1 - q^{\sqrt{t}(1+bc^t)} \quad (3)$$

故障率函数改写为

$$h(t) = 1 - q^{\sqrt{t+1}(1+bc^{t+1}) - \sqrt{t}(1+bc^t)} \quad (4)$$

式中: $0 < q < 1$; $b > 0$; $c \geq 1$ 。

本文采用极大似然估计法来求取 NMW 分布的参数 q 、 b 、 c 的点估计值。令 $\mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_n]$ 为元件寿命的统计数据,向量 $\Phi = (q, b, c)$ 表示 3 个未知参数的向量,极大似然函数为

$$L(\Phi; \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \ln(q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}) \quad (5)$$

式(5)分别对 3 个参数求一阶偏导并令偏导等于零便可得到极大似然方程组如式(6)所示。

$$\frac{\partial L}{\partial q} = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})-1} - \sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})-1})}{q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(q)[\sqrt{t_i}c^{t_i}q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - \sqrt{t_i+1}c^{t_i+1}q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}]}{q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial c} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(q)[bt_i^{3/2}c^{t_i-1}q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - b(t_i+1)^{3/2}c^{t_i}q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}]}{q^{\sqrt{t_i}(1+bc^{t_i})} - q^{\sqrt{t_i+1}(1+bc^{t_i+1})}} = 0 \quad (6)$$

显然,式(6)为非线性微分方程组,通过牛顿

迭代法解此方程组, 可以得到 q 、 b 、 c 的估计值, 进而计算出 NMW 分布的参数 α 、 β 、 λ 。

1.3 基于改进威布尔分布的元件故障次数分布

如果元件寿命周期服从 NMW 分布, 则元件在 $[0, T]$ 时间内故障次数为 n 的概率 $P_n(T)$ 为

$$P_n(T) = \frac{1}{n!} (\alpha\sqrt{T} + \beta\sqrt{t} \exp(\lambda T))^n \cdot \exp(-\alpha\sqrt{T} - \beta\sqrt{T} \exp(\lambda T)) \quad (7)$$

1.4 基于对数正态分布的元件修复时间分布

电力系统中除个别元件(如熔断器、电子元件), 绝大多数元件属于可修复元件。当某个可修复元件发生故障时, 要对其进行维修或更换, 在这期间所花费的时间统称为修复时间。元件的修复过程受故障时间、地理位置、天气状况、维修水平等多个因素影响, 是一个随机变量, 传统可靠性评估均采用指数分布来描述元件的修复时间。而近年来的研究表明, 采用对数正态分布能更好地描述元件的修复时间^[16], 对数正态分布的概率密度 $f(t)$ 、期望 E 和方差 D 为

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

$$E = \exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right) \quad (9)$$

$$D = \exp(2\mu + 2\sigma^2) - \exp(2\mu + \sigma^2) \quad (10)$$

式中: t 为修复时间; μ 为正态分布期望; σ^2 为正态分布方差。

与 NMW 分布相似, 可以采用极大似然估计法求取参数 μ 、 σ^2 的估计值, 这里不再赘述。可以证明, 元件修复时间为 m 小时的概率 $P(m)$ 为

$$P(m) = \int_{m-1}^m \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (11)$$

2 基于概率序列运算配电系统可靠性评估

2.1 序列的概念和基本运算

定义: 取值于数轴上非负整数点上的一系列数值称为序列(sequence)。

序列的长度: 已知序列 $a(i), i = 0, 1, \dots, N_a$, 称 N_a 为序列的长度, 当且仅当:

- (1) $a(i) = 0$, 对于所有的 $i > N_a$;
- (2) $a(i) \neq 0$, 当 $i = N_a$ 。

文献[14]定义序列之间的六种基本运算: 卷和运算、卷差运算、序乘运算、序除运算、交积运算和并积运算。此外, 还有一种特殊的序列运算, 该运算仅涉及两原始序列项之间的加法运算, 称为合

