

基于改进平均秩次法的保护装置可靠性评估

陈勇¹, 李胜男¹, 张丽¹, 刘媛², 戴志辉²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650500; 2. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 针对保护装置可靠性分析中模型的精度问题, 提出了一种综合改进平均秩次法与最小二乘法的威布尔分布模型参数估计新方法。该方法克服了平均秩次法只计及每个数据删失点的位置, 而未考虑到每个失效区间的长度对结果影响的不足。在对保护装置的故障数据与删失数据预处理的基础上, 分别采用平均秩次法与改进的平均秩次法对威布尔分布的形状参数与尺度参数进行估计, 进一步得到可靠度函数及失效率函数等并进行了相关分析。以某型号继电保护装置的故障数据和删失数据为例, 对比两种方法的参数估计结果, 验证了提出的新方法比传统方法所得结果更加贴近实际的优点。

关键词: 继电保护; 可靠性; 威布尔分布; 改进平均秩次法; 删失数据

Reliability evaluation of protective device based on improved average rank order method

CHEN Yong¹, LI Shengnan¹, ZHANG Li¹, LIU Yuan², DAI Zhihui²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, China;

2. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at improving the model accuracy for reliability assessment of protective devices, a new approach to estimate the parameters of the Weibull distribution model, integrating improved mean-rank method and the least square method, is proposed. It overcomes the shortcoming that the mean-rank method only considers the truncation-point position of each datum, and does not take into account the impact of the length of each failure interval on the analysis result. Based on pretreatment of failure data and censored data of protective devices, the shape and scale parameters of the Weibull distribution are estimated with the mean-rank method and the improved mean-rank method respectively, and the reliability function and the failure-rate function are obtained and analyzed. Taking the failure data and the censored data of a type of protective device as examples, parameter-estimation results of these two methods are compared, which verifies that the results obtained by the proposed method are more closely aligned with the practical operation status of the protective device.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

Key words: protective device; reliability; Weibull distribution; improved mean-rank method; censored data

0 引言

保护装置可靠性是指装置在预定时间内及规定的条件下成功完成预定功能的能力^[1]。对保护装置进行可靠性评估, 充分利用可靠性基础数据是评估的基础^[2-4], 正确地建立分布模型及准确的参数估计是评估的关键。

威布尔分布模型能较好地描述保护装置的可靠性问题。文献[5]采用不同的失效分布模型拟合保护装置失效数据, 并验证了保护装置的老化失效数据最符合 Weibull 分布; 文献[6-7]以故障数据为基础, 采用威布尔分布模型对保护装置的失效率进行了分析, 但是未考虑缺陷数据的影响; 文献[8]在对保护装置的缺陷信息进行预处理的基础上, 应用最小二乘法和平均秩次法估计威布尔分布的模型参数。但需注意的是, 以往的研究仅仅单方面考虑了故障数据或缺陷数据, 未同时将故障数据和缺陷数据进行充分利用, 且现有对继电保护装置可靠性分

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017MS096)

析的文献均基于平均秩次法进行参数估计。平均秩次法只考虑了每个数据删失点的位置,并未计及到删失数据(即保护装置发生严重或危急缺陷导致保护装置退出运行的情况)的具体值以及每两个相邻故障数据构成的区间长度对结果的影响,可能导致不同情形的参数估计结果却相同。针对传统平均秩次法的不足,提出采用改进的平均秩次法来求解经验分布函数,改进的核心是增加了保护装置删失项在未来发生故障的概率对参数评估结果准确度的修正,从而可使得评估结果更加贴近实际。

整体上,本文在考虑删失数据和故障数据的基础上,建立保护装置的威布尔分布模型,综合最小二乘法和改进的平均秩次法来对分布模型进行参数估计,进而求取可靠度函数、失效率函数以及故障概率密度函数,并将计算结果与平均秩次法的计算结果进行比较,验证了改进平均秩次法评估结果与实际情况更加吻合,且能提供及时有效的检修计划。

