

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200682

基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略

叶远波¹, 谢民¹, 陈晓东², 项忠华²

(1. 安徽电力调度控制中心, 安徽 合肥 230022; 2. 国网安徽省宣城供电公司, 安徽 宣城 242000)

摘要: 为了准确计算继电保护系统状态检修的具体检修周期, 方便运维人员安排检修计划, 提出了一种基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略。根据历史数据拟合其基础故障率模型, 分别考虑中长期和短期等因素的影响, 形成修正后的继电保护系统实际故障率模型。在此基础上, 结合工程应用经验和相关导则, 通过设立累积故障率阈值, 计算具体的检修周期。算例结果表明, 所提出的状态检修策略可以为运维人员提供具体的检修周期, 提高了检修的工程应用性。

关键词: 继电保护系统; 故障率模型; 模型修正; 累积故障率; 状态检修策略

A condition-based maintenance strategy for a relay protection system based on failure probability analysis

YE Yuanbo¹, XIE Min¹, CHEN Xiaodong², XIANG Zhonghua²

(1. Anhui Electrical Power Dispatch Centre, Hefei 230022, China; 2. State Grid Anhui Xuancheng Electrical Power Company, Xuancheng 242000, China)

Abstract: To accurately calculate the condition-based maintenance cycle for a protection relay system, and to make it convenient for the operational staff to prepare the maintenance schedules, a new condition-based maintenance strategy is developed based on failure probability analysis. Given the historical failure data, a fitted model is established. By considering the influence of short- and long-term factors, a real amending failure probability model for a protection relay system is proposed. Then, in accordance with engineering experience and some related guides, the maintenance cycle can be calculated by setting the accumulated failure probability threshold. The simulation results testify that the proposed maintenance strategy can provide a more practical maintenance cycle for operational staff and increase the engineering applicability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521200190081).

Key words: relay protection system; failure rate model; model modification; accumulated failure probability; condition-based maintenance strategy

0 引言

状态检修模式是根据设备实际运行状态和发展趋势, 动态调整检修周期, 从而避免传统定期检修方式存在的过检或欠检等问题^[1-2]。相比于传统的定期检修模式, 状态检修模式具有更好的经济性和可靠性, 正逐步推广应用^[3-4]。

检修时机的合理确定是实现状态检修的关键。文献[5]以模糊支持向量机为基础, 提出了一种新的继电保护状态评价方法和检修策略; 文献[6]针对继

电保护装置运行温度和光纤回路收发信功率, 建立一种在线监测的实现方法和评价策略; 文献[7]和文献[8]定义了检修和故障风险, 并以研究周期内两种风险之和最小为目标, 实现了状态检修周期的优化求解; 文献[9]提出了检修阈值的概念, 并量化了可用性和设备的使用效率, 由此建立了状态检修模型, 并计算了设备检修的最佳时机。在工程应用方面, 国家电网公司制定了相关导则和规程^[10-11], 给出了继电保护健康状态的评价体系、评价指标和计算方法。但相关导则和规定给出的状态检修周期具有较大的弹性范围, 无法给出确定的最佳检修周期^[10], 难以充分发挥状态检修的技术优势。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(521200190081)

本文针对目前现有继电保护系统状态检修导则和规程制定的检修周期较为宽泛,难以开展现场应用的问题,提出了一种基于故障率分析的状态检修方法。该方法以设备故障率模型为基础,结合现场工作经验,实现状态检修周期的优化求解,并通过算例验证了所提方法的合理性和可行性。

1 继电保护系统故障率模型

故障率作为继电保护系统的一个重要可靠性指标,其影响因素包括长期影响因素和短期影响因素^[12],这两类影响因素都会改变设备的基础故障率。长期影响因素主要是由于设备的制造工艺、长期运行环境、自身老化失效等渐变因素导致;短期影响因素主要是由于外界环境突变、偶然性时间等突发性因素导致。为得到符合某一继电保护元件自身特性的故障率模型,本章重点分析同类元件的故障率模型,以此为基础,研究短期和长期影响因素的修正作用。