并运算。本文主要用到序列的卷和运算和合并运算, 下面是卷和运算和合并运算的运算规则。

已知两个长度分别为 N_a 和 N_b 的离散序列 $a(i)$ 和 $b(i)$, 以这两个序列作为原始序列, 可定义卷和运算和合并运算^[14]。

(1) 卷和运算: 令 $N_x = N_a + N_b$

$$x(i) = \sum_{i=i_a+i_b} a(i_a) \cdot b(i_b) \quad (12)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N_x$$

称式(12)所定义的运算为卷和运算, 序列 $x(i)$ 为 $a(i)$ 和 $b(i)$ 的卷和序列(其长度为 N_x), 简称卷和, 记为 $x(i) = a(i) \oplus b(i)$ 。将式(12)推广, 得到 n 个序列的卷和运算为

$$a_1(i) \oplus a_2(i) \oplus \dots \oplus a_n(i) = \sum_{i=i_1+i_2+\dots+i_n} [\prod_{k=1}^n a_k(i_k)] \quad (13)$$

简记为 $\oplus_{k=1}^n a_k(i)$ 。

(2) 合并运算: 令 $N_t = \max(N_a, N_b)$, 不妨设 $N_a > N_b$

$$t(i) = \begin{cases} a(i) + b(i) & 0 \leq i \leq N_b \\ a(i) & N_b \leq i \leq N_t \end{cases} \quad (14)$$

称式(14)所定义的运算为合并运算, $t(i)$ 为 $a(i)$ 和 $b(i)$ 的合并序列(其长度为 N_t), 简记为: $t(i) = a(i) + b(i)$ 。将式(14)推广, 得到 n 个序列的合并运算为

$$a_1(i_1) + a_2(i_2) + \dots + a_n(i_n) = \sum_{k=1}^n a_k(i_k) \quad (15)$$

2.2 概率性序列

当序列 $a(i)$ 满足下述条件:

$$a(i) \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, N_a \quad (16)$$

$$\sum_{i=0}^{N_a} a(i) = 1 \quad (17)$$

则称该序列为一个概率性序列。

根据第 1 节中介绍的元件故障次数和修复时间的概率分布, 可以得到元件的故障次数的概率性序列 $a(n)$ 和故障后修复时间的概率性序列 $b(m)$ 为

$$\begin{cases} a(n) = P_n(T), & n = 0, 1, \dots, N \\ b(m) = P(m), & m = 0, 1, \dots, M \end{cases} \quad (18)$$

概率性序列期望: 已知概率性序列 $a(i), i = 0, 1, \dots, N_a$, 则称运算

$$E_a = \sum_{i=0}^{N_a} i \cdot a(i) \quad (19)$$

的值为该序列的期望, 记为 E_a 。

2.3 基于序列运算的配电网可靠性评估

设元件在其寿命周期内故障次数的概率性序列为 $a(n)$, $n = 0, 1, \dots, N$, 故障后修复时间的概率性序列为 $b(m)$, $m = 0, 1, \dots, M$ 。易知, 元件在故障 k 次的情况下, 其累积修复时间的概率性序列 $d^k(i)$ 为 k 个单次修复时间的概率性序列的卷和。

$$d^k(i) = \oplus^k b(m) \quad i = 0, 1, \dots, k \cdot M \quad (20)$$

将式(20)乘以 k 次故障的概率 $a(k)$, 再将 k 从 1 变化到 N 所得到的 N 个序列集合进行合并运算, 可得到元件在其寿命周期内总修复时间的概率性序列为

$$c(n) = \sum_{k=1}^N (d^k(i) \cdot a(k)) \quad n = 0, 1, \dots, M \cdot N \quad (21)$$

由于配电系统一般为闭环设计, 开环运行^[17], 元件之间多为串联关系, 所以下面主要讨论串联系统可靠性计算方法。如图 1 所示为 J 个元件的串联系统, 则系统故障次数的概率性序列 $IF(n)$ 为

$$IF(n) = a_1(n) \oplus a_2(n) \oplus \dots \oplus a_J(n) = \oplus_{j=1}^J a_j(n) \quad (22)$$

系统总修复时间的概率性序列为

$$ID(n) = c_1(n) \oplus c_2(n) \oplus \dots \oplus c_J(n) = \oplus_{j=1}^J c_j(n) \quad (23)$$

