

DOI: 10.7667/PSPC161826

继电保护装置运行年限评价的研究

黄峰¹, 邓勇², 任晓辉², 唐志军³, 邵振国¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网福建电力调度控制中心, 福建 福州 350003;
3. 国网福建电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 针对继电保护状态检修中一刀切地评价装置运行年限的问题, 介绍了一种装置合理运行年限估计的方法。首先以装置缺陷产生原因和失效率特点将装置缺陷分为早期缺陷、偶热缺陷和老化缺陷。然后将装置现场数据作为随机截尾试验数据分类计算装置中后期缺陷发生次数期望, 其中早期缺陷为固定值, 偶然和老化缺陷分别符合指数和威布尔分布。接着分析状态检修制度和装置配置方式对检修工作开展的影响, 从而构建以单位时间费用最小为目标的函数估计装置合理的运行年限。最后利用某地区线路保护装置现场数据说明本方法的可行性。

关键词: 继电保护装置; 运行年限; 失效率; 状态检修; 随机截尾试验

Assessment for service life of relay protection device

HUANG Feng¹, DENG Yong², REN Xiaohui², TANG Zhijun³, SHAO Zhenguo¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. State Grid Fujian Power-Dispatch & Control Center, Fuzhou 350003, China;
3. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Aiming at the disadvantage of assessing service life of relay protection devices with the same yardstick, an assessment method of optimum service life is proposed. At first, device defects are classified into early defect, accidental defect and aging defect according to the defect cause and the failure rate characteristic of devices. Field data is used as random censoring test data to solve occurrence times expectation of device defect. The expectation of early defect is fixed value, accidental defect accords with exponential distribution and aging defect accords with Weibull distribution. Then, the function of unit time cost is built considering the effect of condition based maintenance policy and configuration to assess optimum service life. At last, the feasibility is proved utilizing the field data of transmission line protection devices.

This work is supported by Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2016J01219).

Key words: relay protection device; service life; failure rate; condition based maintenance; random censoring test

0 引言

继电保护装置通过状态检修延长装置寿命以节约运维成本。但随着装置运行时间增加, 装置缺陷发生的频率也会增加。一味地检修反而会增加运维的成本, 而过早地安排技术改造也会造成浪费。但在当前的技改工作中, 运维人员通常统一以DL/T587—2007规定的装置使用年限下限值作为衡量所有装置是否需要更换的标准。这种一刀切的方式往往不能兼顾装置运行的可靠性和经济性。

同类型继电保护装置合理运行年限的估计方法

主要理论包括构建装置失效模型和目标函数两方面。许多研究通过不同方法分析了装置的时变失效特性^[1-4], 但对装置现场数据的处理方面仍有一些不足之处。文献[5]研究了装置双重化配置下求解最优更换周期的方法。文献[6]研究了定期检修制度下最佳定检间隔和更换时间的估计。但这些文献对装置失效率随时间变化的规律研究均不足, 也未考虑继电保护状态检修制度^[7]等因素的影响。

因此本文从继电保护装置失效模型和单位时间费用函数两个方面展开。首先通过分析装置缺陷特点, 指出在缺陷分类构建失效模型时也需考虑装置早期缺陷。将装置现场数据视为随机截尾试验数据, 以增加样本数量、提高模型精度, 进而求得缺陷发

生次数期望值。然后在目标函数中引入反映状态检修、配置方式、拒动误动概率等因素的系数, 提出一种装置合理运行年限估计的方法。最后以某地区继电保护缺陷历史记录作为实例进行对比分析, 验证了方法的可行性。

1 继电保护装置失效模型

构建装置失效模型需依据装置缺陷产生原因和失效率分布特点分类分析。利用装置可靠性现场数据估算不同分布函数的参数, 进而求得装置缺陷发生次数期望随时间变化的函数。

1.1 缺陷分类

失效率是继电保护装置单位时间内缺陷发生的概率, 是研究装置缺陷发生时间规律主要的统计量。装置失效率变化符合浴盆曲线, 包含早期失效期、偶然失效期、损耗失效期^[8-9]。不同时期装置缺陷率显示出不同的变化规律。这是由装置不同类型缺陷综合作用的结果, 不能用单一模型进行分析。

