

# 基于退化量分布的剩余电流动作 断路器可靠性评估

刘帼巾, 赵兴洲, 缪建华, 王 泽, 刘达明

(河北工业大学电气工程学院, 天津 300130)

**摘 要:** 剩余电流动作断路器直接影响低压配电系统的安全性和可靠性。为了研究剩余电流动作断路器的可靠性, 使用基于退化量分布的建模方法对其性能退化过程进行研究, 并预测出其使用寿命。首先, 对剩余电流动作断路器的失效机理进行分析, 然后设计实施剩余电流动作断路器的加速退化试验, 建立了退化量服从正态分布的可靠度分析模型, 采用最小二乘法对模型中的参数进行估计, 从而对剩余电流动作断路器的可靠性进行评估并绘制可靠度曲线。

**关 键 词:** 剩余电流动作断路器; 退化量分布; 拟合优度检验; 可靠性评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.023 中图分类号: TM506 文章编号: 1673-9140(2023)02-0205-09

## Reliability evaluation of residual current operated circuit breaker based on degradation distribution

LIU Guojin, ZHAO Xingzhou, MIAO Jianhua, WANG Ze, LIU Daming

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Residual current operated circuit breaker directly affects the safety and reliability of low-voltage distribution system. In order to study the reliability of residual current operated circuit breaker, the performance degradation process is studied by using the modeling method based on degradation distribution, and its service life is predicted. Firstly, the failure mechanism of residual current operated circuit breaker is analyzed, and then the accelerated degradation test of residual current operated circuit breaker is designed and implemented. The reliability analysis model that the degradation quantity obeys the normal distribution is established, and the parameters in the model are estimated by the least square method, so as to evaluate the reliability of residual current operated circuit breaker and draw the reliability curve.

**Key words:** residual current operated circuit breaker; degradation distribution; goodness-of-fit test; reliability evaluation

剩余电流动作断路器是一类很常见的低压防  
护电器, 在保障使用人员生命安全和预防漏电问题

等方面都有着重要意义<sup>[1-2]</sup>。随着剩余电流动作断  
路器使用时间的增加, 剩余电流保护性能会逐渐退

收稿日期: 2020-11-07; 修回日期: 2021-05-11

基金项目: 河北省自然科学基金(E2020202221); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019041)

通信作者: 赵兴洲(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备可靠性研究; E-mail: 379956414@qq.com

化,很容易产生巨大的安全隐患。因此,为了提高低压配电系统的可靠性,有必要对使用过程中的剩余电流动作断路器进行可靠性评估。

基于失效寿命数据建模是产品可靠性分析中常用的建模分析方法<sup>[3-5]</sup>。然而,作为高可靠性、长寿命产品,电子式剩余电流动作断路器进行失效寿命试验所需试验周期过长,因此,本文设计加速退化试验来获得退化数据对产品的退化过程进行研究。目前,退化数据建模分析主要可以分为基于伪失效寿命分布建模、基于随机过程建模和基于退化量分布建模3种<sup>[6-9]</sup>。前两种所采用的可靠性建模方法通常是假设性能退化量服从某种分布,这种大多根据经验对模型参数与时间的变化规律进行假设的方式,容易因假设不合理导致最后结果误差较大。文献[10]对电连接器进行退化量分布建模,检验性能退化数据服从正态分布,认为均值和方差都与时间有关。文献[11]在性能退化数据服从对数正态分布的基础上,对电主轴采用退化量分布的可靠性建模方法预测其使用寿命。文献[12]以刀具为研究对象,结合贝叶斯理论,建立了退化量服从正态分布的可靠性模型,对刀具的可靠性问题进行了深入的研究。

针对低压电器的可靠性预测研究大多集中于神经网络<sup>[13]</sup>、Wiener过程<sup>[14]</sup>、支持向量机<sup>[15]</sup>等方法的评估预测。通过随机过程建模进行预测的缺点在于无法对退化量的分布类型进行合理假设。神经网络的方法不适合小样本数据分析,且易陷入局部极值问题。支持向量机预测的准确性受参数影响较大,优化的过程较为繁琐。综上所述,本文采用退化量分布的方法对剩余电流动作断路器进行可靠性评估,根据剩余电流动作断路器的失效分析,设计实施加速退化试验。考虑到每个断路器的性能退化轨迹不同,难以利用剩余动作电流值确定性能退化模型,因此引入退化量来描述断路器在退化过程中各个测量时刻的分布规律,进而估计出退化量模型参数与时间的关系,再根据 Arrhenius 模型推导出模型参数与加速应力的关系,使得能够更加精确地对剩余电流动作断路器的可靠性进行评估。