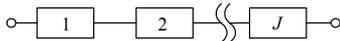


图 1 串联系统

Fig. 1 Series system

因此, 在得到使负荷点故障停电的元件集合后, 利用序列运算可求得串联系统故障次数的概率性序列和总修复时间的概率性序列。

本文采用故障遍历法^[18]得到导致负荷点 j 故障停电的元件集合。当馈线的任一元件故障, 首先其最近的断路器/隔离开关动作, 从而隔离故障元件, 然后再进行故障元件的修复工作, 根据每个负荷点的恢复结果不同, 可以将负荷分为 4 种类型: 第 1 类是不受影响的负荷, 此类负荷的停电时间为零; 第 2 类是故障点隔离后恢复供电的负荷, 此类负荷的停电时间为隔离操作时间; 第 3 类是故障点修复后恢复供电的负荷, 此类负荷的停电时间为隔离操作时间和故障修复时间之和; 第 4 类是故障点隔离, 且联络开关切换成功后才能恢复供电的负荷, 此类负荷的停电时间为隔离时间和联络开关操作时间之和。以图 2 简单系统为例, 当馈线 4 发生故障时, 首先断路器 F2 动作, 此后隔离开关 LC3 动作, 可以看出负荷 LP1 为第 1 类负荷, 负荷 LP2 为第 2 类负荷, 负荷 LP3 为第 3 类负荷, 负荷 LP4 为第 4 类负荷。通过遍历配电系统中所有元件, 得到导致第 j 个负荷点停电的元件的集合, 用 S_j , $j = 1, 2, \dots, J$ 表示。

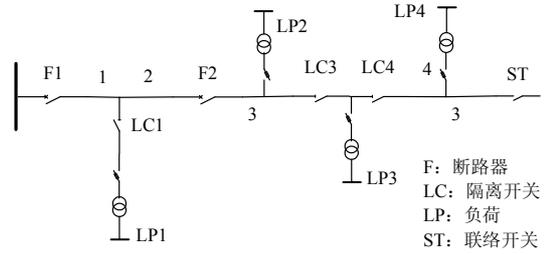


图 2 简单配电网

Fig. 2 A simple power distribution network

2.3.1 负荷点可靠性指标

设 S_j 为根据故障遍历法得到的导致负荷点 j 停电的元件集合, 则负荷点 j 停电次数和停电时间的概率性序列如下:

负荷点 j 的停电次数(Interruption Frequency)的概率性序列 $IF_j(n)$, $n = 0, 1, \dots, N$ 为

$$IF_j(n) = \oplus_{k \in S_j} a_k(n) \quad (24)$$

年停电次数均值 EIF_j (单位为次/年)为

$$EIF_j = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^N IF_j(n) \cdot n \quad (25)$$

式中, T 为评估周期。

负荷点 j 的停电时间(Interruption Duration)的概率性序列 $ID_j(n)$, $n = 0, 1, \dots, M$ 为

$$ID_j(n) = \oplus_{k \in S_j} c_k(n) \quad (26)$$

年停电时间均值 EID_j (单位为 h/年)为

$$EID_j = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^M ID_j(n) \cdot n \quad (27)$$

平均每次故障修复时间 R_j (单位为 h/次)为

$$R_j = EID_j / EIF_j \quad (28)$$

2.3.2 系统可靠性指标

配电系统可靠性指标一般有系统平均停电频率指标(SAIFI, 单位为次/用户·年)、系统平均停电持续时间指标(SAIDI, 单位为h/用户·年)、用户平均停电持续时间指标(CAIDI, 单位为 h/停电用户·年)、供电可用率指标(ASAI)和缺供电量(ENS, 单位为 MWh/年)等。

$$SAIFI = \frac{\sum_{j=1}^M EIF_j \cdot N_j}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad (29)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{j=1}^M EID_j \cdot N_j}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad (30)$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{j=1}^M EID_j \cdot N_j}{\sum_{j=1}^M EIF_j \cdot N_j} \quad (31)$$

$$ASAI = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M EID_j \cdot N_j}{8760 \sum_{j=1}^M N_j} \quad (32)$$

$$ENS = \sum_{j=1}^M P_j \cdot EID_j \quad (33)$$

以上各式中: M 为配电系统中总负荷点数; N_j 为负荷点 j 的用户数; P_j 为连接在负荷点 j 的平均有功负荷。

3 算例分析

本文的算例采用 RBTS_BUS6_F4 馈线测试系统^[7], 如图 3 所示。该系统包括 30 条线路、23 个负荷点、23 个熔断器(每条支路首段装设, 图中未画出)、23 个配电变压器、4 个断路器及一个隔离分段开关。假设所有开关均可靠动作。

