

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181063

基于云模型与马尔科夫链的继电保护装置寿命预测方法

陈海涛¹, 杨军¹, 施迎春², 岳斌², 李瑞津²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653199)

摘要: 准确预测智能变电站继电保护装置的有效寿命, 是保障智能变电站安全稳定运行的关键。提出了一种基于云模型与马尔科夫链的继电保护装置寿命预测方法。利用继电保护装置的运行状态数据并结合云模型的隶属度函数来构建初始状态概率分布向量, 然后依据马尔科夫链原理获得状态转移概率矩阵, 最后通过分析信度准则预测保护装置有效寿命。算例分析结果表明该方法能科学预测保护装置有效寿命, 可为智能变电站继电保护装置的状态检修工作提供指导依据。

关键词: 寿命预测; 云模型; 马尔科夫链; 信度准则; 继电保护装置

Life prediction method of relay protection device based on cloud model and Markov Chain

CHEN Haitao¹, YANG Jun¹, SHI Yingchun², YUE Bin², LI Ruijin²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yuxi Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Limited Liability Company, Yuxi 653199, China)

Abstract: Predicting the effective life of relay protection devices accurately is the essential to ensure the safe and stable operation of smart substations. This paper proposes a life prediction method based on cloud model and Markov chain. This method utilizes the operating status data of the relay protection device and combines with the membership function of the cloud model to construct the initial state probability distribution vector. Then the state transition probability matrix is obtained according to the Markov chain principle. Finally, the effective life of the protection device is predicted according to the reliability criterion. The example analysis results show that this method can effectively predict the effective life of the protection device and can also provide guidance for the state maintenance work of the relay protection device in the smart substation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277135).

Key words: life prediction; cloud model; Markov chain; reliability criteria; relay protection device

0 引言

目前, 我国电力系统朝着特高压、大容量方向发展, 加上社会对供电质量以及可靠性提出了更高的要求, 保证智能变电站的继电保护装置安全、稳定运行至关重要^[1-2]。为及时准确了解继电保护装置的运行状态, 不仅需要对其运行状态进行评估, 还需要对其进行寿命预测, 以保证智能变电站稳定运行。寿命预测^[3-5]可以准确地知道设备的剩余寿命, 并且在此基础上可以及时有效地开展检修工作^[6-9], 防患于未然, 为运维检修工作人员提供参考, 实现智能变电站安全、可靠运行。

继电保护装置含有大量的电子元器件, 电磁干扰、温湿度、灰尘、振动等都会对电子元器件运行状况产生影响, 随着元器件的老化, 硬件故障率也会随之增高, 影响继电保护装置寿命。文献[10]从失效机理方面剖析了无故障时间、失效率与寿命之间的关系, 并利用 Marquardt 法对继电保护装置寿命的 Weibull 分布函数的参数进行估计, 得出故障率分界点和故障率的分布曲线函数, 提高了估计精度, 但此方法具有局限性, 仅适用于已知样本数量和每个样本的失效率的情况。文献[11]提出了一种基于支持向量机的小样本条件下继电保护可靠性参数估计方法, 利用训练的模型对小样本数据进行扩充, 该方法极度依赖历史数据库, 样本容量较小, 可信度不高。文献[12]提出基于继电保护装置退出运行时的时间作为装置寿命的统计法, 但忽略了由

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277135)

于现阶段管理制度上的年限规定而提前结束装置寿命的因素,也未考虑装置不同硬件模块寿命匹配机制,该方法得出的结论偏于保守。

本文针对已有研究的不足之处,提出了一种基于云模型和马尔科夫链的继电保护装置寿命预测方法,建立了云模型的隶属度函数,一来同时考虑保护装置状态的模糊性和随机性,利用收集到的保护装置的核心运行数据,通过定义相对劣化度来获取保护装置的初始状态概率分布向量,以状态概率分布向量作为保护装置处于各状态等级的概率依据;然后基于马尔科夫链的无后效性,获得状态转移概率矩阵,最后利用信度准则来进行寿命预测。

1 继电保护装置运行状态分析

继电保护装置作为智能变电站安全稳定运行的第一道防线^[13-15],合理准确地评估保护装置的运行状态至关重要。

保护装置的评价指标可以分为检修指标和运行指标。运行指标主要是在线监测信息,检修指标主要是历史运行数据和检修记录。如图1所示,依据重要性、可监测、可测量、有效性的原则,同时能够体现继电保护装置电子元器件的失效效率,本文建立了继电保护装置状态评估指标评价体系。