早期缺陷是指个别装置由于工艺和材料的瑕疵或建设中意外情况造成的缺陷, 通常多在装置投运初期发生, 实际中时有发生, 无法忽略。偶然缺陷主要由外界环境因素造成, 在装置整个寿命周期内均有发生, 缺陷发生有一定随机性。老化缺陷由装置内部元件老化引起。失效率随着投运时间增加而上升, 在损耗失效期占主导地位^[1]。考虑保护装置实际发生的具体缺陷, 可将由制造工艺引起的 CPU 插件、AD 插件等逻辑元件缺陷划分为早期缺陷, 可将由外界干扰造成的通道异常、人为造成的参数错误等缺陷划分为偶然缺陷, 可将电源插件、液晶屏等有较明显老化过程的元件的缺陷划分为老化缺陷。具体如表 1 所示。

表 1 缺陷分类

Table 1 Classification of defects

| 缺陷类型 | 具体缺陷 |
|------|--------------------------|
| 早期缺陷 | CPU 插件缺陷、AD 插件缺陷、通信插件缺陷等 |
| 偶然缺陷 | 接头松动、光纤损坏、通道中断或异常、参数错误等 |
| 老化缺陷 | 电源插件缺陷、人机交互插件缺陷等 |

通过式(1)可观察各类缺陷的失效率以及校验分类的正确性。

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_f(t, t + \Delta)}{n_s(t) \times \Delta} \quad (1)$$

式中: t 为装置运行时间; Δn_f 为单位时间内缺陷发生的次数; n_s 为 t 时刻正常运行的装置数量。

装置各类缺陷可以认为独立作用于装置, 任何一种缺陷发生都将导致装置失效。这符合可靠性理

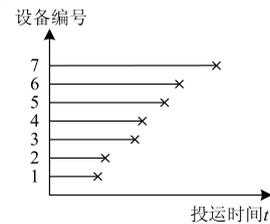
论的竞争性模型^[10]。分类分析缺陷失效模型后, 可通过式(2)、式(3)计算出装置整体失效率分布和失效累积分布函数。

$$\lambda(t) = \sum \lambda_k(t) \quad (2)$$

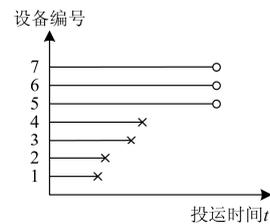
$$F(t) = 1 - \prod R_k(t) = 1 - \prod [1 - F_k(t)] \quad (3)$$

1.2 现场数据处理

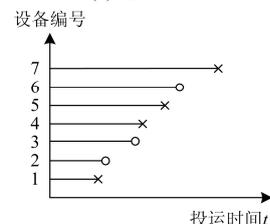
可靠性现场数据是继电保护装置从投运开始至缺陷发生时的故障时间 t_f , 或至进行统计时的无故障运行时间 t_s 。现场数据可以视为不同可靠性试验所获得的数据以对装置失效率变化特点进行研究。常见的试验有完全寿命试验、定时截尾试验、随机截尾试验等。完全寿命试验的特点是试验中的所有样本均失效。对于高可靠性的继电保护装置来说, 大部分装置运行至退役也不会发生缺陷, 完整的故障时间是无法获得的。定时截尾试验只有部分样本失效, 且完好样本的无故障时间相同。这就要求只采用同一批次装置的现场数据分析。若要详细分析某一地区某一类型装置的失效情况, 就存在样本少、误差大的问题。而随机截尾试验中样本可能随机删除, 完好样本的无故障时间不全是相同的^[10]。因此使用随机截尾试验的方法则可以将不同投运时间的全体装置作为研究对象, 充分利用收集到的现场数据。各类试验数据的特点可用图 1 形象化表示。