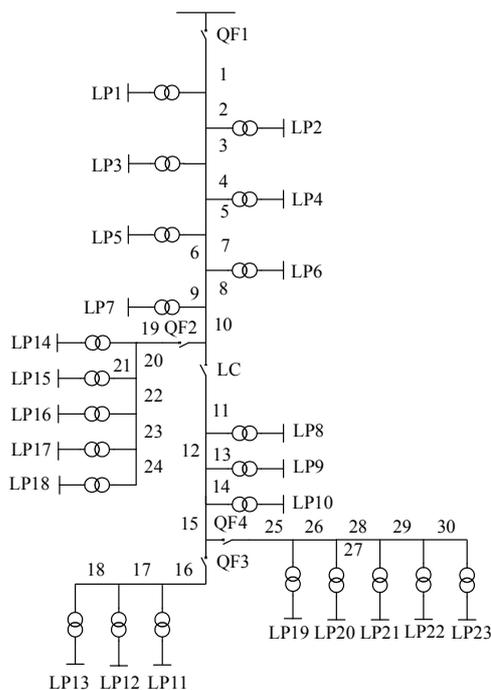


图 3 RBTS-Bus6-F4 系统接线图

Fig. 3 Single line diagram of the RBTS-Bus6-F4

由于缺乏历年的统计数据, 根据文献[7]中给出的数据, 假设元件的初期损坏期为 10 年, 之后 10~40 年为偶然失效期, 40 年之后为耗衰期。通过计算机模拟的方法得到模拟数据, 使元件在偶然失效期的平均故障率为文献[7]中提供的数值, 以保证计算结果具有可比性。再通过极大似然估计法得到元件的 NMW 分布的参数。例如长度为 1 km 的馈线, 得到其寿命周期的 NMW 参数为 $\alpha = 0.565 0$, $\beta = 8.849 4 \times 10^{-6}$, $\lambda = 0.155 5$, 其对应的故障率函数曲线如图 4 所示。其他元件的参数亦由此法得出,

不再赘述。

根据第 2 节介绍的评估算法, 当评估周期为前 40 年时, 求得各个负荷点的年停电次数和年停电时间的概率分布分别如图 5 和图 6 所示(由于篇幅所限, 只列出 4 个代表性的负荷点); 当评估周期为前 10 年初期损坏期时, 求得各个负荷点的年停电次数和年停电时间的概率分布分别如图 7 和图 8 所示; 不同评估时期内负荷点可靠性指标期望值如表 1 所示。

