

DOI: 10.7667/PSPC150693

基于内部温度的继电保护装置时变失效率研究

师元康¹, 姜振超², 赵书涛¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 时变失效率是继电保护装置状态评估的重要指标之一。随着在线监测技术的发展, 特别是新一代智能变电站的建设使得继电保护装置的温度参数成为可观测指标。从继电保护装置的温度指标入手, 对继电保护装置的时变失效率进行研究。首先将 Arrhenius 模型与 Weibull 分布模型相结合, 建立了继电保护装置内部主要功能模块在考虑运行温度下的时变老化失效率。然后利用串联模型将各模块的老化失效率和偶然失效率融合, 得到了继电保护装置整体的时变失效率模型。随后在算例中建立了某省网继电保护装置的时变失效率模型, 并以某台保护装置为例, 简要分析了运行温度差异以及装置内部模块更换对失效率的影响。结果表明, 运行温度对保护装置的失效率影响显著, 且温度差异的影响会随着运行时间的推移逐渐扩大。最后针对实际情况提出了改善运行温度的相关建议。
关键词: 新一代智能变电站; 继电保护; 失效率; 模块; 温度

Research on time-varying failure rate of protection devices based on internal temperature

SHI Yuankang¹, JIANG Zhenchao², ZHAO Shutao¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Time-varying failure rate is one of important indicators of protection devices' state assessment. With the development of on-line monitoring technology, especially the construction of new generation smart substations makes the temperature parameter of protection devices can be observed. This paper does research on time-varying failure rate of protection devices based on the temperature indicator. The paper combines Arrhenius model with Weibull distribution model and focuses on the time-varying aging failure rate under considering the operating temperature of the modules. Then the paper integrates the aging failure rate with the occasional failure rate of each module with the series model. At last, the paper establishes the time-varying failure rate model of a certain provincial grid's protection devices in the example, taking a device as an example, analyses the impact of operating temperature difference and replacing internal module on failure rate briefly. The result shows that temperature has significant influence on failure rate of protection device, and the influence will extend as time goes on.

Key words: a new generation of smart substation; relay protection device; failure rate; module; temperature

0 引言

随着电网规模扩大, 近年来大型互联电网频繁发生重大事故, 继电保护作为保障电网安全运行的第一道防线, 其可靠运行意义重大。因此, 如何通过开展继电保护的状态检修工作以保障其可靠运行已成为电力系统研究热门课题, 也是目前有待解决的重要问题之一。

状态评估是继电保护状态检修的核心环节, 而失效率是状态评估的重要指标之一。目前大部分研究都将继电保护装置本体作为一个整体, 在失效统计数据

的基础上对其失效率的总体分布进行分析, 仅有少量研究对继电保护装置内部器件的失效做了简要分析^[1-3]或提出基于内部监测量的状态评估方法^[4]。由于继电保护装置属于可维修设备, 事实上许多继电保护装置的内部模块经过了更换, 且更换时间不尽相同, 若以继电保护装置整体进行分析则难以考虑此类情况。而本文以内部模块为单元进行分析, 便可以根据待评估个体的具体情况进行评估分析。更重要的是, 现有研究在继电保护装置失效率的影响因素对其影响的分析方面还不够深入, 文献[5]从区域和环境差异方面对失效率的影响做了定性分析, 文献[6]虽然

提出了温变失效率模型,但模型缺乏依据且应用此模型得到的失效率明显偏离实际。

新一代智能变电站的建设使得继电保护装置的温度参数成为可观测指标,在此背景下,本文将 Arrhenius 模型与 Weibull 分布模型相结合,建立了主要功能模块的时变老化失效率,然后利用串联模型将各模块老化失效率和偶然失效率融合得到了继电保护装置整体的时变失效率模型。最后,在算例中以某省网的继电保护装置的实际情况为例,简要分析运行温度差异以及装置内部模块更换对某台装置的失效率的影响。

1 继电保护装置时变失效率模型

1.1 继电保护装置各模块失效情况分析

为了分析继电保护装置本体失效部位的分布情况,本研究对某省网所辖变电站中继电保护装置的失效情况按失效部位进行了统计,如表 1 所示。

表 1 2008~2015 年继电保护装置失效部位统计
Table 1 Statistics of failure part of protection devices from 2008 to 2015