(a) 完全寿命试验



(b) 定时截尾试验



(c) 随机截尾试验

× 装置失效 ○ 未失效装置进行统计

图 1 继电保护装置现场数据

Fig. 1 Field data of relay protection devices

随机截尾试验数据通过 Kaplan-Meier 法^[11]得到每次缺陷对应失效累积频率观测值 F_j ，如式(4)所示。研究某一类缺陷时，发生其他缺陷的装置认为是完好的装置。

$$F_j(t_j) = 1 - \prod_{i=1}^j \left[\frac{n_s(t_i) - 1}{n_s(t_i)} \right] \quad j=1, 2, \dots, n_f \quad (4)$$

式中： t_j 为第 j 次缺陷发生的故障时间； $n_s(t)$ 为 t 时刻正常运行的装置数量。

失效模型的构建方法是基于不可修复产品的，而继电保护装置可修复。因此使用装置首次发生缺陷的现场数据构建失效模型，再推算装置缺陷发生次数的期望。

1.3 失效率分布

1) 早期缺陷

根据对一些缺陷历史记录的分析，可以认为早期缺陷一般只在装置投运后 5 年内发生。因此可以认为装置运行中后期早期缺陷的发生次数是恒定值，得到早期缺陷失效分布函数 $F_1(t)$ 为

$$F_1(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n_{f5}} \left[\frac{n_s(t_i) - 1}{n_s(t_i)} \right] \quad t > 1825 \text{d} \quad (5)$$

式中， n_{f5} 为投运后 5 年内缺陷发生次数。

2) 偶然缺陷

偶然缺陷符合指数分布。用极大似然法^[12]求出模型参数，继而得到偶然缺陷的失效率分布为

$$\lambda_2(t) = \lambda_0 = \frac{n_f}{\sum t_f + \sum t_s} \quad (6)$$

式中： n_f 为偶然缺陷数量； t_f 为发生偶然缺陷的装置的故障时间； t_s 为完好装置的无故障时间。

3) 老化缺陷

现有文献一般认为老化缺陷符合威布尔分布。三参数威布尔分布较二参数威布尔分布增加了位置参数 γ ，拟合较精确。使用迭代法和最小二乘法相结合，用观测值拟合失效累积分布 $F(t)$ ^[3]。从而计算失效模型形状参数 β 、尺度参数 η 和位置参数 γ ，继而得到老化缺陷的失效率，如式(8)所示。

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

$$\lambda_3(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

1.4 缺陷发生次数期望

根据检修效果可将对电气设备的检修分为：完全检修、不完全检修、最小检修。完全检修意味着“修旧如新”，最小检修则指“修旧如旧”，不完全检修的效果介于两者之间^[13]。消除继电保护装置缺

陷通常直接更换插件，是不完全检修。但装置整体失效率是多个缺陷失效率的和，单个插件更换影响不大，也可近似认为消缺后装置失效率不变。

考虑到检修时间只占装置生命周期很小一部分，可以忽略，则认为装置数量保持不变。因此装置失效次数为失效率的积分值，得到单台装置缺陷发生次数期望随时间变化函数 $N(t)$ 为

$$N(t) = a \times F_1(t) + \int_0^t \lambda_2(\delta) d\delta + \int_0^t \lambda_3(\delta) d\delta \quad (9)$$

$t > 1825 \text{d}$

由于早期缺陷失效模型难以构建，使用失效累积频率乘以系数 a 作为估算早期缺陷发生次数期望，取 $a=1.1$ 。

2 单位时间费用函数

估计继电保护装置合理运行年限需考察装置全周期费用。其中检修费用和故障风险费用受状态检修发现故障的概率和装置配置方式影响。

2.1 检修策略

目前继电保护状态检修已在国内推广实施，该制度通过对装置状态的评价提前发现装置缺陷，继而适时安排检修，降低了检修的工作量并有效避免了一次设备停运。目前继电保护状态评价还无法准确地预测装置所有缺陷，因此设变量 P_{CBM} 来反映状态检修能提前发现缺陷的概率。