## 1 剩余电流动作断路器失效分析及性能退化特征的选取

剩余电流动作断路器主要由检测单元、中间环节及运行部分构成。DZ47sle型断路器在中国应用较广,其内部组成结构如图1所示。表1列出了DZ47sle型剩余电流动作断路器的主要技术参数。

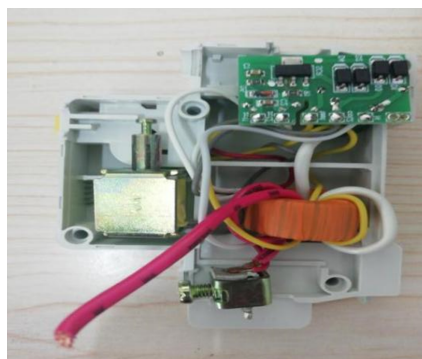


图1 剩余电流动作断路器结构

Figure 1 Structural picture of residual current operated circuit breaker

表1 DZ47sle 剩余电流动作断路器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of DZ47sle residual current operated circuit breaker

序号	名称	单位	规格
1	动作类型	—	RCBO
2	额定电压	V	230
3	额定剩余动作电流	mA	30
4	额定频率	Hz	50
5	额定剩余不动作电流	mA	15

检测单元:主要指零序电流互感器。根据电磁感应现象,当零序电流互感器线圈原边侧检测到电流存在时,副边侧将感应出对应的零序电压,进而判断电路中是否存在漏电电流,并发出信号。

中间环节:包括 PCB 板、电阻、电容等电子元件。将漏电电流进行放大,并传递到执行部分。

运行部分:当电路中的漏电电流超过额定标准值时,脱扣器跳闸,从而切断电源,实现漏电保护功能。

### 1.1 失效分析

剩余电流动作断路器的失效类型分为拒动和

误动。拒动是电路中剩余电流大于剩余动作电流断路器的额定动作电流,断路器没能及时分断电路。误动是电路中的剩余电流小于剩余动作电流断路器的额定不动作电流,断路器错误地分断了电路。造成拒动和误动的原因都与中间环节电子元件的性能有关。中间环节如图 2 所示,包括电路板、电阻、晶闸管等电子元件。剩余电流动作断路器中间环节的任务是对漏电信号进行整流,放大和传递,中间环节中电子元件性能的好坏直接影响剩余电流动作断路器的剩余电流保护特性。对剩余电流动作断路器进行失效分析可知,环境因素中的温度能影响电容容量和晶闸管中的 PN 结导通电压等。同时,温度的升高能够使电路板的绝缘材料分解出有机气体,对邻近元件造成腐蚀。剩余电流动作断路器电子元件上产生的热应力和热疲劳效应相互累积叠加,会导致其性能不断退化,当其性能退化量降到失效阈值时,就判断剩余电流动作断路器发生失效。



图 2 剩余电流动作断路器的中间环节

Figure 2 Intermediate link of residual current operated circuit breaker

### 1.2 性能退化特征量的选取

性能退化特征量能够反映出产品在使用过程中退化趋势的变化情况。为了研究剩余电流动作断路器的退化过程,需要选择易测量且规律性的性能指标作为性能退化特征量。

剩余动作电流值和动作时间都可以反映剩余电流动作断路器的剩余电流保护性能。通过剩余电流动作断路器检测装置,向断路器供给从 0 开始逐步增加的剩余电流,使得检测装置可以检测断路器在恰好动作时间的剩余电流值,即剩余动作电流值。动作时间是指断路器从突然施加剩余动作电流额定值至断路器动作的时限。为了选择合适的特征退化量,将 5 个样品放在相同温度应力下进行

摸底试验,在每个周期结束时测量样品的剩余动作电流值和动作时间,共测量 10 个周期的数据进行分析。剩余动作电流值变化情况如图 3 所示。动作时间变化情况如图 4 所示。