1 数据的收集和预处理

对保护装置的检修报告及缺陷记录进行统计,其中除故障(拒动、误动)数据外,有相当一部分为缺陷数据。缺陷数据主要指保护装置在自检、巡视或检修时发现保护装置存在缺陷的情况,此时并未导致保护装置拒动或误动;缺陷等级主要包括危急、严重、一般。保护系统的缺陷虽不一定会导致保护系统的拒动或误动,但会影响保护系统在预定时间内、规定的条件下完成规定功能的能力^[7]。而且保护系统的缺陷数据较之误动、拒动数据相对更多,在考虑故障数据的基础上,充分利用这些缺陷数据,对运行中的保护系统进行评估,亦可使保护可靠性评估更贴近实际。

数据收集与预处理^[9-11]主要包括以下步骤。

Step1: 根据台账信息、缺陷记录与检修报告,按照装置型号分别统计保护装置的投运时间、故障发生时间、故障原因以及缺陷发生时刻、缺陷等级、保护是否退出等初始数据。

Step2: 对收集的数据经过筛选、去重、补缺等操作,使这些缺陷数据成为高质量的数据。根据保护装置是否故障及缺陷等级将数据分为故障数据和删失数据两类。故障数据包括拒动数据、误动数据。删失数据包括保护装置发生严重或危急缺陷导致保护退出运行的情况。

Step3: 将所有数据按照时间间隔顺序排列,并注明数据类型,且将时间间隔统一转换为以小时为单位,为后续计算奠定基础。

2 威布尔分布建模

由于威布尔具有较强的数据拟合能力,本文采用两参数威布尔分布模型^[12-14]对保护装置的可靠性进行分析,其累积分布函数 $F(t)$ 为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-(t/\eta)^m\right] \quad (1)$$

故障概率密度函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^m} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (2)$$

可靠度函数 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-(t/\eta)^m\right] \quad (3)$$

失效率函数 $\lambda(t)$ 为

$$\lambda(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^m} \quad (4)$$

式中: t 为故障时间; η 为尺度参数; m 为形状参数。

3 参数估计

3.1 最小二乘估计法

最小二乘法能实现威布尔分布函数的线性化,具体地,首先对式(1)移项再连续取两次对数如式(5)所示^[15-17]。

$$\ln[-\ln R(t)] = m \ln t - m \ln \eta \quad (5)$$

设 $y = \ln[-\ln R(t)]$, $x = \ln t$, $a = m$, $b = -m \ln \eta$, 则有

$$y = ax + b \quad (6)$$

其中,系数 a 和 b 的最小二乘估计解为

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \\ b = \bar{y} - a \bar{x} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$; $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$; n 为观测样本的个数。由此,可求出尺度参数 η 和形状参数 m 为

$$\begin{cases} \eta = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \\ m = a \end{cases} \quad (8)$$

3.2 基于改进的平均秩次法参数估计

以往研究中平均秩次法^[18-20]被广泛用以计算经验分布函数,但其也存在不足之处,主要表现在只计及了每个数据删失点的位置^[21],而未考虑到删失数据的具体值以及每两个相邻故障数据构成的区间

长度对评估结果的影响。首先, 以一个算例来说明平均秩次法的不足, 并提出了一种改进的平均秩次法进行威布尔分布参数估计。假设经过数据预处理得到两组含有不同删失时间的数据, 如表 1 所示。

表 1 含不同删失时间的两组数据

Table 1 Two sets of data with different censored times

序号	运行时间/h	状况	序号	运行时间/h	状况
1	4 000	F	1	4 000	F
2	4 200	S	2	6 000	S
3	5 500	S	3	7 500	S
4	8 000	F	4	8 000	F
5	10 000	F	5	10 000	F