2.2 配置方式

110 kV 及以下继电保护装置通常单重配置，而 220 kV 及以上装置通常双重化配置。单重配置下，装置发生缺陷均造成一次设备停运。而双重化配置下，两套保护以“或”的逻辑判断保护动作，任意一套保护拒动不影响保护功能，而误动则直接造成一次设备停运。由于保护装置缺陷主要导致保护拒动，双重化配置实际提高了保护装置的可靠性。因此设变量 P_B 表示两种配置下保护装置缺陷造成停电的概率。

当保护双套配置下， P_B 为

$$P_B = \frac{t_{MTTR} \times N_f \times (1 - P_{CBM})}{\sum T} \times P_J + P_W \quad (10)$$

式中： P_J 为装置缺陷造成拒动的概率； P_W 为装置缺陷造成误动的概率； N_f 为样本中失效次数； t_{MTTR} 为平均的检修时间； $\sum T$ 为所有装置现场数据的和。当保护单套配置下， P_B 取值为 1。

2.3 构建目标函数

全寿命周期费用是指设备从安装到最终报废所经历的每个阶段所需费用的集合^[14]。继电保护装置全寿命周期费用包括装置的购置和退役回收费用、

运行费用、检修费用和故障风险费用。因为装置是全天候运行的, 单位时间的运行费用基本不变, 可不予考虑。根据上述的分析, 继电保护装置全寿命周期的单位时间费用如式(11)所示。

$$C(t) = \frac{C_{\text{replay}}}{t} + \frac{N(t) \times P_{\text{CBM}} \times C_M}{t} + \frac{N(t) \times (1 - P_{\text{CBM}}) \times (C_M + P_B \times C_B \times t_{\text{MTTR}})}{t} \quad (11)$$

式中: C_{replay} 是装置技改费用, 包括新装置的基建费用和旧装置的回收费用; C_M 为单台装置单次检修费用; C_B 为平均每小时停电损失。

3 实例分析

3.1 装置缺陷失效模型

以某地区 220 kV 线路保护装置现场数据为例。依据上文所述装置缺陷原因对其进行分类, 以半年为单位时间计算装置失效率, 如图 2 所示。可见早期缺陷只在装置投运 5 年之内发生, 偶然缺陷具有一定随机性, 老化缺陷呈现递增的趋势。

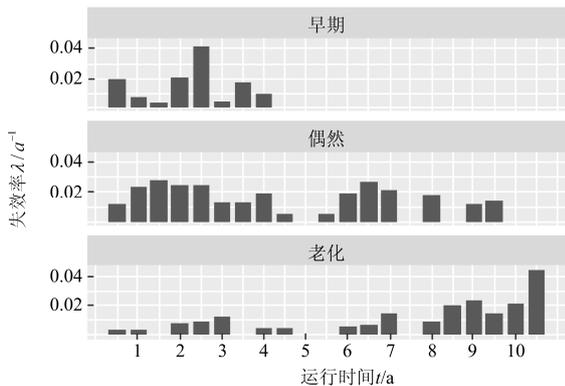


图 2 三类缺陷失效率分布

Fig. 2 Failure rate distribution of three kinds of defects

依据上文提出的失效累积率方法计算了某地区 220 kV 线路保护装置的失效累积分布频率和观测值, 并对比了不区分缺陷类型拟合威布尔分布的方法和文献[1]提出的两类缺陷构造失效模型的方法, 如图 3 所示。对比的方法中威布尔函数法、两类分析法误差较大, 本文所提方法计算结果与观测值更接近。并且威布尔函数法、两类分析法均受较高的早期缺陷影响, 求得的威布尔分布形状参数 $\beta < 0$, 失效率单调递减, 无法反映装置老化过程, 亦无法用于估计运行年限。