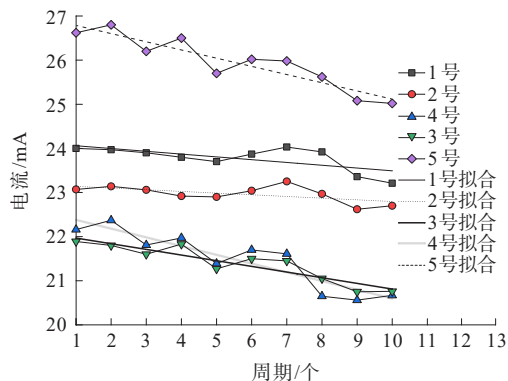


图 3 剩余动作电流值变化情况

Figure 3 Change of residual operating current value

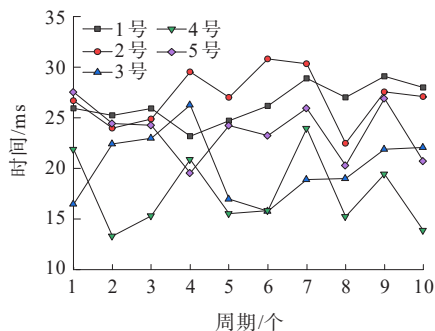


图 4 动作时间变化情况

Figure 4 Change of action time

对比图 3 和图 4 可知,在温度作用下剩余动作电流值呈线性下降的趋势,而动作时间的变化比较随机,并且没有明显的规律可循。此外,剩余电流动作断路器分断电路时合闸相角的随机性造成了动作时间上的差异。综上,利用剩余动作电流值作为剩余电流动作断路器的性能退化特征量能更准确地反映其性能退化过程。

## 2 基于退化量分布的可靠性模型

基于退化量分布对剩余电流动作断路器进行建模分析的本质就是找出各测量时刻剩余动作电流退化量的分布规律,进而对剩余电流动作断路器的可靠性进行评估。建模分析时需满足如下假设。

- 1) 剩余电流动作断路器在同一测量时刻的剩

余动作电流退化量服从某种特定分布,且不同时刻退化量服从的分布类型相同,仅是分布参数具体值不同。不同时刻退化量分布如图5所示。

2) 确定剩余动作电流退化量的分布类型后,分布模型参数与加速应力水平之间的关系可以用加速模型表示。

3) 当剩余电流动作断路器性能退化到一定值时认为其失效,将剩余动作电流退化量首次达到失效阈值时对应的时间作为剩余电流动作断路器的使用寿命。

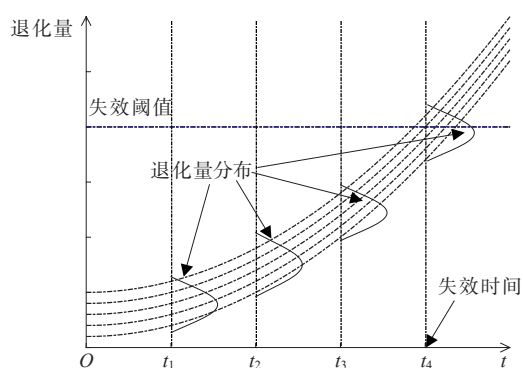


图5 不同时刻的退化量分布

Figure 5 Degradation distribution at different moments

在满足上述假设的基础上,基于退化量分布的建模基本流程如下。

1) 通过加速退化试验获得剩余电流动作断路器的剩余动作电流退化数据,对数据进行分析。根据剩余电流动作断路器相应的国家标准和行业规范将试验所选用的剩余电流动作断路器的失效阈值定为 15 mA。

2) 通过试验所得数据,使用分布模型依次对各时刻所有样品的退化量进行拟合优度检验,以确定退化量所服从的最优分布模型,从而求出该分布模型中的所有未知参数。

3) 求出各分布参数与时间的关系,再选择适当的加速模型,将其引入到各分布参数与时间的关系表达式中,然后利用最小二乘法描述分布参数与时间和应力两个变量之间的关系。

4) 将剩余电流动作断路器的正常使用应力水平带入到求出的关系式中,得到该应力水平下剩余电流动作断路器性能退化量模型参数与时间的关

系,最终实现正常使用环境下剩余电流动作断路器的可靠性评估。

### 3 剩余电流动作断路器加速退化试验设计

#### 3.1 加速应力的选取及划分

DZ47sle型断路器的使用寿命主要受内部电子元器件性能的影响。美国 Hughes 航空公司的调查结果详细描述了不同环境因素对电子元件失效的影响,如图6所示。根据 GB 16917.1—2014《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO)第1部分:一般规则》及相关使用说明,剩余电流动作断路器需要固定安装使用,要求安装处无显著振动,在常规使用环境下可以忽略振动的影响。在其余几个影响因素中,沙尘、盐雾、高度及温度冲击在常规适用环境中出现的概率很小,只有极特殊情况下才需考虑;而湿度这一因素与断路器的使用场所有关,很多在安装时已经尽量减少了湿度的影响。因此,本文仅考虑了最主要因素——温度对剩余电流动作断路器可靠性的影响,并且根据剩余电流动作断路器的失效分析可知,温度的升高将明显加快零序电流互感器、可控晶闸管、电容等剩余电流动作断路器内部电子元器件的腐蚀老化过程,进而影响其保护性能,甚至使断路器失效。因此,选取温度作为加速退化试验的加速应力,在保证剩余电流动作断路器失效机理不变的前提下,以研究其加速退化过程,将试验温度应力水平设置为 50 °C、60 °C、70 °C、85 °C。将 25 °C 设置为剩余电流动作断路器正常工作时的温度。