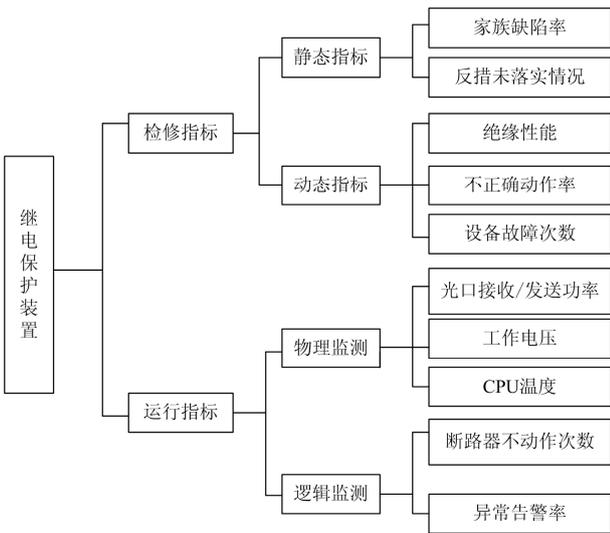


图1 继电保护装置状态评估指标体系

Fig. 1 State assessment indicators system of relay protection device

对保护装置运行状态数据指标进行收集,CPU温度、故障次数、工作电压、不正确动作次数等。定义运行状态指标相对劣化度 x_i , x_i 用来表示数据指标偏离正常标准值的程度大小。它是一个介于0-1的数据。根据不同性能的数据指标特点,分为越小越优型和越大越优型。

越小越优型数据指标如CPU温度,计算如式(1)所示。越大越优型数据指标如绝缘性能,计算如式(2)所示。

$$x_i = \left(\frac{V_i - V_{i0}}{V_{i\max} - V_{i0}} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$x_i = \left(\frac{V_{i0} - V_i}{V_{i0} - V_{i\min}} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: $V_{i\max}$ 和 $V_{i\min}$ 表示该运行状态数据的极限值; V_{i0} 为运行允许值,即状态良好值; V_i 为实际运行数据。本文中 α 取为1,反映参数变化对保护装置状态的影响程度。根据权威专家意见以及保护装置运行经验,将继电保护装置的状态等级分为“良好”、“注意”、“异常”、“失效”4个等级,分类标准如表1所示。

表1 状态等级评估标准

Table 1 Status rating criteria

状态等级	良好	注意	异常	失效
相对劣化度	(0,0.2)	(0.2,0.5)	(0.5,0.8)	(0.8,1)

根据评估指标体系,基于层次分析法和变权理论对继电保护装置的运行状态进行准确评估。得到保护装置的运行状态后,可以直观了解到装置处于各状态等级的概率大小。评估状态结果 $W=(0.6,0.2,0.15,0.05)$ 则表示处于“良好”状态的概率为0.6,处于“注意”状态的概率为0.2,当“良好”概率下降,“注意”、“异常”概率增加时,要提前对继电保护装置进行检修。当保护装置运行状态欠佳、服役时间较长的情况下,可以提前检修或者更换设备。为进一步保障继电保护装置的安全稳定运行,对继电保护装置的有效寿命进行预测。

2 基于云模型的初始状态概率分布向量计算方法

云模型能实现定性概念向定量^[16]概念的转换,可将一些模糊的概念用确定的数值来表示,构成定性与定量之间的一一映射。目前,云模型在状态评估中得到广泛应用,能够解决模糊性和随机性的不确定性问题^[17-18]。

2.1 云模型的建立

假设 U 是一个精确的定量数值集合, Q 是与 U 相关的定性概念。集合 U 中的任一元素 x ,若 x 对 Q 的隶属度 $U(x)$ 是一个具有稳定倾向的随机数且 $U(x) \in (0,1)$,那么 x 在集合 U 上的分布称为云。每个 $(x,U(x))$ 称为一个云滴,多个云滴聚集在一起便构成了云,云可以是一维或多维的。

云模型概念^[19-20]的整体特性可用 3 个数字特征来表示, 即期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e , 其中期望 E_x 表示云模型的重心位置, 反映了定性概念 Q 的中心值, 熵 E_n 表示模糊性与随机性相关联程度的大小, 超熵 H_e 为熵的熵, 间接反映了云模型的离散程度。