将图 2 的失效率累加求得实际缺陷发生次数与单台装置缺陷发生次数期望 $N(t)$ 进行对比, 如图 3 所示。可见两者相近, 可近似认为消缺后装置失效率不变。

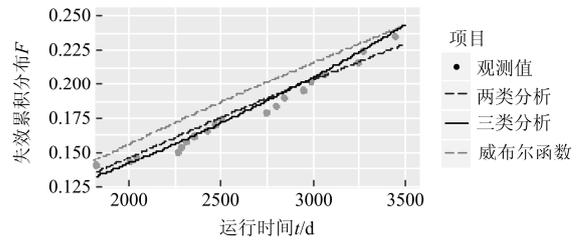


图 3 失效累积分布对比

Fig. 3 Comparison of failure cumulative distributions

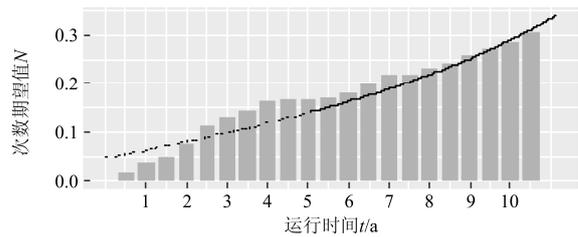


图 4 缺陷次数期望对比

Fig. 4 Comparison of occurrence times expectation and true value of defects

3.2 装置合理运行年限估计

以 C_{replay} 作为各项费用的基准值, 参考文献[5-6]中的各项费用取值, 如表 2 所示。

表 2 各费用取值

Table 2 Value of costs

| 项目 | 费用 |
|---------------------|-----------|
| C_{replay} | 1/台 |
| C_M | 0.2/(台·次) |
| C_B | 0.3/(次·h) |

按照《国家电网公司继电保护和自动装置缺陷管理办法》要求取平均修复时间 $t_{\text{MTTR}}=24$ h; 假设缺陷造成保护拒动概率 $P_j=0.99$, 则 $P_W=1-P_j=0.01$; 设通过状态评价发现的缺陷概率 $P_{\text{CBM}}=0.1$ 。可得双重化配置下的 220 kV 保护装置合理运行年限 $t=7986$ d, 约为 21.8 a, 如图 5 所示。

假设 110 kV 保护装置有同样的缺陷模型。由于装置单重配置, 求得 t 约为 10.4 a, 如图 5 所示。可见 DL/T587—2007 规定的装置使用年限下限值 12 年较适用于单重配置的保护装置而双重化配置的装置应运行更长的时间。

此外, 随着继电保护状态检修工作的深入, 越来越多装置缺陷能够通过状态提前被发现。单重配置下, 对 P_{CBM} 取 {0.1, 0.4, 0.7} 分别绘制 $C(t)$ 曲线, 如图 6 所示, 求得 t 分别为 10.3 a, 11.3 a, 13.14 a。可见通过提高状态检修提前发现缺陷的能力, 能延

长装置运行年限，并能够显著降低装置单位时间费用。通过式(11)也可以看出，缩短平均检修时间、降低单次检修费用均能够达到同样的效果。因此估计装置合理运行年限时应结合状态检修工作开展的实际情况。