	电源	CPU	光模块	其他部分
失效次数/次	1 124	1 231	206	295

由表 1 可以看出, CPU 模块和电源模块是最容易出现失效的部分,而光模块是从 2008 年传统站改造之后才开始大规模投入使用,运行时间较短,失效发生相对较少。但从继电保护装置的结构及原理进行分析,光模块和 CPU 模块以及电源模块的重要性相当,故下文主要讨论以上三个模块的失效率模型。

1.2 继电保护装置仅考虑运行时间的时变失效率

继电保护装置内部各个模块都是由大量的电子元器件构成,其失效模式可分为老化失效和偶然失效。与大部分电子产品类似,继电保护装置的失效率会随运行时间而变化,呈现浴盆形状,故称为“浴盆曲线”,如图 1 所示。

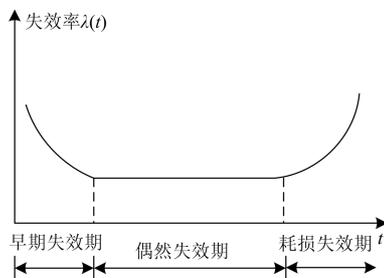


图 1 失效率时变曲线

Fig. 1 Curve of failure rate versus time

一般在继电保护装置运行之前,已经过了充分

了测试,由设计缺陷、工艺质量及现场安装引起的早期故障已经提前排除^[7],所以本文假设装置已渡过了早期失效期。在偶然失效期和耗损失效期,继电保护装置同时受到偶然失效和老化失效的影响,但不同时期的主导因素不同。在偶然失效期,失效主要由装置瞬时缺陷和外界环境影响引发的偶然失效引,而在耗损失效期,则主要是由于元器件老化引发的失效^[5]。本研究将老化失效与偶然失效分开讨论,故在统计失效数据时按失效模式分开统计。

1.2.1 老化失效率模型

在仅考虑时间变化的情况下,相关研究表明损耗失效期的失效率与 Weibull 分布切合度最高^[5],故本文采用 Weibull 分布对各模块的老化失效率进行拟合。

其失效分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{1}$$

进一步得到失效密度函数为

$$f(t) = F'(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{2}$$

可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{3}$$

最后得到失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{4}$$

式中: t 为失效前运行时间; β 为形状参数; η 为尺度参数。

1.2.2 偶然失效率模型

一般认为,继电保护装置在正常工作条件下,偶然失效率可以近似看作一个常数,不随时间和温度而变化,即认为偶然失效服从指数分布^[8],其失效率函数表达式如式(5)所示。

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = m \tag{5}$$

1.3 考虑温度因素的时变失效率

经过以上分析得到的时变失效率只能反映各个模块的总体失效情况,而不能反映某一个模块的实际状况。由于继电保护装置各个模块内部集成了大量的电子元器件,在运行过程中会产生大量热量导致内部温升,此外,各模块之间也会发生热交换,由于光模块连接了大量的光纤插头,其产生的热量可显著影响整个保护装置的温升。而温度是影响电子元器件老化的最重要因素,温度升高会加速其老化过程^[7],其中电源模块受到温度影响最为严重,其使用寿命可近似认为取决于电解电容的使用寿

命, 而电解电容寿命与运行温度直接相关^[9]。

相关研究表明, Weibull 分布的失效率函数的形状参数 β 在失效机理不变的情况下是一个定值, 尺度参数 η , 又称特征寿命, 与温度 T 之间的关系满足 Arrhenius 模型^[10], 如式(6)所示。

$$\eta = Ae^{\frac{E}{KT}} \quad (6)$$

式中: A 为一常数; $K=0.8617 \times 10^{-4}$ eV/K, 为玻尔兹曼常数; E 为失效激活能, 单位为 eV; T 为热力学温度, 单位为 K。激活能 E 与产品自身特性有关, 在产品失效机理不发生改变的情况下可认为是一个常数^[11]。

将式(6)代入式(4), 即可求得随时间和温度变化的失效率模型, 如式(7)所示。

$$\lambda(t, T) = \beta e^{-\frac{A\beta E}{KT}} t^{\beta-1} \quad (7)$$

2 失效率估算

2.1 老化失效率估算

老化失效率估算的主要工作是求得式(7)中的未知参数 A 、 β 和 E 。

失效激活能 E 可通过加速寿命试验, 利用温度斜坡法求得, 此方法用器件敏感参数退化率与应力水平之间的关系取代了常规方法中所需的寿命特征与应力水平的关系, 由单支样品即可得到其失效激活能^[12]。