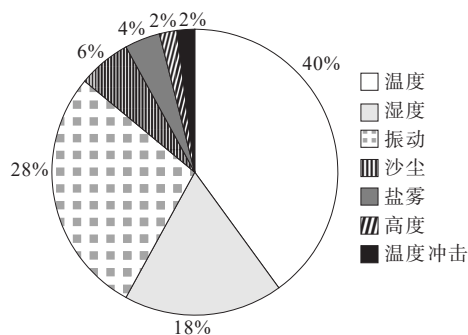


图6 各种环境应力的比例

Figure 6 The ratio of various environmental stresses

### 3.2 试验周期及样品数量

随机选取 20 个同批次生产的额定剩余动作电流值均为 30 mA 的样品,平均分为 4 组。对各温度下的 5 只样品分别标记为 A1-A5、B1-B5、C1-C5、D1-D5。试验周期设置为 28 个周期,一个周期设置为 24 h。

### 3.3 试验步骤

首先在正常使用环境下测量 20 只剩余电流动作断路器的剩余动作电流初始值,然后将 A 组的 5 只断路器放入高低温试验箱,通过改变箱内的温度和时间设定来调节剩余电流动作断路器所处环境温度。在每个周期结束时测量并记录剩余动作电流值,直至进行 28 个周期。A 组结束后,依次对 B、C、D 3 组进行试验并记录每个周期末尾的剩余动作电流数据。为了减少误差,每个样品测量 6 次剩余动作电流值以供数据分析。每个周期内高低温试验箱温度变化如表 2 所示。

表 2 高低温试验箱温度控制  
Table 2 High and low temperature test chamber temperature control

试验时间/h	温度控制
0~2	保持 25℃
2~4	均匀升高至试验温度
4~20	保持试验温度
20~22	均匀降至 25℃
22~24	保持 25℃

## 4 剩余电流动作断路器的可靠性评估

根据上述加速退化试验方案对剩余电流动作断路器进行可靠性试验,获得剩余动作电流退化数据,依照退化量分布的建模方法对剩余电流动作断路器的可靠性进行评估。

### 4.1 性能退化数据处理

在剩余电流动作断路器性能退化过程中,其剩余动作电流值不断降低。剩余动作电流累积退化量是指每个周期末测得的剩余动作电流值与剩余动作电流初始值的差值。本文利用剩余动作电流累积退化量反应剩余电流动作断路器的性能退化

趋势。对加速退化试验中获得的剩余动作电流退化数据进行分析,以 50℃应力下的退化数据为例,剩余动作电流累积退化量如图 7 所示。不同温度应力下的剩余动作电流累积退化量如图 8 所示。

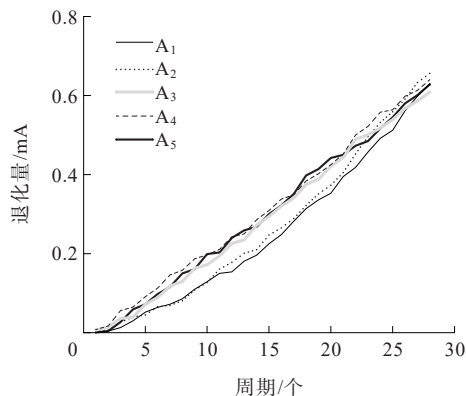


图 7 50℃剩余动作电流累积退化量

Figure 7 Accumulated degradation of residual operating current at 50℃

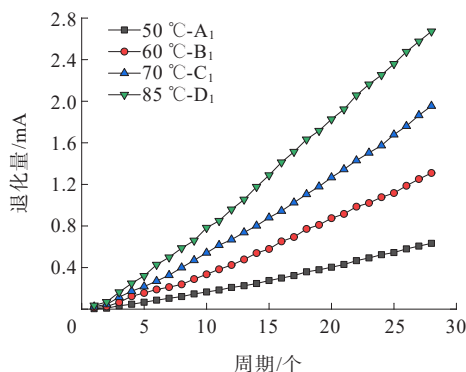


图 8 不同温度应力下剩余动作电流累积退化量

Figure 8 Cumulative degradation of residual action current under different temperature stresses

通过分析可以得出:随着时间的增加,剩余动作电流退化量逐渐增加。同时,温度越高,剩余动作电流退化量变化越大,剩余电流动作断路器性能退化得越快。

### 4.2 分布拟合

利用剩余动作电流分段退化量来确定数据符合何种分布类型。剩余动作电流分段退化量表示相邻两个试验周期剩余动作电流的差值,设  $\Delta X(i)$  为剩余动作电流分段退化量,  $\Delta X(i) = X(i) - X(i+1)$ , 当  $\Delta X(i) \geq 0$  时,表明剩余电流动作断路器性能逐渐退化。以 50℃下的 5 只断路器为例,各周期分段退化量如图 9 所示。