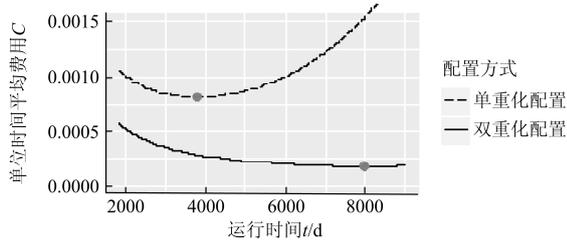


图 5 不同配置方式 $C(t)$ 曲线

Fig. 5 $C(t)$ distribution in different configurations

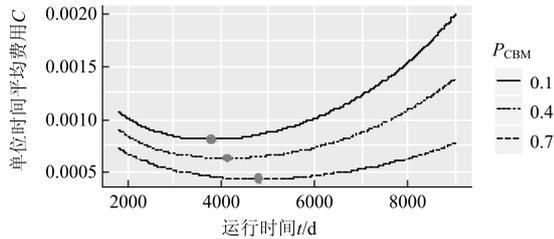


图 6 不同 P_{CBM} 取值时 $C(t)$ 曲线

Fig. 6 $C(t)$ distribution in different P_{CBM}

4 结论

本文首先介绍了装置早期缺陷、偶然缺陷和老化缺陷产生原因和失效率变化特点，并介绍了各类缺陷包含的主要缺陷模式。然后将不同投运时间同类型装置现场数据作为随机截尾试验数据，并分类构建失效模型，估计装置缺陷发生次数期望值。以单位时间总费用最小为目标，考虑了状态检修提前发现装置缺陷的能力、装置配置情况和装置可靠性的关系、装置缺陷导致拒动和误动等因素，构建目标函数，进而提出合理运行年限的估计方法。

最后通过某地区线路保护装置缺陷历史记录进行计算分析，验证了本文提出方法的可行性。对比分析说明，考虑装置早期缺陷的必要性，讨论了装置配置和状态检修水平等因素对运行年限的影响。指出不同类型的继电保护装置可靠性差别大，装置的运行年限应根据装置实际情况进行估计。应不断提高状态检修提前发现装置缺陷的能力，能有效地降低运行维护费用和延长装置运行年限。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 邱胜顺, 张明, 吕勤. 基于 AMSAA 和 MTBF-T 模型评估电子设备使用寿命[J]. 电气自动化, 2014(5): 100-102.

QIU Shengshun, ZHANG Ming, LÜ Qin. AMSAA and MTBF-T-based evaluation of service life of electronic equipment[J]. Electrical Automation, 2014(5): 100-102.

[4] FAN X, ZHANG Z, YIN X, et al. Study of maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[C] // Power Engineering Conference (UPEC), 2015 50th International Universities, 2015: 1-5.

[5] 薛安成, 王睿琛, 王宝, 等. 基于单位生命周期费用最小的继电保护装置更换策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 44-48, 60.

XUE Ancheng, WANG Ruichen, WANG Bao, et al. A relay replacement strategy based on the least unit life-cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 44-48, 60.

[6] 王玉财, 吕飞鹏, 何奎. 满足可靠性要求的继电保护装置预防检修模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 49-53.

WANG Yucai, LÜ Feipeng, HE Kui. Preventive maintenance model for relay protection device based on reliability requirements[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 49-53.

[7] 继电保护状态检修导则: Q/GDW 1806—2013[S]. Guide for condition based maintenance strategy of protective relay: Q/GDW 1806—2013[S].

[8] 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.
- [9] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.
- ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 56-62.
- [10] 贺国芳. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [11] 沈安慰, 郭基联, 王卓健. 竞争性故障模型可靠性评估的非参数估计方法[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 49-56.
- SHEN Anwei, GUO Jilian, WANG Zhuojian. Nonparametric estimation method of reliability evaluation in competitive fault model[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 49-56.
- [12] 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 equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 6-10.
- [13] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 一种适用于状态检修的电力设备时变停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 139-146, 121.
- JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A time-varying component outage model for power system condition-based maintenance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 139-146, 121.
- [14] 王建. 全寿命周期成本理论在电力设备投资决策中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- WANG Jian. Research on electric equipment investment decision-making based on LCC theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

收稿日期: 2016-11-03; 修回日期: 2017-02-17

作者简介:

黄 烽(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护状态检修; E-mail: hhffmmqq@126.com

邓 勇(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度自动化、电力市场、继电保护。E-mail: hhdyyong@vip.sina.com

(编辑 姜新丽)