常数 A 、形状参数 β 可以通过最小二乘估计法求得, 最小二乘法被广泛应用于非线性函数参数的求取, 具体包括 Marquardt 法、近似中位秩次法和可靠度分析法等^[7]。本文基于 T 、 t 与 λ 数据, 采用 1stOpt 软件中提供的 Levenberg-Marquardt(LM)法对 A 和 β 进行的三维参数估计。其中, 失效率 λ 的统计数据以 0.5 年为区间, 温度 T 也应取对应区间内的平均温度, 保护小室内空调使室内温度相对稳定, 保证了温度取值的合理性。

2.2 偶然失效率估算

偶然失效率可直接由符合指数分布函数的最大似然估计求得^[5], 如式(8)所示。

$$\hat{m} = \frac{\text{失效总数}}{\text{模块总运行时间}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_1 + \sum_{i=N+1}^n t_2} \quad (8)$$

式中: N 为模块偶然失效总数; $\sum_{i=1}^N t_1$ 为偶然失效模块

的总运行时间; $\sum_{i=N+1}^n t_2$ 为非偶然失效模块总运行时间。

2.3 继电保护装置整体时变失效率模型

串联系统是指系统中只要有一个元件失效, 就会导致整个功能失效的系统, 易得串联系统的失效率等于各个子系统的失效率之和, 如式(9)所示。

$$\lambda_{\text{sys}}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (9)$$

式中, $\lambda_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别代表各子系统的失效率, n 为子系统数量。

而继电保护装置与内部各个主要功能模块之间的关系即构成串联系统关系, 任一功能模块发生失效都会导致整台装置的失效, 又由于各模块的失效率由偶然失效率与老化失效率构成, 整理得到继电保护装置整体时变失效率, 如式(10)所示。

$$\lambda(T, t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(T, t) = \sum_{i=1}^n [\lambda_{Li}(T, t) + \lambda_{Oi}] \quad (10)$$

式中: $\lambda_{Li}(T, t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别代表各模块的时变老化失效率; λ_{Oi} ($i=1, 2, \dots, n$) 分别代表各模块的偶然失效率。进一步推导可得式(11)。

$$\lambda(T, t) = \lambda_{L1}(T, t) + \lambda_{L2}(T, t) + \lambda_{L3}(T, t) +$$

$$\sum_{i=4}^n \lambda_{Li}(T, t) + \sum_{i=1}^n \lambda_{Oi} \approx$$

$$\lambda_{L1}(T, t) + \lambda_{L2}(T, t) + \lambda_{L3}(T, t) + \left(\sum_{i=4}^n \lambda_{Li} + \sum_{i=1}^n \lambda_{Oi} \right) \quad (11)$$

式中: $\lambda_{L1}(T, t)$ 、 $\lambda_{L2}(T, t)$ 和 $\lambda_{L3}(T, t)$ 分别代表 CPU 模块、电源模块和光模块的时变老化失效率; $\sum_{i=1}^n \lambda_{Oi}$

代表继电保护装置整体的偶然失效率; $\sum_{i=4}^n \lambda_{Li}(T, t)$

代表其余部分的时变老化失效率, 由于此部分失效较少, 故近似作为常数处理, 在式(11)的第二步中将其近似为 $\sum_{i=4}^n \lambda_{Li}$, 并与 $\sum_{i=1}^n \lambda_{Oi}$ 合为一部分, 归入装置整体的偶然失效统计中。

3 实例分析

本研究以某省网的继电保护装置失效统计数据 and 实测温度为基础建立时变失效率模型, 并以某台待评估的继电保护装置为例进行分析。

经统计, 该省网所辖变电站在 2008~2015 年间, 继电保护装置的年平均数量为 12 082 台, 共发生失效 2 856 次, 其中偶然失效 582 次, 老化失效 2 274 次。继电保护装置各模块的年平均失效率数据及拟合曲线如图 2 所示, 由于光模块运行年限较短, 本