1.1 基础故障率模型

继电保护系统作为一种常用的电子元件,其故障率变化趋势与浴盆曲线相吻合,包括早期故障期、偶然故障期、损耗故障期三个阶段^[13],如图1所示。

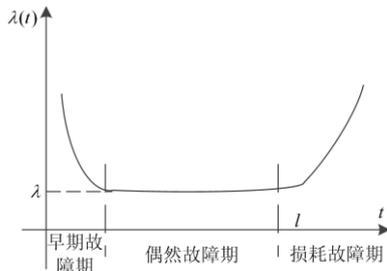


图1 基础故障率曲线
Fig. 1 Basic failure rate curve

对于浴盆曲线,常用的描述模型包括威布尔分布、伽马分布、正态分布等^[14-16]。其中,威布尔分布通过设置不同的形状参数和尺度参数,可较好地体现浴盆曲线的不同阶段,在相关研究中使用最为广泛。威布尔分布的表达式如式(1)所示。

$$\lambda_0(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} \quad (1)$$

式中: t 表示时间; α 、 β 分别为尺度参数和形状参数。

根据式(1),不同的尺度参数可以描述浴盆曲线不同的阶段:对于早期故障时期,元件逐渐磨合完毕,其故障率逐渐下降,此时 $\alpha < 1$;对于偶然故障期,此时元件运行状况逐渐稳定,故障率也近似为常数,此时 $\alpha = 1$;对于损耗故障期,元件进入寿命

末期,故障率逐步升高,此时 $\alpha > 1$ 。

基于元件的故障历史数据,分别拟合各阶段的形状参数和尺度参数,由此得到这一类元件的基础故障率模型。常用的威布尔分布参数拟合方法包括最小二乘法、极大似然法、贝叶斯法等^[17-18]。其中,最小二乘法由于原理成熟、建模简单等特点,得到了广泛的工程应用^[19-23],具体的拟合方法可以参考文献^[2,17]。

1.2 长期影响因素修正

由于单一元件的历史故障率数据较少,因此需要对同类元件的历史故障率数据进行拟合,得到基础故障率模型难以反映元件的个体差异。对于长期影响因素中的家族性因素和个体因素,为便于现场应用,通常对基础故障率模型乘以相应的系数,以此做简化修正^[2-4],如式(2)所示。

$$\lambda_1(t) = \eta \times \lambda_0(t) \quad (2)$$

式中: η 为长期影响因素修正系数; $\lambda_0(t)$ 为基础故障率模型。

长期影响因素除了家族性缺陷和个体缺陷,还包括该元件在运行过程的历次检修行为的影响。对元件采取检修行为会改善或修复元件的若干功能,从而延长使用寿命。表现在元件故障率曲线上,检修行为会对元件的使用寿命产生回退作用,如图2所示。

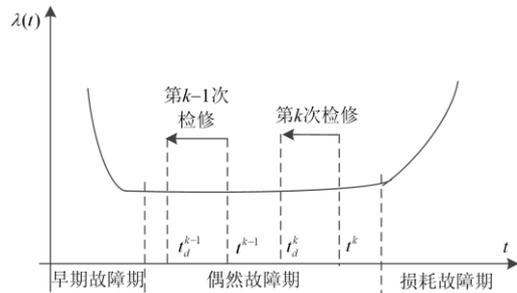


图2 考虑检修行为后的故障率曲线
Fig. 2 Failure rate curve after considering the maintenance behavior

图2中,对元件采取第 k 次和第 $k-1$ 次检修后,会使该元件的等效运行年限由 t^k 、 t^{k-1} 时刻回退到 t_d^k 、 t_d^{k-1} 时刻。考虑到元件在运行过程中,未损坏的部件会逐渐老化,而检修行为只是在上一次检修完成的基础上对元件的损坏部件进行修复,因此检修不能使元件恢复如新,即第 k 次检修后的等效运行时间 t_d^k 应大于第 $k-1$ 次检修时间 t_d^{k-1} 。通过引入检修回退系数,可以得到采取检修后的等效运行时间,如式(3)所示。