云模型的生成算法如下所述:

(1) 首先生成以 E_n 为期望、 H_e^2 为标准方差的正态随机数 E'_y , $E'_y = \text{NORMRND}(E_n, H_e^2)$ 。

(2) 生成以 E_x 为期望、 E'_y^2 为标准方差的正态随机数 x_i , $x_i = \text{NORMRND}(E_x, E'_y^2)$ 。

(3) 计算 $U(x) = \exp[-(x_i - E_x)^2 / 2E'_y^2]$, 得到 $(x, U(x))$ 的云滴。

(4) 重复步骤(1)–(3), 生成多个云滴, 直到生成云模型。

根据相对劣化度和运行状态的关系, 将保护装置状态等级区间分为: $C_1[0, a)$, $C_2[a, b)$, $C_3[b, c)$, $C_4[c, d) \cup [d, \infty)$ 。本文按照表 1 的评估标准来进行状态等级区间的划分, 按照表 2 中的公式计算云模型的数字特征, q 取 0.1, 根据云模型的生成算法, 由此可得到各指标数据对应的状态等级及隶属度大小。

表 2 云模型特征值确定方法

Table 2 Feature value of cloud model

	C_1	C_2	C_3	C_4
E_x	0	$(a+b)/2$	$(b+c)/2$	d
E_n	$\frac{Ex_2 - Ex_1}{3}$	$\frac{Ex_2 - Ex_1}{3}$	$\frac{Ex_3 - Ex_2}{3}$	$\frac{Ex_4 - Ex_3}{3}$
H_e	q	q	q	q

生成云模型的隶属度函数如图 2 所示。当得到继电保护装置的运行数据时, 求得相对应的劣化度, 可以直观地观察出此时保护装置隶属于某一状态等级的概率大小。用确定的数据来表示保护装置处于每个运行状态等级的概率大小, 可为检修工作人员提供参考依据, 防止安全事故的发生, 保障安全稳定可靠的供电。

2.2 初始状态概率分布向量

不正确动作次数、故障次数、CPU 温度、工作电压指标数据可以由保护装置直接获得量化数据且这几个指标能够直接体现继电保护装置中电子元器件的老化情况, 从而在一定程度上能直观反映继电保护装置的寿命情况, 兼具重要性、可得到的准则, 因此将其作为目前现场评价继电保护装置健康状态

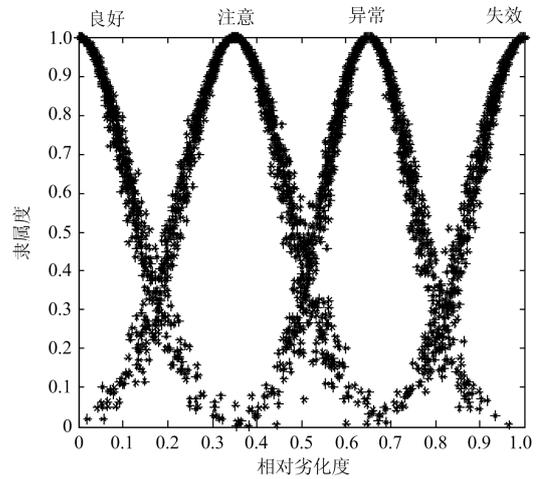


图 2 云模型的隶属度函数

Fig. 2 Membership function of cloud model

的核心指标。在继电保护装置运行的 T_1 、 T_2 时刻之间分别取 N 个测量点, 根据收集到的历史运行核心数据得测量点的运行状态。收集到的第 i 个测量点的指标值 V_i^1 、 V_i^2 、 V_i^3 、 V_i^4 , 由相对劣化度公式计算出对应的相对劣化度 x_i , 假设 x_i 在一定的误差允许范围内与云模型有 M 个相交云滴, 每个云滴都有一个相对应的隶属度, 不相交的状态等级概率取 0, 则取相交云滴的隶属度概率平均值作为该测量点 i 处于第 j 个状态等级的概率值, 记作向量 r_{ij} 。记 CPU 温度的向量为 r_{ij}^1 , 工作电压的向量为 r_{ij}^2 , 不正确动作次数的向量为 r_{ij}^3 、故障次数的向量为 r_{ij}^4 。根据加权向量公式:

$$R_i = \alpha r_{ij}^1 + \beta r_{ij}^2 + \gamma r_{ij}^3 + \delta r_{ij}^4 \quad (3)$$