研究计算了其失效数量占同批次继电保护装置整体失效的比例, 约为 17%, 用继电保护装置整体的年平均失效数据乘以比例系数, 近似得到了光模块的年平均失效率数据。

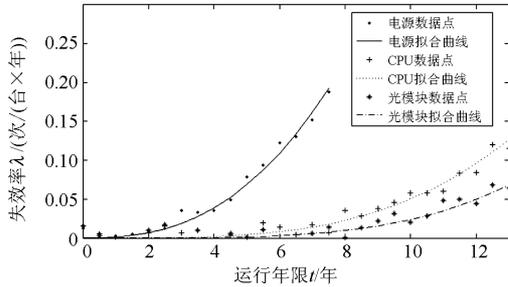


图 2 各模块失效率曲线

Fig. 2 Failure rate curves of each module

由图 2 可以看出, 电源模块的老化失效情况相比于其他模块要严重, 由于电解液的干涸以及温升导致的其他失效模式的影响, 目前大部分电源模块都会在使用 5 年左右后进行更换, 少数由于不能退出运行而未及时更换的电源模块在后续几年表现出了较高的失效率。

3.1 继电保护装置失效率模型建立

由于当前运行的大部分变电站都不是新一代智能变电站, 不具备将继电保护装置内部温度外送的条件, 故无法得到不同时期的准确温度。本研究根据各模块的运行特点, 分别挑选了投入运行 1~3 年、4~6 年和 6~8 年等年限区间的各 10 块模块, 用红外测温仪器对其内部温度进行了测量(保护小室室温为 20~25 °C)。将各个模块的运行时间和运行温度分别求平均值, 得到各个模块在不同时间点的近似温度值, 如表 2 所示。

表 2 各模块不同时间点的温度统计

Table 2 Temperature statistics of each module at various time-points

模块名称	温度/°C			
	1.2 年	4.6 年	6.8 年	11.4 年
电源	58.5	62.0	67.4	—
CPU	58.8	—	62.2	66.6
光模块	60.2	61.4	63.2	—

运维经验表明, 保护装置的内部温度总体是随运行年限的增加而缓慢升高的。由于保护小室内室温相对稳定, 故本研究忽略温度变化的局部波动性, 假设各模块的温度是缓慢上升的, 则可近似用指数型函数表征其变化规律, 如式(12)所示, 但实际温度的具体变化形式不影响本研究方法的可行性。

$$T = e^{at^2+bt+c} \quad (12)$$

式中: T 代表温度; t 代表运行时间; a 、 b 、 c 代表未知系数。

两边取对数, 线性化处理得到式(13)。

$$t^2 a + tb + c = \ln(T) \quad (13)$$

将各模块数据代入, 即可求得未知系数 a 、 b 、 c , 进而得到温度 T 的函数表达式, 函数曲线如图 3 所示。

利用运行年限 t 和与其对应的温度 T (在实际应用中将新一代智能变电站的实测温度处理后代入)以及失效率 λ 对式(7)中未知参数 A 和 β 进行参数估计。其中电源模块、CPU 模块和光模块的失效激活能 E 分别取 0.65 eV、1.2 eV 和 0.5 eV^[13-15], 各模块参数如表 3 所示。

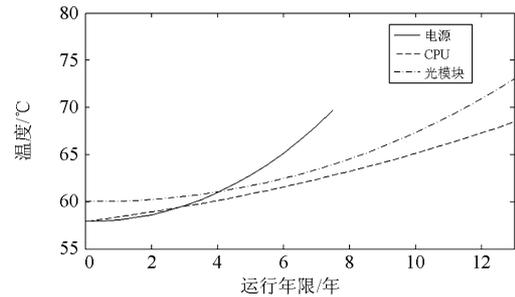


图 3 各个模块的温度变化曲线

Fig. 3 Temperature curve of each module

表 3 各模块老化失效率模型参数

Table 3 Parameters of aging failure rate models of various modules

模块名称	参数	
	A	β
电源	0.102 982	2.975 931
CPU	0.067 928	4.215 691
光模块	0.176 567	3.866 853

各模块的时变老化失效率变化趋势图如图 4 所示。

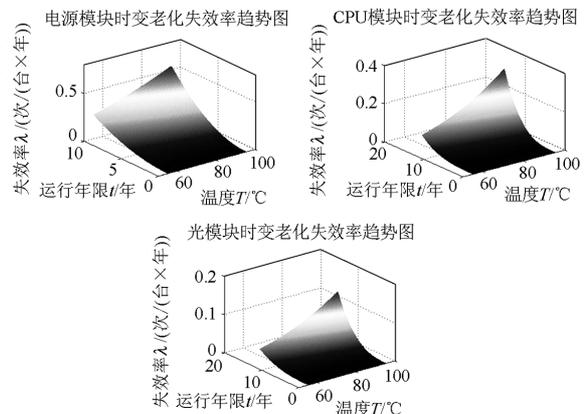


图 4 各模块时变老化失效率变化趋势图

Fig. 4 Time-varying aging failure rate tendency chart of each module

该地区继电保护装置运行年限分类统计如表 4 所示。

表 4 某省网继电保护装置运行年限统计
Table 4 Run time statistics of protection devices
in of a certain provincial grid