注: F 表示故障数据; S 表示删失数据。

假设以上两组数据均符合威布尔分布, 采用平均秩次法所得的参数估计为 $\eta_1 = \eta_2 = 9\,299.1$, $m_1 = m_2 = 2.3953$ 。由表 1 可以看出, 两组数据所含的删失时间明显不同, 然而采用平均秩次法所得分布参数的估计结果却相同。其主要原因是平均秩次法未考虑删失数据的具体值对评估结果的影响, 且认为删失项在大于删失数据的故障项之间未来发生故障的概率相等^[22]。根据概率论可知, 删失项在后面每两个相邻故障数据之间未来发生故障的概率是不同的, 它不仅跟删失时间具体值有关, 还与相邻两个故障数据构成的区间长度有关。若两个相邻故障数据构成的区间长度越长, 则删失项在相应的区间发生故障概率就越大^[22]。

因此, 本文针对平均秩次法的不足之处, 增加了保护装置删失项在后面每两个相邻故障数据之间发生故障的概率, 以此对故障秩次进行修正, 进而对威布尔参数进行估计。

假设某一保护装置在 t_j 处发生删失, 大于删失项的故障数据记为 t_k, t_{k+1}, \dots, t_n 。根据条件概率公式可得, 该删失项在 $[t_{i-1}, t_i]$ ($i = k, k+1, \dots, n$) 内发生故障的概率 $I_{j,i}$ 表达式^[23-24]如式(9)所示。

$$I_{j,i} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t) dt}{1 - F(t_j)} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{m t^{m-1}}{\eta^m} \exp[-(t/\eta)^m] dt}{\exp(-t_j/\eta)^m} = \frac{\exp(-t_{i-1}/\eta)^m - \exp(-t_i/\eta)^m}{\exp(-t_j/\eta)^m} \quad (9)$$

式中: t_j 为删失数据, $j = 1, 2, \dots, M$; $I_{j,i}$ 为删失数据在区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 内对故障数据 t_i 秩次的增量; t_i 为第 i 个故障样品对应的运行时间。

若 t_i 之前删失项的数量为 M_i , 则这 M_i 个删失数据对故障数据 t_i 秩次的增量可以表示为

$$I_i = \sum_{j=1}^{M_i} I_{j,i} \quad (10)$$

由此可得第 i 个故障数据的平均秩为

$$A_i = A_{i-1} + 1 + I_i \quad (11)$$

根据近似中位秩公式, 可得经验分布函数为

$$F(t_i) = \frac{A_{i-1} + 1 + I_i - 0.3}{n + 0.4} \quad (12)$$

通过以上公式可计算得到故障数据的平均秩次和经验分布函数值, 接着利用最小二乘法就可以估计出分布参数 η 和 m 的值。再将其代入可靠度函数、失效率函数等, 便可得到相应的函数曲线, 从而对保护装置的可靠性进行评估。

综上所述, 总结参数估计的步骤如下:

Step1 通过平均秩次法求出尺度参数 η 和形状参数 m 作为迭代的初始值。

Step2 将得到的初始值代入式(9)中进行计算, 并求出平均秩次及经验分布函数, 再利用最小二乘法估计, 以得到新的参数估计值。

Step3 重复 Step2, 直到相邻两个形状参数满足 $|m_k - m_{k-1}| \leq 0.0001$, 则停止迭代。

4 实例分析

选取在同样的操作水平和同样的工况下某一型号的继电保护装置 20 次缺陷信息和故障信息, 对其作数据预处理后进行分析。其运行记录样本如表 2 所示。每个运行时间对应的序号称为秩次。

表 2 中的数据包括删失数据和故障数据。其中, 删失数据包括严重或危急的缺陷导致保护装置退出运行的数据。故障数据包括拒动数据、误动数据。

表 2 保护装置缺陷数据

Table 2 Relay protection device defect data

序号	运行时间/h	状况	序号	运行时间/h	状况
1	4 399	F	11	13 168	S
2	4 585	S	12	13 218	S
3	5 735	S	13	13 327	F
4	5 862	F	14	14 701	S
5	6 225	S	15	15 593	S
6	8 214	S	16	16 158	F
7	9 582	F	17	17 152	S
8	9 589	S	18	17 622	F
9	9 606	F	19	18 714	S
10	10 192	S	20	20 407	F