得到测量点 i 的隶属度向量。式 (3) 中 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$, 本文取 $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1/4$ 。

依次计算出 T_1 、 T_2 时刻之间的 N 个测量点的隶属度向量, 根据向量平均值式(4)求取平均值, 然后对隶属度向量 λ 做归一化处理, 具体归一化计算过程见文献[21], 归一化后的隶属度向量作为 T_1 时刻的初始状态概率分布向量 $\lambda_1 = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ 。

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_i^N R_i \quad (4)$$

3 基于马尔科夫链的寿命预测模型

一个系统在时刻 t_0 所处的状态为已知的条件下, 过程在 $t > t_0$ 所处状态的条件分布与过程在时刻 t_0 之前所处的状态无关, 也就是说, 在已经知道过

程“现在”的条件下, 其“将来”将不依赖于“过去”, 即马尔科夫链的“无后效性”^[22]。马尔科夫过程向量图如图3所示。

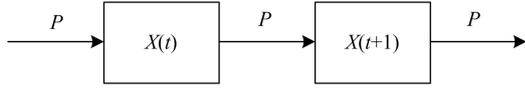


图3 马尔科夫过程

Fig. 3 Markov process

表达式为

$$X(t+1) = X(t) \times P \quad (5)$$

式中: $X(t)$ 代表系统在时刻 t 的状态概率分布; $X(t+1)$ 代表系统在 $t+1$ 时刻的状态概率分布; P 代表一步状态转移概率矩阵。

3.1 继电保护装置状态转移概率矩阵

由上述方法, 根据历史运行数据并结合云模型的隶属度函数依次求得第2年的概率分布向量 $\lambda_2 = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ 、第3年概率分布向量 $\lambda_3 = (c_1, c_2, c_3, c_4)$, 第4年概率分布向量 $\lambda_4 = (d_1, d_2, d_3, d_4)$, 第5年概率分布向量 $\lambda_5 = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ 。由此可得相邻4年的初始状态概率分布矩阵分别为 A 和 B 。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \end{bmatrix}$$

根据马尔科夫链原理可求得状态转移概率矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} = A^{-1}B \quad (6)$$

式中: p_{nm} 代表一个时段内继电保护装置由状态 n 转移到状态 m 的概率。本文仅考虑一步状态转移概率。

3.2 继电保护装置寿命预测

以当前时刻 T_0 开始预测保护装置寿命, 根据马尔科夫链原理

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \times P^{T-T_0} \quad T > T_0 \quad (7)$$

式中: $\lambda(T_0)$ 表示时刻 T_0 的状态概率分布向量; $\lambda(T)$ 表示时刻 T 的状态概率分布向量。

由当前时刻 T_0 的状态概率分布向量和状态转移概率矩阵 P 可求得之后任意时刻 T 的状态概率分布向量。在求得时刻 T 的状态概率分布向量后, 根据信度准则判断保护装置的运行状态, 进而预测其寿命。求得的 $\lambda(T) = (k_1, k_2, k_3, k_4)$ 表示继电保护装置在时刻 T 隶属于不同状态等级的概率大小, k_m 为隶属于状态等级 m 的隶属度。 β 为置信度水平, 依据常用的置信度水平范围 $[0.6, 0.8]$, 本文取置信度水平 $\beta = 0.75$ 。如果有

$$\{k_1 \leq \beta, \lambda(T) = (k_1, k_2, k_3, k_4)\} \quad (8)$$

即保护装置处于良好状态等级的概率小于 β 时, 认为装置处于失效状态。此时的时刻 T 即为装置的最终寿命时间。

4 算例分析

下面将以某供电局已经投入运行的继电保护装置为例, 利用收集到的历史运行核心数据不正确动作次数、故障次数, 运行指标 CPU 温度、工作电压来对设备进行寿命预测。

以每一年为一个时间段, 在每个时间段内选取 1000 个时间点, 根据历史运行数据, 假设在 $\pm 2\%$ 误差允许范围内对保护装置进行寿命预测, 依此可求得第1年的状态概率分布向量 $\lambda_1 = [0.960 \ 0.020 \ 0.009 \ 0.011]$, 第2年状态概率分布向量 $\lambda_2 = [0.956 \ 0.015 \ 0.017 \ 0.012]$, 第3年状态概率分布向量 $\lambda_3 = [0.945 \ 0.024 \ 0.015 \ 0.016]$, 第4年状态概率分布向量 $\lambda_4 = [0.935 \ 0.033 \ 0.02 \ 0.012]$, 第5年状态概率分布向量 $\lambda_5 = [0.923 \ 0.05 \ 0.015 \ 0.012]$ 。