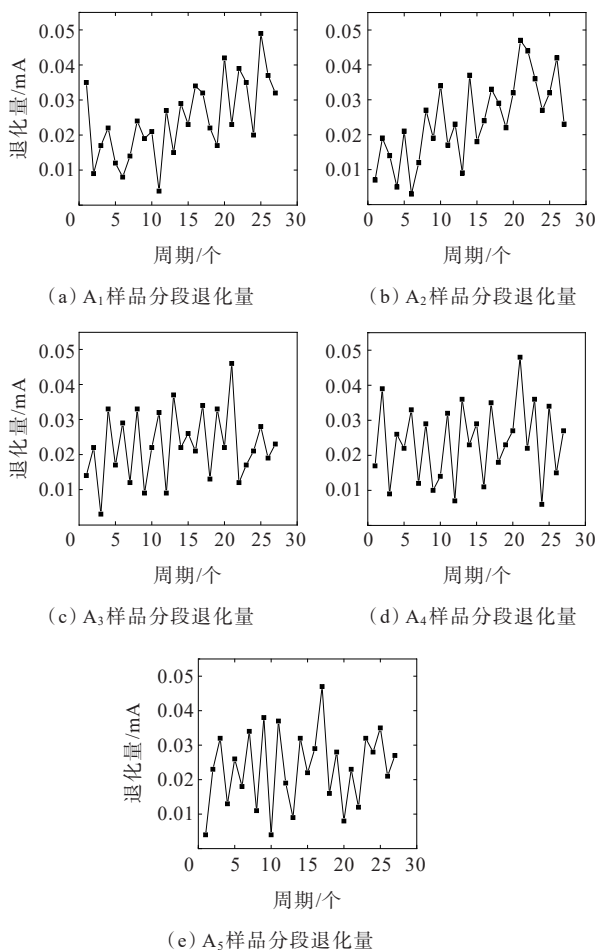


图9 50 °C下各样品的剩余动作电流分段退化量  
 Figure 9 Piecewise degradation of residual action current of each sample at 50 °C

以50 °C下的样品为例,对剩余动作电流分段退化量进行分布拟合检验,图10为正态分布下置信水平95%时的概率分布。

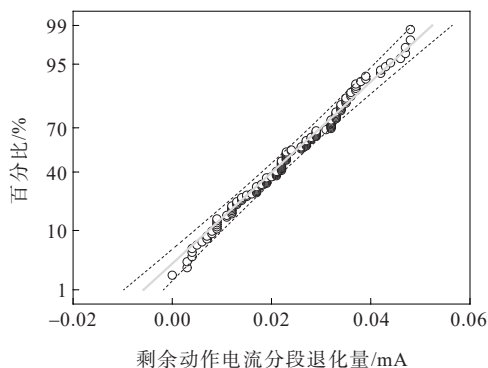


图10 概率分布  
 Figure 10 Probability distribution

图10中的数据点绝大多数分布在直线上,只有几个数据点落在直线外,但也处于虚线标注的95%置信区间内,利用概率统计学的知识判断,可以认

为50 °C下剩余动作电流断路器剩余动作电流分段退化量服从正态分布。经检验,另外3组温度应力下的数据同样服从正态分布。

用 $X_{ijk}$ 表示第 $k$ 个温度应力下第 $i$ 个样品在第 $j$ 个测量时刻测得的剩余动作电流退化量值,则有 $X_{ijk} \sim N(\mu(t_j, T_k), \sigma(t_j, T_k))$ 成立。其中, $\mu(t_j, T_k)$ 和 $\sigma(t_j, T_k)$ 分别为第 $k$ 个温度应力下样品在第 $j$ 个测量时刻退化量的均值和标准差,可由式(1)和式(2)计算。

$$\mu(t_j, T_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ijk} \quad (1)$$

$$\sigma(t_j, T_k) = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{ijk})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, $n=5$ 。