运行年限	1 年内	1~5 年	6~10 年	11~13 年
数量/台	1 658	7 960	5 402	1 579

将表 4 数据中的运行年限按区间折中处理, 加权求和后可近似得到装置的总运行时间, 利用式(8)可求得装置的偶然失效率为 0.670×10^{-2} 次/(台×年)。

最终得到地区继电保护装置考虑运行温度及各模块投入时间的时变失效率, 如式(15)所示。

$$\lambda(T_1, T_2, T_3, t_1, t_2, t_3) = 2.975973e^{-0.102982 \times \frac{2.975931 \times 0.65}{0.8617 \times 10^{-4} \times T_1} \times t_1^{1.975931}} + 4.215691 \times e^{-0.067928 \times \frac{4.215691 \times 1.2}{0.8617 \times 10^{-4} \times T_2} \times t_2^{3.215691}} + 3.866853 \times e^{-0.176567 \times \frac{3.866853 \times 0.5}{0.8617 \times 10^{-4} \times T_3} \times t_3^{2.866853}} + 0.670 \times 10^{-2} \quad (14)$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 分别代表电源模块、CPU 模块、光模块的温度; t_1 、 t_2 、 t_3 分别代表电源模块、CPU 模块、光模块的运行年限。

3.2 不同因素对失效率影响分析

以某台继电保护装置为例, 其投入运行时间为 2009 年 7 月 1 日, 假设 2 种情况。

(1) 电源模块于 2011 年 1 月 1 日进行了更换, 在此基础上再对其温度设定 3 种假设条件: 1) 温度与图 3 相同; 2) 温度变化趋势相同, 但数值比图 3 低 5°C ; 3) 温度变化趋势相同, 但数值比图 3 高 5°C ;

(2) 内部各个模块均未更换, 各模块温度与图 3 相同。

则从 2011 年 1 月 1 日至 2015 年 1 月 1 日, 继电保护装置整体的时变失效率曲线如图 5 所示。

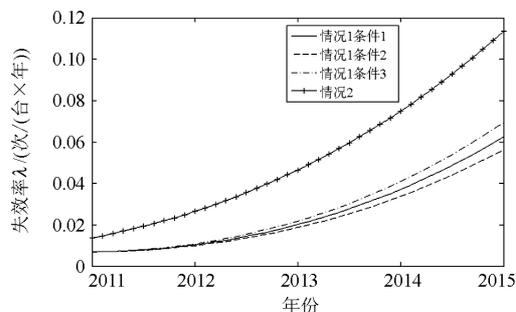


图 5 不同条件时变失效率曲线

Fig. 5 Time-varying failure rate curve in different cases

比较情况 1 的 3 种条件下的曲线, 可看出对于运行温度较低的装置的失效率相对较低, 而且在进入老化期后, 不同温度下运行的继电保护装置的失效率的差值会越来越大, 故运行温度也是影响失效率的重要因素。而情况 2 和情况 1 条件 1 的差异体现了考虑模块更换因素的必要性。

4 改善设备运行温度分析

为了改善设备运行温度, 减缓设备老化, 针对新一代智能变电站二次设备预制舱的实际情况应主要考虑以下 3 个方面。

(1) 预制舱内环境温度。舱内空调的设计功率应有适当裕度, 特别是在高温地区应保证在持续极端天气下可将室温控制在规范范围。

(2) 屏柜散热。新一代智能变电站内二次屏柜靠墙放置, 背部不具备散热能力, 而顶部由于空间较小导致散热效果有限, 可考虑改变前门设计形式, 增加散热孔。

(3) 设备自身发热。主要需要设备厂家在设备的热设计和低功耗设计方面进行改善。

5 结语

新一代智能变电站实现了继电保护装置部分内部监测信息的外送, 本文在此背景下, 对继电保护装置基于监测信息的时变失效率做了探索性研究, 建立了继电保护装置考虑运行温度及模块更换因素的时变失效率模型。最后通过算例简要分析了运行温度差异以及装置内部模块更换对某台装置失效率的影响, 结果表明, 温度对失效率的影响较为明显且随运行时间扩大, 此外, 模块更换因素在失效率研究中也应忽视。