对保护装置的第1年到第4年, 第2年到第5年状态概率分布向量分别建立 4×4 初始状态概率分布矩阵得到:

$$A = \begin{bmatrix} 0.960 & 0.02 & 0.009 & 0.011 \\ 0.956 & 0.015 & 0.017 & 0.012 \\ 0.945 & 0.024 & 0.015 & 0.016 \\ 0.935 & 0.033 & 0.02 & 0.012 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.956 & 0.015 & 0.017 & 0.012 \\ 0.945 & 0.024 & 0.015 & 0.016 \\ 0.935 & 0.033 & 0.02 & 0.012 \\ 0.925 & 0.035 & 0.022 & 0.018 \end{bmatrix}$$

一般而言, 继电保护装置在出厂或现场运行前, 已历经投运前的测试和老化, 所以本文认为继电保护装置在现场运行时已越过早期失效期。装置

的性能下降是日积月累造成的, 随着时间的增加装置的损耗在累积, 运行状态劣化程度也在增加, 所以本文认为随着装置的运行装置的状态肯定会逐渐劣化。反映在 A 和 B 矩阵上即处于良好的概率在减小, 处于注意、异常状态的概率在增加, 根据求得的数据, 符合状态运行趋势。

根据马尔科夫链的状态转移式(6)可得状态转移概率矩阵 $P = A^{-1}B$ 。

$$P = \begin{bmatrix} 1.0043 & -0.0245 & 0.0058 & 0.0144 \\ 0.1774 & 0.3947 & 0.4021 & 0.0258 \\ -0.7010 & 1.1272 & -0.0386 & 0.6124 \\ -0.4878 & 1.8582 & 0.3420 & -0.7124 \end{bmatrix}$$

由矩阵中的数据可知矩阵中的元素并不都是在 0-1, 不符合严格意义上的概率意义, 随着装置的运行, 装置的运行状态会逐渐劣化, 因此状态转移矩阵并非完全规律变化, 但是此数据符合继电保护装置逐渐老化的实际意义, 对寿命预测具有实际意义。

取第 5 年的状态概率分布为初始状态, 根据式(7)可得未来几年装置的运行状态概率分布, 可以很直观地观测到处于各个状态等级的概率大小, 结果如表 3 所示。

表 3 未来几年保护装置概率分布状态

Table 3 Protection device probability distribution status in the next few years

年份	良好	注意	异常	失效
第 6 年	91.1%	4.94%	2.47%	1.49%
第 7 年	89.91%	5.27%	2.93%	1.89%
第 8 年	88.26%	6.70%	3.17%	1.87%
第 9 年	86.69%	7.54%	3.72%	2.05%
第 10 年	84.79%	8.86%	4.09%	2.26%
第 11 年	82.75%	10.23%	4.67%	2.34%
第 12 年	80.51%	11.63%	5.21%	2.64%
第 13 年	77.98%	13.41%	5.84%	2.77%
第 14 年	75.24%	15.12%	6.56%	3.07%
第 15 年	72.15%	17.24%	7.31%	3.30%

根据表 3 中数据可知, 当装置运行到第 15 年时良好的概率为 72.15%, 低于 $\beta = 0.75$, 不能满足稳定运行的要求; 第 14 年时良好的概率为 75.24%, 高于 $\beta = 0.75$, 故认为此装置的有效寿命为 14 年。

利用 Marquardt 法对继电保护装置寿命的 Weibull 分布函数的参数进行估计作对比分析^[10]。Weibull 分布的失效分布函数为

$$F(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

故障密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (10)$$

可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (11)$$

故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} \quad (12)$$

式中: t 为时间; α 为形状参数; β 为尺度参数。

选择参数初始迭代值, 利用 Marquardt 法参数估计, 得出不同类型的故障率参数及故障率大小, 结果见表 4。

表 4 确定威布尔分布的参数及分界点

Table 4 Determining the parameters and the cut-off point of Weibull distribution

	13.5 年	14 年(最优分界点)	14.5 年
形状参数	9.556 5	9.608 6	9.660 1
尺度参数	19.736 8	19.745 6	19.754 3
分界点故障率	0.018 8	0.025 2	0.033 6
残差和 S	0.387 8	0.345 8	0.511 2