$$t_d^k = t_d^{k-1} + (1 - \theta) \cdot (t^k - t^{k-1}) \quad (3)$$

式中, θ 为检修回退系数 ($0 < \theta < 1$), 具体值由运维人员根据现场运行经验制定。

根据式(3), 当元件已采取 k 次检修, 且第 $k+1$ 次检修还没到来时, 其等效运行时间如式(4)所示。

$$t' = (t - t^k) + t_d^k = t - (t^k + t_d^k) = t - \Delta T_1 \quad (4)$$

式中: t 为元件当前的运行时间; t' 为等效运行时间; ΔT_1 为检修行为对运行时间的修正间隔。

1.3 短期影响因素修正

短期影响因素主要是由于元件当前所属运行环境、温度、运行状况等随机性因素突变导致的, 这些因素大都可以通过元件的在线监测获取。国家电网制定的相关导则和规程^[10-11]对这些影响因素给出了相应的打分项, 以此形成了继电保护元件的健康状态评价结果, 包括正常、注意、异常和严重状态。对于健康状态评价结果为注意、异常和严重状态的元件, 导则和规程中为运维人员提供了较为详细的检修建议, 而对于处于正常状态的元件, 给出的“在原来检修周期上延长一定年限”的建议则较为模糊。实际上, 健康状态评价结果为正常状态的元件, 其健康状态评分值为 80~100 分, 对应的实际健康状态也有相应的区别, 因此导则和规程中给出的建议不具备区分性, 不利于状态检修的开展。本章主要针对健康状态评价结果为正常的元件, 对其短期影响因素进行修正。

假设元件在当前时刻 $t^{k,s}$ 正在进行第 s 次健康状态评价, 并且此前共经历了 k 次检修, 则根据式(4), 可以得出此时的等效运行时间 $t^{k,s'}$, 如式(5)所示。

$$t^{k,s'} = (t^{k,s} - t^k) + t_d^k = t^{k,s} - \Delta T_1 \quad (5)$$

如式(5)所示, 该元件第 s 次健康状态评价前, 考虑之前的 k 次检修行为的影响, 此时的等效运行时间为 $t^{k,s'}$ 。评价后, 该元件为正常状态, 其健康状态评分值为 80~100 分, 不同的分值表示近段时间内短期因素对该元件的影响越小。对于两个边界: 当评分值为 100 时, 说明上一次状态评价(即第 $s-1$ 次)到当前这次(即第 s 次)评价期间内, 短期因素对元件的影响较小, 故此时元件在第 s 次评价后的等效运行时间可以认为是第 $s-1$ 次评价之前的时刻, 即 $t^{k,(s-1)'}$; 当评分值为 80 分时, 说明在两次评价期间, 短期因素的影响较大, 第 s 次评价后的等效运行时间为第 s 次评价前的等效运行时间 $t^{k,s'}$, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} t_d^{k,s} = t^{k,(s-1)'} & HI = 100 \\ t_d^{k,s} = t^{k,s'} & HI = 80 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t_d^{k,s}$ 为该元件第 s 次评价后的等效运行时间; HI 表示该元件健康状态评分值。

根据上述边界条件, 正常元件的健康状态评分值越高, 其短期因素的影响越小, 等效运行时间回退得越多; 其评分值越低, 则短期因素作用越明显, 等效运行时间回退得越少。因此, 在考虑短期影响因素修正作用后, 元件的等效运行时间和健康状态评价结果的关系如图 3 所示。

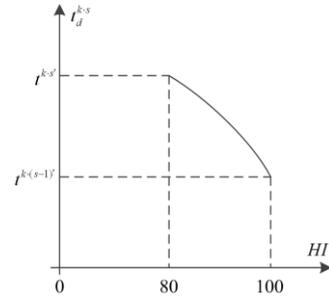


图 3 等效运行时间与健康状态评分值关系图

Fig. 3 Relationship between the equivalent time and its health evaluation point

为便于现场工程应用的开展, 图 3 中的曲线可以采用一次函数来表述, 如式(7)所示。

$$t_d^{k,s} = A \times HI + B \quad (7)$$

结合式(6), 可求得式(7)中的系数 A 和 B :

$$\begin{cases} A = \frac{t^{k,(s-1)'} - t^{k,s'}}{20} \\ B = \frac{100 \times t^{k,s'} - 80 \times t^{k,(s-1)'}}{20} \end{cases} \quad (8)$$