通过观察表 1, 比较图 5 和图 7、图 6 和图 8, 可知元件初期损坏期内的负荷点可靠性指标值明显高于前 40 年内的可靠性指标值。

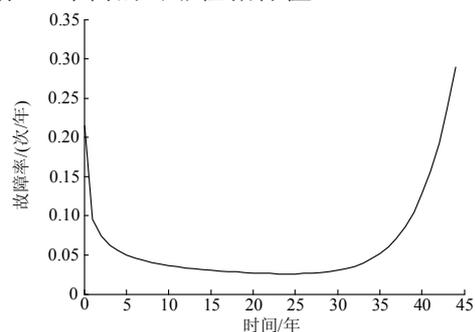


图 4 1 km 馈线故障率浴盆曲线图

Fig. 4 Bathtub-shaped hazard curve of 1 km feeder

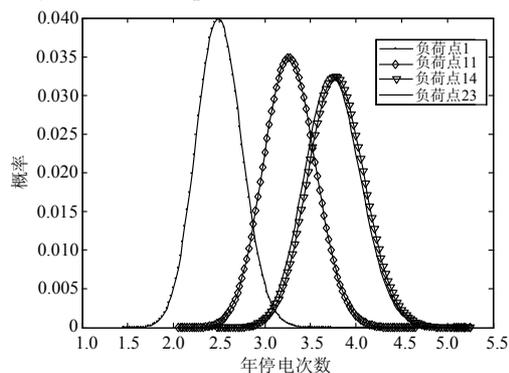


图 5 前 40 年内负荷点年停电次数概率分布曲线

Fig. 5 Interruption frequency probability distribution curve of load point in the first forty years

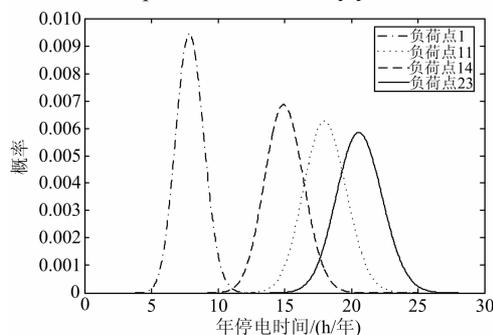


图 6 前 40 年内负荷点年平均停电时间概率分布曲线

Fig. 6 Interruption duration probability distribution curve of load point in the first forty years

当评估时间为 10~40 年的偶然失效期时, 这段时间内元件的故障率比较稳定, 且均值为文献[7]提供的数值, 因此可以求出该段时间的可靠性指标, 并与文献[7]对照, 如表 2 所示。可以看出, 本文算法得到的结果与文献[7]的结果基本相同。系统可靠性指标如表 3 所示。

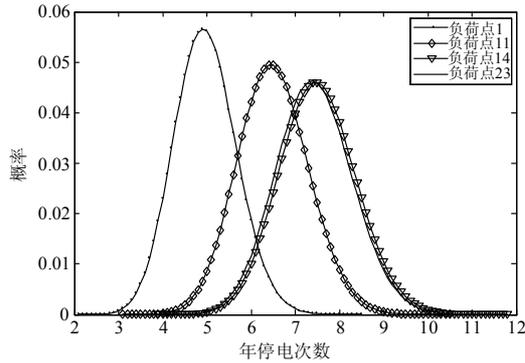


图 7 前 10 年停电次数概率分布曲线

Fig. 7 Interruption frequency probability distribution curve of load point in the first ten years

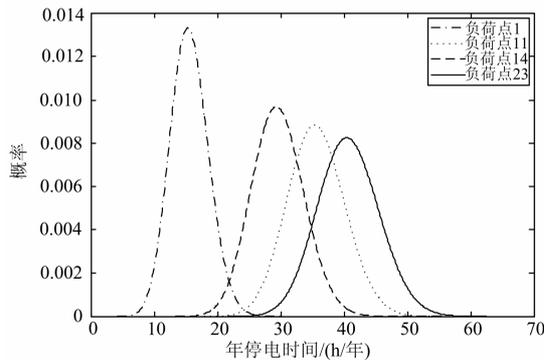


图 8 前 10 年停电时间概率分布曲线

Fig. 8 Interruption duration probability distribution curve of load points in the first ten years

表 1 不同评估时期内负荷点可靠性指标
Table 1 Reliability index of load points in different evaluation periods

负荷点	前 10 年平均指标			40 年平均指标		
	EIF/(次/年)	R/(h/次)	EID/(h/年)	EIF/(次/年)	R/(h/次)	EID/(h/年)
1	4.965 3	3.142 6	15.603 9	2.506 1	3.160 8	7.921 0
11	6.500 0	5.476 8	35.599 8	3.275 2	5.510 1	18.046 7
18	7.511 2	3.935 8	29.526 7	3.754 6	3.994 5	14.998 0
23	7.430 1	5.474 6	40.677 3	3.743 7	5.509 9	20.627 6