从表 4 中可以看出保护装置的最优分界点为 14 年, 14 年之前故障率较低, 之后故障率较高, 可以认为继电保护装置运行状态良好的最优寿命为 14 年。

由此可知: 1) 基于云模型和马尔科夫链的寿命预测方法可以比较合理地预测出继电保护装置有效寿命; 2) 本文提出的方法还可以得到保护装置处于各个运行状态的概率大小, 当“注意”、“异常”指标值较高时, 应对设备及时进行处理, 预测结果可为运维检修人员提供参考。

5 结论

本文从继电保护装置寿命机理方面出发, 建立了体现电子元器件失效率的指标体系。并利用历史状态核心数据定义了相对劣化度, 进而依据云模型的隶属度函数确定初始状态概率分布向量的方法, 通过建立云模型减少了人为因素的主观性和随机性, 然后依据马尔科夫链原理获得状态转移概率矩阵, 最后引入信度准则确定装置的有效寿命。

某供电局实际保护装置的算例分析结果表明, 本文提出的方法能科学预测保护装置有效寿

命。同时, 检修人员通过状态概率分布向量可以直观地了解装置设备的运行状态, 一旦发现安全事故隐患, 可提前检修, 防止设备出现安全事故, 保证供电的安全可靠。

参考文献

- [1] ZHAN H, WANG C, WANG Y, et al. Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks[C]// Power & Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, MA, USA.
- [2] SONG Q, SHENG W, KOU L, et al. Smart substation integration technology and its application in distribution power grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 31-36.
- [3] 王慧芳, 赵婉芳, 杜振东, 等. 基于寿命数据的电力变压器经济寿命预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 810-816. WANG Huifang, ZHAO Wanfang, DU Zhendong, et al. Economic life prediction of power transformers based on the lifetime data[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 810-816.
- [4] 凌丹, 何俐萍, 许焕卫, 等. 基于威布尔分布的疲劳剩余寿命可靠性预测方法[J]. 机械设计, 2011, 28(7): 50-54. LING Dan, HE Liping, XU Huanwei, et al. Predicting method of fatigue residual life reliability based on Weibull distribution[J]. Mechanical Design, 2011, 28(7): 50-54.
- [5] 周福娜, 高育林, 王佳瑜, 等. 基于深度学习的缓变故障早期诊断及寿命预测[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(5): 30-37. ZHOU Funa, GAO Yulin, WANG Jiayu, et al. Early diagnosis and life prognosis for slow varying fault based on deep learning[J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2017, 47(5): 30-37.
- [6] 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.
- [7] 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[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [8] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20. ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [9] 李如琦, 唐林权, 凌武能, 等. 基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 104-108. LI Ruqi, TANG Linquan, LING Wuneng, et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 104-108.
- [10] 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 on relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [11] 何旭. 智能变电站继电保护可靠性的评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. HE Xu. Research on reliability evaluation method for relay protections in smart substation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [12] 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. WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Estimation of loss efficiency of relay protection device and analysis of its regional difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15.
- [13] 戴志辉, 王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 科学大众(科学教育), 2015, 38(8): 161-167. DAI Zhihui, WANG Zengping. Research on reliability of relay protection[J]. Science Popular (Science Education), 2015, 38(8): 161-167.
- [14] 景琦. 智能变电站继电保护可靠性评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2015. JING Qi. Reliability assessment of relay protection in intelligent substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

- [15] 贺家李. 电力系统继电保护技术的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 29(10): 38-40.
HE Jiali. Current status and development of power system relay protection Electric[J]. China Power, 1999, 29(10): 38-40.
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. China Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [17] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [18] 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [19] 宋人杰, 丁江林, 白丽, 等. 基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 1-8.
SONG Renjie, DING Jianglin, BAI Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 1-8.
- [20] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [21] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 2版. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000.
- [22] FELDMAN O, KOROTKOV V N, LOGOFET D O. The monoculture vs. rotation strategies in forestry: formalization and prediction by means of Markov-chain modelling[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 77(2): 111-21.
-
- 收稿日期: 2018-08-18; 修回日期: 2018-10-31
- 作者简介:
陈海涛(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能变电站及电力系统继电保护; E-mail: chenhaitao1993@126.com
杨军(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、继电保护。E-mail: JYang@whu.edu.cn
- (编辑 姜新丽)