通过式(5)和式(8), 可以求出考虑短期影响因素后的等效运行时间。

1.4 实际故障率模型

元件的实际故障率模型应在基础故障率模型的基础上, 综合考虑长期和短期影响因素的修正作用。对于长期影响因素, 联立式(2)和式(4)可得

$$\lambda_2(t) = \lambda_1(t') = \lambda_1((t - t^k) + t_d^k) = \eta \times \lambda_0(t - \Delta T_1) \quad (9)$$

式中, $\lambda_2(t)$ 为考虑长期影响因素的元件故障率修正模型。

对于短期影响因素, 联立式(5)—式(7)可以计算出第 s 次状态评价后的回退运行时间 ΔT_2 , 如式(10)所示。

$$\Delta T_2 = t^{k,s'} - t_d^{k,s} = t^{k,s'} - (A \times HI + B) = \left[t^{k,s'} - \left(\frac{t^{k,(s-1)'} - t^{k,s'}}{20} \times HI + \frac{100 \times t^{k,s'} - 80 \times t^{k,(s-1)'}}{20} \right) \right] =$$

$$\begin{aligned} & \frac{HI - 80}{100 - 80} \times (t^{k \cdot s'} - t^{k \cdot (s-1)'}) = \\ & \frac{HI - 80}{20} \times ((t^{k \cdot s} - t^k + t_d^k) - (t^{k \cdot (s-1)} - t^k + t_d^k)) = \\ & \frac{HI - 80}{20} \times (t^{k \cdot s} - t^{k \cdot (s-1)}) = \frac{HI - 80}{20} \times \Delta T_3 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ΔT_3 为元件状态评价周期。

联立式(9)和式(10), 可以得到元件的实际故障率模型:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lambda_2(t - \Delta T_2) = \eta \times \lambda_0(t - \Delta T_1 - \Delta T_2) = \\ & \eta \times \lambda_0(t - (t^k - t_d^k) - \frac{HI - 80}{20} \times (t^{k \cdot s} - t^{k \cdot (s-1)})) \end{aligned} \quad (11)$$

2 基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略

元件在长期运行过程中, 其故障率也随之逐渐积累, 当累积故障率达到检修门槛值时, 元件也随之到达运行寿命。本章首先以元件最大运行年限内的累积故障率作为检修门槛值, 然后以元件的累积故障率预测值等于门槛值的约束条件, 实现了对继电保护系统状态检修周期的优化求解。

2.1 累积故障率门槛值计算

状态检修的目的是为了根据元件的实际健康状况, 动态调整检修周期, 以延长检修间隔时期。定期检修的时间间隔是元件不检修保持运行的最大年限, 可视作元件的最大运行年限。对于健康状况评价结果为非正常状态的元件, 相关导则和规程给出了较为明确的检修安排; 而对于处于正常状态的元件, 对应其浴盆曲线, 往往处于偶然故障期, 其劣化过程与定期检修相似。因此, 可以认为在最大运行年限内的累积故障率为检修门槛值, 当元件的累积故障率超过该门槛值时, 元件即需要检修。累积故障率门槛值 P_0 的计算公式如式(12)所示。

$$P_0 = \int_{T_0/2 - T_{max}/2}^{T_0/2 + T_{max}/2} \lambda_0(t) dt \quad (12)$$

式中, T_0 和 T_{max} 分别表示元件的设计寿命和最大运行年限。

2.2 状态检修周期优化求解

元件上一次检修完成后, 其故障率一直在累积, 当设备故障率水平累积到门槛值 P_0 时, 该元件到达检修边界时刻, 该边界时刻求解步骤如下:

1) 根据实际故障率模型, 计算当前时刻的等效运行时间 t' 和上一次检修完成对应的等效运行时间 t_d^k 。

2) 计算元件从上一次检修完成至未来任意时刻的累积故障率 P_1 , 如式(13)所示。

$$P_1 = \int_{t_d^k}^{t'} \lambda(t) dt + \int_{t'}^{t_x} \lambda(t) dt \quad (13)$$