利用式(1)和式(2)计算各组温度应力下各测量时刻剩余电流动作断路器的剩余动作电流退化量的均值和标准差,计算结果如图11所示。

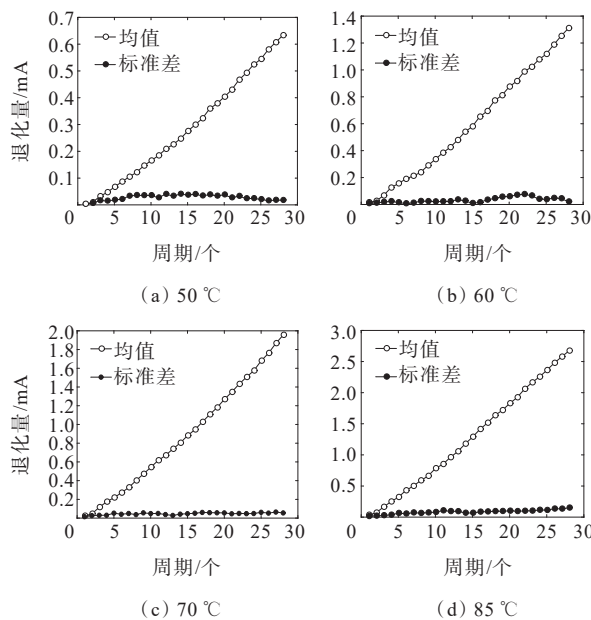


图11 分布拟合结果  
 Figure 11 Distribution fitting results

对分布拟合结果进行分析可知,在各温度应力下,剩余动作电流退化量的均值随时间增大,而标准差变化很小、基本保持不变。同时,温度越高,剩余动作电流退化量的均值变化得越大。

### 4.3 参数估计

利用最小二乘法将得到的剩余动作电流退化数据分别与以下4种退化模型进行拟合,并根据残

差平方和最小原则确定最优拟合模型。50 °C下断路器样品的拟合误差平方和如表 3 所示。

表 3 样本数据与各模型拟合的残差平方和

Table 3 The residual sum of squares of the sample data and each model fitting

编号	退化轨迹模型			
	线性函数	指数函数	幂函数	对数函数
A <sub>1</sub>	0.026 2	0.027 2	0.277 3	1.137 4
A <sub>2</sub>	0.042 6	0.044 1	0.360 3	1.221 3
A <sub>3</sub>	0.008 9	0.009 4	0.233 2	1.066 5
A <sub>4</sub>	0.005 3	0.005 7	0.210 2	1.158 8
A <sub>5</sub>	0.002 5	0.002 7	0.187 5	1.136 4

通过比较表 3 中各个退化模型下的残差平方和,可以看出 5 个样品在线性函数下的残差平方和最小,残差平方和越小说明拟合效果越好,即可以确定线性模型的拟合效果最好。

用线性函数表示各温度应力下剩余电流动作断路器剩余动作电流退化量均值与时间的关系,退化量标准差与测量时刻无关,可以用各时刻的平均值来表示。

$$\mu(t_j, T_k) = a + b \times t_j \quad (3)$$

$$\sigma(t_j, T_k) = \frac{1}{m} \sum_j^m \sigma(t_j) = c \quad (4)$$

式中,  $m$  为测量次数,即加速退化试验中各温度下试验的周期数。

最小二乘法通过使实际数据与拟合模型中对应的数据残差误差和最小来确定最佳拟合,可以实现参数的无偏估计。各温度应力下退化量均值—时间关系为一元线性回归方程,  $t_j$  为独立变量,  $f(t_j)$  为  $t_j$  时刻对应的退化量均值的实际值。利用最小二乘法得到截距和斜率的估计值为

$$\hat{a} = \frac{\sum_{j=1}^m t_j^2 \sum t_j - \sum t_j f(t_j) \sum t_j}{m \sum t_j^2 - (\sum t_j)^2} \quad (5)$$

$$\hat{b} = \frac{m \sum_{j=1}^m t_j f(t_j) - \sum t_j \sum f(t_j)}{m \sum t_j^2 - (\sum t_j)^2} \quad (6)$$

计算得出各组温度应力下退化量的均值和标准差与时间的关系如表 4 所示。

为了描述分布参数—时间—应力的关系,引入

Arrhenius 模型。Arrhenius 模型可以描述产品退化率与温度之间的关系<sup>[16]</sup>。剩余动作电流退化量的均值与时间和温度均相关,而标准差只与温度应力相关,结合 Arrhenius 模型和式(3)和式(4)可得:

$$\mu(t, T) = \exp\left(a_1 + \frac{b_1}{T}\right) + \exp\left(a_2 + \frac{b_2}{T}\right) \times t \quad (7)$$

$$\sigma(t, T) = \exp\left(a_3 + \frac{b_3}{T}\right) \quad (8)$$

利用最小二乘法对表 4 中各组温度应力下退化量的均值和标准差进行循环估计,得到剩余动作电流退化量均值和标准差与温度和时间的关系。

$$\mu(t, T) = -\exp\left(8.89 - \frac{3\,724.18}{T}\right) + \exp\left(11.01 - \frac{4\,746.56}{T}\right) \times t \quad (9)$$

$$\sigma(t, T) = \exp\left(7.91 - \frac{3\,750.19}{T}\right) \quad (10)$$

表 4 各组温度下退化量的均值和标准差

Table 4 The mean and standard deviation of the degradation at each temperature

温度/°C	$\mu$	$\sigma$
50	$-0.060\,3 + 0.023\,7t$	0.027 0
60	$-0.116\,2 + 0.049\,2t$	0.031 9
70	$-0.154\,3 + 0.072\,0t$	0.046 6
85	$-0.189\,7 + 0.101\,0t$	0.083 2