注: F 表示故障数据; S 表示删失数据。

4.1 平均秩次法计算经验分布函数

对表 2 中的数据, 先去掉删失数据, 然后将发生故障的 8 个保护装置重新按照运行时间的大小排序, 通过平均秩次法计算保护装置的平均秩次和经验分布函数值, 计算结果如表 3 所示。其中, 第 3 列和第 4 列分别为平均秩次及经验分布函数值。

表 3 平均秩次法计算结果

Table 3 Calculation results by mean-rank method

i	t_i	A_i	$F_n(t_i)$	x	y
1	4 399	1.000 0	0.034 3	8.389 1	-3.354 8
2	5 862	2.111 1	0.088 8	8.676 2	-2.375 5
3	9 582	3.370 4	0.150 5	9.167 6	-1.813 3
4	9 606	4.726 5	0.217 0	9.170 1	-1.408 1
5	13 327	6.534 7	0.305 6	9.497 5	-1.008 6
6	16 158	8.945 6	0.423 8	9.690 2	-0.595 5
7	17 622	11.959 2	0.571 5	9.776 9	-0.165 4
8	20 407	16.479 6	0.793 1	9.923 6	0.454 6

注: $x = \ln t$, $y = \ln[-\ln R(t)]$

取表 3 中的第 5 列和第 6 列, 以 x 为横轴, 以 y 为纵轴, 采用最小二乘估计法对其进行拟合得到回归直线, 如图 1 所示。其线性相关程度 $\rho_1 = 0.983 3$ 。

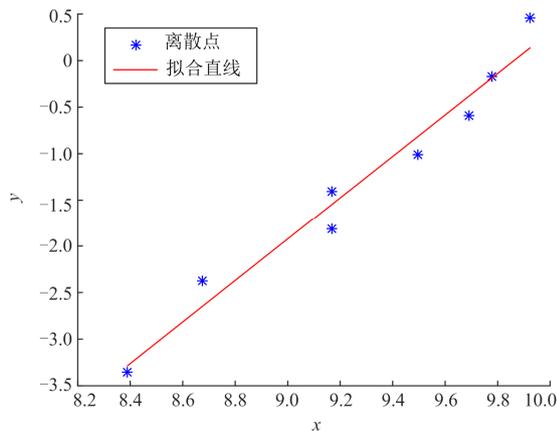


图 1 平均秩次法拟合直线

Fig. 1 Fit the line by mean-rank method

4.2 改进的平均秩次法计算经验分布函数

为了对比两种方法的评估效果, 采用改进的平均秩次法进行参数估计。首先把平均秩次法求出分布参数的估计值 $\eta=19181$, $m=2.230 9$, 作为改进平均秩次法迭代的初始值, 代入式(9), 求出 $I_{j,i}$, 再通过式(11)和式(12)求出平均秩次和经验分布函数, 接着利用最小二乘法可获得新的参数估计值。重复迭代以上两个步骤, 直到得出的参数估计值满足所要求的精度为止。当 $|m_k - m_{k-1}| \leq 0.000 1$ 时, 终止迭

代, 计算结果如表 4 所示。

表 4 改进的平均秩次法计算结果

Table 4 Calculation results by improved mean-rank method

i	t_i	A_i	$F_n(t_i)$	x	y
1	4 399	1.000 0	0.034 3	8.389 1	-3.354 8
2	5 862	2.342 7	0.100 1	8.676 2	-2.249 0
3	9 582	4.819 6	0.221 5	9.167 6	-1.384 5
4	9 606	5.830 0	0.271 1	9.170 1	-1.151 4
5	13 327	9.578 7	0.454 8	9.497 5	-0.499 8
6	16 158	12.697 0	0.607 7	9.690 2	-0.066 4
7	17 622	14.723 3	0.707 0	9.776 9	0.205 1
8	20 407	17.567 2	0.846 4	9.923 6	0.627 9

取表 4 中的第 5 列和第 6 列, 以 x 为横轴, 以 y 为纵轴, 通过最小二乘估计法对其进行拟合得到回归直线, 如图 2 所示。其线性相关程度 $\rho_2 = 0.995 3$ 。