表 2 偶然失效期内负荷点可靠性指标

Table 2 Reliability index of load points in random failure period

负荷点	偶然失效期指标			文献[7]指标		
	EIF/(次/年)	R/(h/次)	EID/(h/年)	EIF/(次/年)	R/(h/次)	EID/(h/年)
1	1.680 6	3.229 1	5.429 6	1.672 5	5.02	8.60
11	2.001 0	6.243 3	12.486 6	1.988 4	5.16	10.26
18	2.542 4	4.071 2	10.350 8	2.589 0	5.02	12.98
23	2.514 9	5.693 2	14.317 9	2.511 0	6.16	15.48

表 3 系统可靠性指标

Table 3 System reliability index

系统指标	40 年评估	10~40 年	文献[7]的
	指标	评估指标	评估指标
SAIFI/(次/用户·年)	2.941 0	1.975 7	1.902 6
SAIDI/(h/用户·年)	12.671 1	8.741 6	10.421 9
CAIDI/(h/停电用户·年)	4.305 8	4.424 7	5.477 7
ASAI	0.998 6	0.999 0	0.998 8
ENS/(MWh/年)	65.301 4	45.109 8	52.261 3

4 结论

(1) 采用一种新的改进威布尔分布来描述元件的寿命, 在配电系统可靠性评估中考虑了元件寿命周期中的浴盆形故障率函数, 从而更加符合实际情况。

(2) 将概率性序列运算理论应用于配电系统可靠性评估中, 该方法可以应用于非指数系统, 从而可以很好地和 NMW 分布结合起来, 为配电系统可靠性评估提供一种新的思路。

参考文献

- [1] 王成山, 罗凤章. 配电系统综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178. XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [3] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 52-58. WANG Xiuli, LUO Sha, XIE Shaoyu, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 52-58.
- [4] 姚李孝, 赵兵, 崔杜武, 等. 基于多级 B-C-N-M 域子

- 网络故障扩散的复杂配电系统可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 103-108.
- YAO Lixiao, ZHAO Bing, CUI Duwu, et al. Reliability assessment for complex distribution system based on fault pervasion of multilevel B-C-N-M region sub-networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 103-108.
- [5] 霍利民, 朱永利, 张在玲, 等. 贝叶斯网络在配电网系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 113-118.
- HUO Limin, ZHU Yongli, ZHANG Zailing, et al. Bayesian networks application to reliability evaluation of electric distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 113-118.
- [6] 张彼德, 刘代伟, 邹江平, 等. 基于图论及联系数的复杂配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 74-79.
- ZHANG Bide, LIU Daiwei, ZOU Jiangping, et al. Reliability evaluation of complex distribution networks based on graph theory and connection number[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 74-79.
- [7] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [8] 赵渊, 袁蓉. 配电网可靠性概率分布的解析模型和非参数估计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 38-43.
- ZHAO Yuan, YUAN Rong. Analytical approach and nonparametric kernel estimation to compute probability distributions for reliability indices of distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 38-43.
- [9] 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.
- [10] MURTHY DNP, XIE M, JIANG R. Weibull models[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [11] NAVARRO J, HERNANDEZ P J. How to obtain bathtub-shaped failure rate models from normal mixtures[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2004, 18(4): 511-532.
- [12] ALMALKI S J, YUAN J. The new modified Weibull distribution[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 111: 164-170.
- [13] ALMALKI S J, NADARAJAH S. A new discrete modified Weibull distribution[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(1): 68-80.
- [14] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [15] CHOWDHURY A, KOVAL D. Power distribution system reliability: practical methods and applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] BILLINTON R, ALLAN R N. 工程系统可靠性评估—原理和方法[M]. 周家启, 黄雯莹, 译. 北京: 科学技术文献出版社, 1986.
- [17] 郭永基. 可靠性原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [18] 王辉, 黄丽华, 陈俊红, 等. 辐射型配电网可靠性中节点编号优化算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 5-9.
- WANG Hui, HUANG Lihua, CHEN Junhong, et al. A study of reliability assessment node number optimization algorithm for radial distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 5-9.

收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-10-30

作者简介:

齐先军(1977-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统规划与可靠性;

彭翔天(1977-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电系统规划与可靠性。E-mail: 375282998@qq.com

(编辑 周金梅)