3) 当元件的累积故障率 P_1 等于门槛值 P_0 时, 此时即为下一次检修的边界 t_{best} , 如式(14)所示。

$$P_1 = \int_{t_d^k}^{t'} \lambda(t) dt + \int_{t'}^{t_{best}} \lambda(t) dt = P_0 \quad (14)$$

3 算例分析

为说明所提基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略的有效性, 以某地区 220 kV 线路的保护装置为例进行仿真分析。其中, 表 1 为该装置的历史故障率参数^[24], $\eta = 1.027$, $T_0 = 20$, $t_{max} = 10$, $\theta = 0.2$ 。

表 1 故障率历史数据

Table 1 Historical failure data

运行年限	故障率	运行年限	故障率
0.5	0.001 1	12.5	0.038 4
0.6	0.000 7	13	0.039 5
0.8	0.001 2	13.5	0.020 2
0.9	0.004 1	14	0.003 3
1.2	0.009 4	15	0.021 8
1.6	0.019 3	16	0.015 8
2	0.009 1	16.3	0.031 6
2.5	0.014 3	16.5	0.039 6
3	0.008 7	16.8	0.028 5
3.4	0.018 8	17	0.028
3.9	0.026 1	18	0.046 4
4	0.016	18.5	0.032 31
4.6	0.014 3	18.9	0.023 8
4.6	0.012 6	19	0.033 2
4.6	0.022 6	19.5	0.057 4
5	0.012 3	20	0.043 3
6	0.013 8	20.5	0.055 8
7.2	0.013 3	21	0.068 1
7.4	0.014 3	22	0.044 9
7.5	0.023 2	23	0.060 7
7.9	0.020 6	23.5	0.076 1
8	0.018 6	24	0.088 9
9	0.015 6	24.5	0.099 6
10	0.018 4	24.8	0.096 4
11	0.016 9	25	0.102
11.2	0.016	25.5	0.115 5
11.3	0.015 4	26	0.134
12	0.013 4	26.5	0.114 3
12.5	0.035 7	27	0.150 3

3.1 基础故障率曲线拟合

根据表 1, 拟合得到的基础故障率分布如式(15)所示, 对应的基础故障率拟合曲线如图 4 所示。

$$\lambda_0(t) = \begin{cases} 0.0172 & t \leq 15 \\ \frac{4.369}{28.2346^{4.369}} t^{3.369} & t > 15 \end{cases} \quad (15)$$

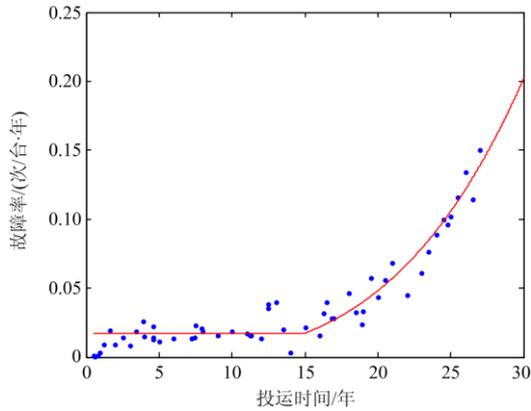


图 4 基础故障率拟合曲线
Fig. 4 Fitted curve of basic failure rate

3.2 基础故障率曲线修正

该元件已投运 8 年, 为说明不同运行情况下的修正作用, 分别假设以下三种不同算例:

算例 1 没有经历过检修。

算例 2 在投运后第 4 年检修过。

算例 3 分别在投运后的第 3 年和第 6 年检修过。

根据式(2)一式(4), 分别计算以上 3 个算例的长期因素回退时间 ΔT_1 , 计算结果如表 2 所示。

表 2 检修行为修正

	第 1 次检修	第 2 次检修	当前等效运行时间	ΔT_1
算例 1	—	—	8	0
算例 2	3.2	—	7.2	0.8
算例 3	2.4	4.8	6.8	1.2

为考虑短期因素的影响, 分别假设以上 3 个算例在当前时刻的健康状态评分值为 80、85、90、95 和 100 这 5 种情况, 设 ΔT_3 为 0.5 年, 由式(10)可以计算出短期因素的回退时间 ΔT_2 , 计算结果如表 3 所示。