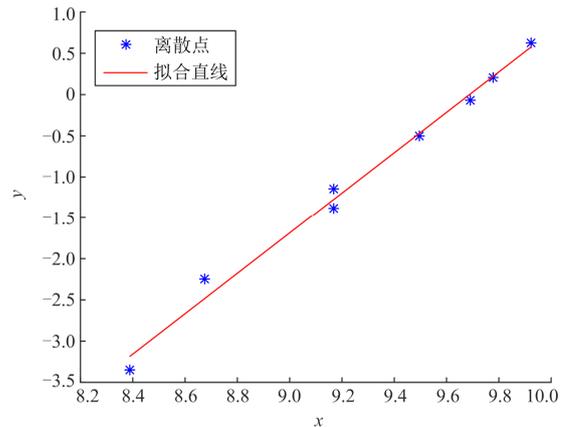


图 2 改进的平均秩次法拟合直线

Fig. 2 Fit the line by improved mean-rank method

对图 1 和图 2 两种方法的拟合结果比较分析, 可以看出, 采用改进平均秩次法比平均秩次法拟合效果更好, 且线性相关程度 $\rho_1 < \rho_2$, 说明采用本文的方法进行参数估计, 其结果优于平均秩次法的参数估计结果。根据计算结果求得两种方法的威布尔分布参数 m 、 η 以及相关系数 ρ 如表 5 所示。

表 5 两种参数估计法结果

Table 5 Results of the two parameter estimation methods

方法	m	η	ρ
平均秩次法	2.230 9	19 181	0.983 3
改进的平均秩次法	2.452 0	16 120	0.995 3

将表 5 中的参数分别代入式(1)一式(4), 可分别得到两种方法下保护装置的累积分布函数、分布密度函数、可靠度函数和失效率函数。绘制两种方法

下可靠度函数、失效率函数以及故障概率密度函数随时间的变化曲线如图3—图5所示。其中,方法1代表平均秩次法,方法2代表改进的平均秩次法。

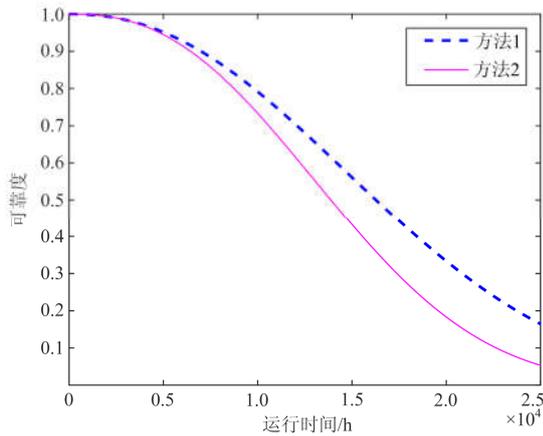


图3 可靠度函数曲线

Fig. 3 Reliability function curves

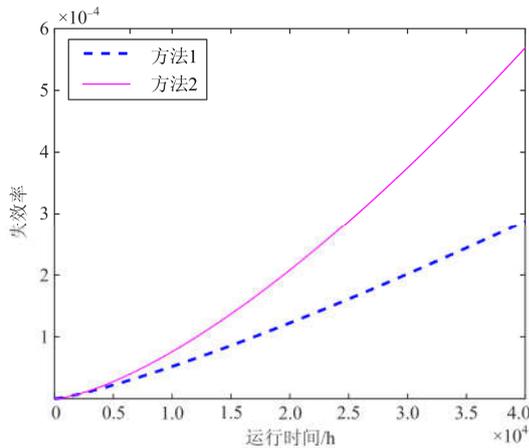


图4 失效率函数曲线

Fig. 4 Failure rate curves

当 $R(t)=0.96$ 时, 可得到平均秩次法所对应保护装置可靠寿命 $t=4\ 573$ h, 而改进平均秩次法所对应的保护装置可靠寿命 $t=4\ 373$ h, 而实际运行情况为保护装置投入运行半年(即 $4\ 380$ h)内没有缺陷或故障发生, 根据实际记录可知, 第一次发生故障的时间为 $4\ 399$ h。综上可知, 采用方法2所得函数曲线与实际情况更加吻合, 即通过改进的平均秩次法进行参数估计, 其结果更能反映实际情况。