#### 4.4 可靠性评估

由  $X_{ijk} \sim N(\mu(t_j, T_k), \sigma(t_j, T_k))$ , 可得剩余电流动作断路器的失效概率密度函数为

$$f(x_{ijk}|t, T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(t, T)} \exp\left\{-\frac{[x_{ijk} - \mu(t, T)]^2}{2\sigma^2(t, T)}\right\} \quad (11)$$

$$F(t, T) = \Phi\left(\frac{\mu(t, T) - 15}{\sigma(t, T)}\right) \quad (12)$$

则  $t$  时刻剩余电流动作断路器的可靠度可以表示为

$$R(t, T) = 1 - F(t, T) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu(t, T) - 15}{\sigma(t, T)}\right) \quad (13)$$

将剩余电流动作断路器的工作温度带入式(9)和式(10),得到常温下剩余动作电流退化量的均值和标准差为

$$\mu(t, 298K) = -0.027 + 0.0073t \quad (14)$$

$$\sigma(t, 298K) = 0.0094 \quad (15)$$

正常温度下剩余电流动作断路器的可靠度函数为

$$R(t, 298K) = 1 - \Phi\left(\frac{(-0.027 + 0.0073t) - 15}{0.0094}\right) \quad (16)$$

则常温下剩余电流动作断路器的可靠度曲线如图12所示。

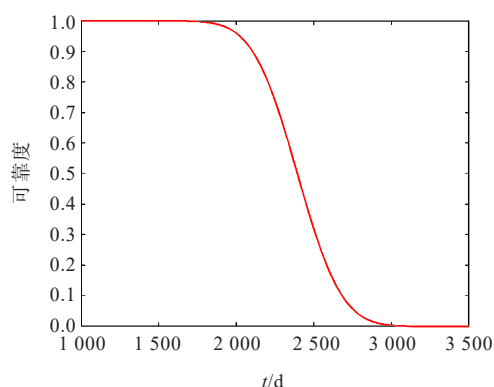


图12 可靠度曲线

Figure 12 Reliability curve

通过分析可靠度曲线,对高可靠度范围内剩余电流动作断路器的可靠性评估进行研究。剩余电流动作断路器可靠度评估结果如表5所示。

表5 剩余电流动作断路器的可靠度评估

Table 5 Reliability evaluation of leakage circuit breaker

可靠度	t/d
0.995	1 812
0.990	1 868
0.980	1 930
0.950	2 023

由图12和表5可知,当时间为1 812 d时,剩余电流动作断路器的可靠度开始显著下降。经试验研究发现,温度既影响可控晶闸管的门极电压,又能影响磁性材料的饱和磁密,导致零序电流互感器灵敏度降低,从而使得剩余电流动作断路器的可靠度快速下降。根据GB/Z 22202—2016《家用和类似用途的剩余电流动作断路器可靠性试验方法》规定,当可靠度降低到0.95以下,便不能可靠保护电力系统的正常运行,发生误动作的概率大大增加。将可靠度为0.95时对应的周期作为常温下剩余电

流动作断路器的参考使用年限。

在实际生活中,没有明确指出剩余电流动作断路器具体的使用年限,人们很少关注正在使用的剩余电流动作断路器的可靠性情况,导致了漏电流事故的发生。文中得出了常温下剩余电流动作断路器的可靠度信息,为使用人员提供了一个参考年限,能够及时淘汰不能很好发挥剩余电流保护特性的剩余电流动作断路器,为用户安全用电提供保障。

## 5 结语

剩余电流动作断路器属于高可靠性、长寿命产品,在短时间内无法获得足够的寿命信息进行可靠性评估。本文在加速退化试验的基础上,利用退化量分布的方法对剩余电流动作断路器进行了可靠性评估,主要结论如下。