表 3 短期影响因素修正

回退时间	设备在当前时刻的健康状态评分值				
	HI=100	HI=95	HI=90	HI=85	HI=80
ΔT_2	0.5	0.375	0.25	0.125	0

根据式(11), 结合表 2 和表 3 的计算结果, 可以求解出不同算例的实际故障率模型, 如表 4 所示。

表 4 实际故障率模型

算例	健康状态评分值	实际故障率模型
算例 1	HI=100	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.5)$
	HI=95	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.375)$
	HI=90	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.25)$
	HI=85	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.125)$
	HI=80	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t)$
算例 2	HI=100	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.3)$
	HI=95	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.175)$
	HI=90	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.05)$
	HI=85	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.925)$
	HI=80	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 0.8)$
算例 3	HI=100	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.7)$
	HI=95	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.575)$
	HI=90	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.45)$
	HI=85	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.325)$
	HI=80	$\lambda(t) = 1.027 \times \lambda_0(t - 1.2)$

3.3 状态检修周期求解

将 t_{max} 和 T_0 代入拟合得到的元件基础故障率模型中, 可求得元件的累积故障率门槛值 $P_0=0.172$ 。根据表 2 中不同算例在不同检修情况下的等效运行时间, 以及表 4 中的实际故障率模型, 结合式(14)的约束方程, 可求解优化检修周期, 如表 5 所示。

表 5 不同健康状态评分值下的检修周期

算例	健康状态评分值	上一次检修的时刻	下一次检修的时刻	检修间隔周期
算例 1	HI=100	—	10.237	10.237
	HI=95	—	10.112	10.112
	HI=90	—	9.987	9.987
	HI=85	—	9.862	9.862
	HI=80	—	9.737	9.737
算例 2	HI=100	4	14.977	10.977
	HI=95	4	14.912	10.912
	HI=90	4	14.787	10.787
	HI=85	4	14.662	10.662
	HI=80	4	14.537	10.537
算例 3	HI=100	6	17.037	11.037
	HI=95	6	16.815	10.815
	HI=90	6	16.587	10.587
	HI=85	6	16.262	10.262
	HI=80	6	16.004	10.004

由表 5 的计算结果可知,元件的健康状态越好,下一次的检修时刻最晚,即检修间隔越长。对于算例中这些健康状态均为正常的元件,其检修间隔均在最长检修年限的基础上作了延长,这与状态检修导则中对正常元件的检修指导相吻合。此外,相比于导则,本文所提出的检修策略可以更为明确地给出这些正常状态的元件下一次的检修周期,为运维人员安排检修计划提供了更具体和更科学的建议,也便于状态检修模式在工程应用中的推广。

4 结论

由于目前的状态检修导则和规程给出的检修建议较为粗糙,不利于状态检修模式在现场的有效推广,本文提出了一种基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略。该策略首先通过拟合同类元件历史数据,得到基础故障率模型;然后综合考虑长期和短期影响因素的修正作用,建立了符合元件个体实际情况的实际故障率模型;基于基础故障率模型和实际故障率模型,结合现场经验,以累积故障率达到检修阈值为约束条件,求取了元件的优化检修周期;最后通过仿真算例验证了所提出的状态检修策略的合理性,能较好地补充现有状态检修导则的不足,为运维人员合理制定检修计划提供了理论依据。