由图4可得, 两种方法计算所得保护装置的形状参数 m 均大于1, 其失效率随时间均呈上升趋势。而且改进的平均秩次法失效率曲线上升速度明显快于平均秩次法, 说明综合考虑故障数据和删失数据情况下, 用方法2进行参数估计可使得评估效果更

加准确保守, 并可以及时提出检修计划, 降低保护装置发生缺陷或故障的概率, 从而提高保护装置的可靠性。

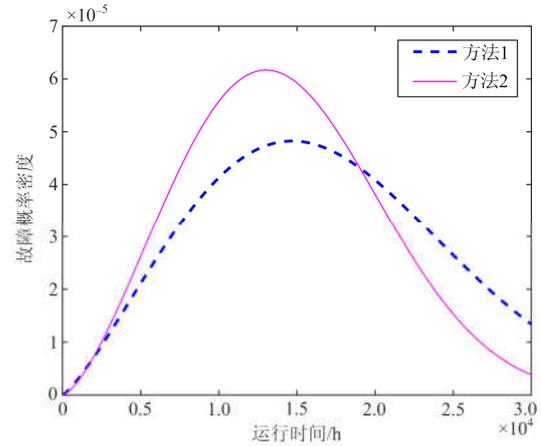


图5 故障概率密度函数曲线

Fig. 5 Fault probability density curves

由图5可知, 当采用平均秩次法进行参数估计, $t=15\ 000$ h 时, 保护装置发生缺陷或故障的概率最大; 当采用改进的平均秩次法进行参数估计时, $t=13\ 000$ h 时, 保护装置发生缺陷或故障的概率到达峰值。而实际缺陷记录中 $13\ 000$ h 左右发生的缺陷及故障更为频繁。

综上所述, 采用改进的平均秩次法进行参数估计所得结果与实际情况更为相符, 并可以通过其失效率曲线及时制定检修计划, 以降低保护装置的缺陷或故障发生概率。

5 结论

本文结合继电保护装置“缺陷数据较多而故障数据较少”的实际运行特点, 通过对保护装置的故障信息及缺陷信息充分利用, 综合最小二乘法和改进的平均秩次的参数估计法对分布模型进行参数估计。通过改进的平均秩次法求解参数估计模型, 可以克服传统的平均秩次法只计及每个数据删失点的位置、而未考虑到具体故障区间长度的不足。

比较分析了基于故障数据和删失数据的可靠度函数、失效率函数和概率密度函数。结果表明, 改进的平均秩次法比平均秩次法能提供更加精确的参数估计值, 使得所得结果更加贴近实际情况。由此可以制定更加经济合理的保护装置检修计划。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