1) 对剩余电流动作断路器进行失效分析,选取剩余动作电流作为性能退化量,并进行加速退化试验,获得加速退化数据。

2) 确定各时刻剩余电流动作断路器的剩余动作电流退化量服从正态分布,利用正态分布对断路器的退化量进行建模。

3) 剩余动作电流退化量的均值与温度应力以及时间都相关,标准差仅与温度应力相关。结合Arrhenius加速模型,得到退化量模型参数—时间—温度的表达式。

4) 根据正常工作温度下的可靠度函数绘制可靠度曲线,并得到剩余电流动作断路器的可靠性评估信息,当时间为1 812 d时,剩余电流动作断路器的可靠度开始显著下降。当可靠度降低到0.95以下,便不能可靠保护电力系统的正常运行,发生误动作的概率大大增加。

## 参考文献:

- [1] LI K, LIN J Y, NIU F, et al. A novel fault leakage current detection method with protection deadzone elimination[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021,70:1-9.
  - [2] 刘帼巾,岳承浩,李想.漏电流断路器的步进加速退化试验方案研究[J].电测与仪表,2020,57(14):129-134.
- LIU Guojin, YUE Chenghao, LI Xiang. Research on step



- acceleration degradation test scheme of leakage circuit breaker[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020,57(14):129-134.
- [3] BOKORO P, DOORSAMY W. Reliability analysis of low-voltage metal-oxide surge arresters using accelerated failure time model[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2018,33(6):3139-3146.
- [4] 蔚德申,王景芹,王丽,等.基于灰色理论的低压断路器寿命预测模型的研究[J].*电力科学与技术学报*,2019,34(4):35-41.  
YU Deshen, WANG Jingqin, WANG Li, et al. Research on life prediction model of low-voltage circuit breaker model based on grey theory[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2019,34(4):35-41.
- [5] 王军龙,杨欢红,张劲松,等.基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J].*智慧电力*,2022,50(7):23-28.  
WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short-circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low-energy DC[J]. *Smart Power*, 2022,50(7):23-28.
- [6] SUN H B, CAO D L, ZHAO Z D, et al. A hybrid approach to cutting tool remaining useful life prediction based on the Wiener process[J]. *IEEE Transactions on Reliability*,2018, 67(3):1294-1303.
- [7] SHEN L J, WANG Y D, ZHAI Q Q, et al. Degradation modeling using stochastic processes with random initial degradation[J]. *IEEE Transactions on Reliability*,2019, 68(4):1320-1329.
- [8] 王秀环,周军川,靳祖磊,等.直流电网用直流断路器短时电流试验方法研究[J].*电网与清洁能源*,2022,38(3):8-15.  
WANG Xiuhuan, ZHOU Junchuan, JIN Zulei, et al. Research on the short-time current test method of DC circuit breaker used in DC grids[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(3):8-15.
- [9] IBRAHIM M S, FAN J J, YUNG W K C, et al. Lumen degradation lifetime prediction for high-power white LEDs based on the Gamma process model[J]. *IEEE Photonics Journal*,2019,11(6):1-16.
- [10] 孙华,王宾.基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J].*电力系统保护与控制*,2022,50(2):102-109.  
SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. *Power System Protection and Control*,2022,50(2):102-109.
- [11] 夏小飞,芦宇峰,苏毅,等.基于振动信号区间特征快速提取的断路器储能状态辨识方法[J].*中国电力*,2021,54(2):58-65.  
XIA Xiaofei, LU Yufeng, SU Yi, et al. Circuit breaker energy storage state identification based on quick extraction of vibration signal interval features[J]. *Electric Power*,2021,54(2):58-65.
- [12] 崔昌,石伟伟,胡珊珊,等.基于磨损量正态分布刀具可靠性模型及验证[J].*广西大学学报(自然科学版)*,2020, 45(6):1378-1385.  
CUI Chang, SHI Weiwei, HU Shanshan, et al. Reliability analysis of diamond drills based on distribution of wear degradation[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*,2020,45(6):1378-1385.
- [13] 郭自豪,黄鑫,朱传运,等.断路器容性电流开断能力研究[J].*高压电器*,2022,58(3):181-185.  
GUO Zihao, HUANG Xin, ZHU Chuanyun, et al. Research on capacitive current interruption capability of circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022,58(3):181-185.
- [14] 刘帼巾,李想,王泽,等.基于Wiener过程电子式漏电断路器的剩余寿命预测[J].*电工技术学报*,2022,37(2):528-536.  
LIU Guojin, LI Xiang, WANG Ze, et al. Remaining life prediction of electronic residual current circuit breaker based on wiener process[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2022,37(2):528-536.
- [15] 陈羽,石巍,杨兵,等.混合式高压直流断路器控制保护系统[J].*电力工程技术*,2021,40(5):164-170+199.  
CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, et al. Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2021,40(5):164-170+19
- [16] UNO M, KUKITA A. Cycle life evaluation based on accelerated aging testing for lithium-ion capacitors as alternative to rechargeable batteries[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2016,63(30):1607-1617.