参考文献

- [1] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [2] 杨航. 城市电网输变电设备状态检修在线决策系统研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
YANG Hang. Studies and applications on the on-line decision-making system of condition-based maintenance for power transmission and transformation equipment in urban power grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [3] 曹力行. 智能变电站继电保护系统状态检修策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
CAO Lixing. Research on condition-based maintenance strategy of intelligent substation relay protection system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [4] 杨博, 陈庆新, 张爱军, 等. 发电厂继电保护装置故障案例的特点分析及建议[J]. 热力发电, 2019, 39(3): 106-108.
- YANG Bo, CHEN Qingxin, ZHANG Aijun, et al. Analysis of features in relay protection failure cases and recommendations thereof[J]. Thermal Power Generation, 2019, 39(3): 106-108.
- [5] 曹海鸥, 张沛超, 高翔. 基于模糊支持向量机的继电保护状态在线评价[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 70-74.
CAO Haiou, ZHANG Peichao, GAO Xiang. Online condition evaluation of relay protection based on fuzzy support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 70-74.
- [6] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 继电保护在线状态检修的应用和探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 132-138.
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Application and discussion on online condition-based maintenance of relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 132-138.
- [7] 李明, 韩学山, 杨明, 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52.
LI Ming, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 43-52.
- [8] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 196-202.
LI Ming, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Decision-making model and solution of condition-based maintenance for substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 196-202.
- [9] MARSEGUENA M, ZIO E, PODOFILLINI L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithm and Monte Carlo simulation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 77(2): 151-166.
- [10] 国家电网公司. 继电保护状态检修导则: QGDW1806—2013[S].
State Grid Corporation of China. Guide for condition based maintenance strategy of protective relay: QGDW1806—2013[S].
- [11] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范: Q/GDW_441—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
State Grid Corporation of China. Technical specifications of protection for smart substation: Q/GDW_441—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [12] LIANG Zhenglin, PARLIKAD A K. A condition-based

- maintenance model for assets with accelerated deterioration due to fault propagation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(3): 972-982.
- [13] 赵建利, 孙祎, 柴林杰, 等. 基于威布尔分布的电气设备缺陷率模型参数分析[J]. 河北电力技术, 2015, 34(1): 5-8.
ZHAO Jianli, SUN Yi, CHAI Linjie, et al. Parameter analysis of defect rate of electrical equipment based on Weibull distribution[J]. Hebei Electric Power, 2015, 34(1): 5-8.
- [14] 任震, 张静伟, 张晋昕. 基于偏最小二乘法的设备故障率计算[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 12-16.
REN Zhen, ZHANG Jingwei, ZHANG Jinxin. Calculation of failure rate of power equipments based on partial least square method[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 12-16.
- [15] 潘乐真, 张焰, 俞国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [16] 杨博, 陈庆新. 断路器脱杆与其失灵保护配置探讨[J]. 热力发电, 2019, 39(1): 109-112.
YANG Bo, CHEN Qingxin. An approach to tripping bar of circuit breaker and its malfunction protecting configuration[J]. Thermal Power Generation, 2019, 39(1): 109-112.
- [17] 黄炳翔, 梁欣瑜, 李伟, 等. 基于全程状态监测的继电保护故障率模型[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 148-157.
HUANG Bingxiang, LIANG Xinyu, LI Wei, et al. Research on fault rate model of relay protection based on the whole process condition monitoring[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 148-157.
- [18] 黄景光, 于楠, 林湘宁, 等. 远程备用智能保护一体化中心架构可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 73-80.
HUANG Jingguang, YU Nan, LIN Xiangning, et al. Research on the reliability of remote backup intelligent protection integrated center architecture[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 73-80.
- [19] 毛颖科, 关志成, 王黎明, 等. 基于 BP 人工神经网络的绝缘子泄漏电流[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 7-12.
MAO Yingke, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Prediction of leakage current of outdoor insulators based on BP artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(27): 7-12.
- [20] SHAWASH J, SELVIAH D R. Real-time nonlinear parameter estimation using the Levenberg-Marquardt algorithm on field programmable gate arrays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 170-176.
- [21] POURBAGHER R, DERAKHSHANDEH S Y. Application of high-order Levenberg-Marquardt method for solving the power flow problem in the ill-conditioned systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 3017-3022.
- [22] 叶远波, 谢民, 黄太贵, 等. 基于灰色理论和云模型的智能变电站二次设备状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 105-111.
YE Yuanbo, XIE Min, HUANG Taigui, et al. A state assessment method for intelligent substation secondary equipment based on grey theory and cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 105-111.
- [23] 康家乐. 在线监测技术在智能变电站中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
KANG Jiale. Application of on-line monitoring technology in intelligent submission[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [24] 董张卓, 刘魁, 张倍倍. 含分布式电源配电网通用故障电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 161-168.
DONG Zhangzhuo, LIU Kui, ZHANG Beibei. Calculation method of common fault current in distribution network with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 161-168.

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-29

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

谢民(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xiemin@ah.sgcc.com.cn

陈晓东(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: chenxd@ah.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)