今后需要开展的工作: 由于本研究的一些细节没有相关研究可以参考或者缺乏统计数据, 本文在研究过程中做了尽可能合理的近似和假设。随着新一代智能变电站中二次系统监测数据的完备以及相关研究的开展, 后续研究将针对存在的不足进行完善, 并以时变失效率和其他监测量为基础建立状态评估模型, 为继电保护装置状态检修的实用化提供重要的参考。

参考文献

- [1] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 51-56.
WANG Gang, DING Maosheng, LI Xiaohua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 51-56.

- [2] 薛安成, 王宝, 王睿琛, 等. 直流保护装置时变失效特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 17-21.
XUE Ancheng, WANG Bao, WANG Ruichen, et al. Analysis of Time-varying failure characteristics for HVDC protection device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 17-21.
- [3] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于三参数 Weibull 分布的继电保护装置老化失效率估算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 72-78.
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on aging failure rate estimation of protective relay based on three-parameter Weibull distribution[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 72-78.
- [4] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41.
LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [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] 安灵旭, 陈中伟, 方华亮, 等. 考虑运行时间和温度的继电保护可靠性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 7-11.
AN Lingxu, CHEN Zhongwei, FANG Hualiang, et al. Reliability analysis of protection system with conditions of operating time and operating temperature[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 7-11.
- [7] 易永辉. 继电保护装置寿命分析及寿命影响机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 79-83.
YI Yonghui. Research of relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [8] 徐志超, 李晓明, 杨玲君. 基于全寿命周期成本的继电保护装置退出时间评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 41(21): 151-155.
XU Zhichao, LI Xiaoming, YANG Linghun. Evaluation for exit time of relay protection devices based on life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 41(21): 151-155.
- [9] 欧阳帆, 张亮峰, 李刚, 等. 微机保护装置逆变电源故障原因分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 150-153.
OUYANG Fan, ZHANG Liangfeng, LI Gang, et al. Analysis of power supply module faults for microprocessor protection devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 150-153.
- [10] 林震, 姜同敏, 程永生, 等. 阿伦尼斯模型研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(6): 12-14.
LIN Zhen, JIANG Tongmin, CHENG Yongsheng, et al. Study on Arrhenius relationship[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005(6): 12-14.
- [11] 郭春生, 万宁, 马卫东, 等. 恒定温度应力加速实验失效机理一致性快速判别方法[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 478-482.
GUO Chunsheng, WAN Ning, MA Weidong, et al. Rapid identification of the consistency of failure mechanism for constant temperature stress accelerated testing[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 478-482.
- [12] 李杰, 郭春生, 莫郁薇, 等. 快速确定微电子器件失效激活能及寿命试验的新方法[J]. 半导体学报, 2005, 26(8): 1662-1666.
LI Jie, GUO Chunsheng, MO Yuwei, et al. A new method of rapidly confirming activation energy and extrapolating life of electronic device[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(8): 1662-1666.
- [13] 顾益双, 舒勤, 姜振超, 等. 光模块加速寿命试验最佳测试温度的确定方法[J]. 半导体光电, 2014, 35(3): 406-410.
GU Yishuang, SHU Qin, JIANG Zhenchao, et al. Determination the optimum test temperature of accelerated life test for optical module[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(3): 406-410.
- [14] 刘扬, 吕长志, 谢雪松, 等. DC/DC 变换器模块可靠性寿命预计[J]. 功能材料与器件学报, 2010, 16(3): 266-270.
LIU Yang, LÜ Changzhi, XIE Xuesong, et al. Reliability life estimate for DC/DC converter[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2010, 16(3): 266-270.
- [15] 马卫东, 吕长志, 李志国, 等. Arrhenius 方程应用新方法研究[J]. 微电子学, 2011, 41(4): 621-626.
MA Weidong, LÜ Changzhi, LI Zhiguo, et al. Study on a new evaluation method using Arrhenius equation[J]. Microelectronics, 2011, 41(4): 621-626.

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-06-28

作者简介:

师元康(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站及继电保护; E-mail: yuankang_shi@163.com

姜振超(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能变电站及继电保护; E-mail: jiangzhenchao@126.com

赵书涛(1967-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: shutaozhao@163.com

(编辑 姜新丽)