- [2] DAS S, ANANTHAN S N, SANTOSO S. Relay performance verification using fault event records[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.
- [3] 莫峻, 蔡义明. 计及瞬时通信故障的变压器保护可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 807-816.
MO Jun, CAI Yiming. Reliability evaluation of transformer protection considering transient communication fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 807-816.
- [4] 邓炼兴, 巩俊强, 姜云峰, 等. 智能电网继电保护定值在线比对和固化系统[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 36-41.
DENG Lianxing, GONG Junqiang, JIANG Yunfeng, et al. On-line comparison and curing system for relay protection settings of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(4): 36-41.
- [5] 王睿琛, 薛安成, 毕天姝, 等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 11-15, 23.
WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15, 23.
- [6] 贺春, 陈光华, 王鹏飞, 等. 高加速寿命试验在就地化保护装置可靠性研究中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 181-186.
HE Chun, CHEN Guanghua, WANG Pengfei, et al. Application of highly accelerated life test in reliability study of outdoor installation protection device[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 181-186.
- [7] 薛安成, 王睿琛, 刘蔚, 等. 继电保护装置恒定失效率估算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 6-10.
XUE Ancheng, WANG Ruichen, LIU Wei, et al. Estimation methods for constant failure rate of protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 6-10.
- [8] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 基于缺陷分析的保护装置可靠性评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 54-59.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Study on the reliability evaluation of protection devices based on defects analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 54-59.
- [9] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 继电保护可靠性数据收集系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 47-51.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Design of relay reliability data acquisition system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 47-51.
- [10] 葛磊蛟, 王守相, 王尧. 多源异构的智能配用电数据存储处理技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 159-168.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, WANG Yao. Storage and processing technology of the multi-source isomerized data for smart power distribution and utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 159-168.
- [11] 赵春雷, 孙利强, 高翔, 等. 基于源端数据维护机制的保护智能运维技术探讨[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 78-83.
ZHAO Chunlei, SUN Liqiang, GAO Xiang, et al. Discussions on smart maintenance technology of smart substations based on source data maintenance[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 78-83.
- [12] 秦金磊, 牛玉广, 李整. 电站设备可靠性问题的威布尔模型求解优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊 1): 35-40.
QIN Jinlei, NIU Yuguang, LI Zheng. Optimization approach of Weibull model solution for power station equipment reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 35-40.
- [13] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.
- [14] 刘振林, 代泽兵, 卢智成. 基于 Weibull 分布的瓷型电气设备地震易损性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1076-1081.
LIU Zhenlin, DAI Zebing, LU Zhicheng. Weibull distribution based seismic vulnerability analysis of porcelain power equipment[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1076-1081.
- [15] 何旭, 姜宪国, 张沛超. 基于 SVM 的小样本条件下继电保护可靠性参数估计[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1432-1437.
HE Xu, JIANG Xianguo, ZHANG Peichao. SVM based parameter estimation of relay protection reliability with small samples[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1432-1437.
- [16] JALAL K, MOJTABA K. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017,

- 2(1): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [17] 戴志辉, 李芷筠, 焦彦军, 等. 基于 BP 神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 129-134.
DAI Zhihui, LI Zhijun, JIAO Yanjun, et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 129-134.
- [18] 张磐, 苏毅方, 韩寅峰, 等. 配电终端失效分布类型判断及失效率估算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(2): 61-65.
ZHANG Pan, SU Yifang, HAN Yinfeng, et al. Judgment on failure distribution type and estimation of failure rate for distribution terminals[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(2): 61-65.
- [19] SHEN A, GUO J, WANG Z, et al. Research on nonparametric method of reliability evaluation in context of mixed distribution[C] // 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), August 6-8, 2014, Guangzhou, China: 781-786.
- [20] 张英芝, 刘津彤, 申桂香, 等. 基于故障相关性分析的数控机床系统可靠性建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 169-173.
ZHANG Yingzhi, LIU Jintong, SHEN Guixiang, et al. Reliability modeling of CNC machine tools system based on failure correlation analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 169-173.
- [21] 肖繁, 王紫薇, 张哲, 等. 基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 74-83.
XIAO Fan, WANG Ziwei, ZHANG Zhe, et al. Study on maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 74-83.
- [22] 伍建军, 吴小明, 谢周伟, 等. 改进威布尔分布的矿冶零部件可靠性寿命预测研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(3): 436-441.
WU Jianjun, WU Xiaoming, XIE Zhouwei, et al. Prediction of reliability life of mining and metallurgy parts via an improved Weibull distribution[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(3): 436-441.
- [23] 孟晓承, 韩学山, 许易经, 等. SF6 高压断路器机械故障概率的非精确条件估计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 693-702.
MENG Xiaocheng, HAN Xueshan, XU Yijing, et al. Imprecise estimation for conditional mechanical outage probabilities of SF6 high voltage circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 693-702.
- [24] 范大茵, 陈永华. 概率论与数理统计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
-
- 收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-04-11
- 作者简介:
陈勇(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护;
李胜男(1974—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护;
张丽(1988—), 女, 学士, 高级工程师, 研究方向为继电保护。
- (编辑 周金梅)