

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.021

基于退化的真空断路器可靠性研究

穆 艳, 王永兴, 邹积岩

(大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 作为电力系统终端设备之一,断路器起着控制、调节和保护作用,其可靠性水平对电力系统的稳定产生重要的影响。断路器可靠性研究的重点在于机械可靠性。针对真空断路器的机械可靠性研究问题,为了更充分地利用断路器失效的过程信息,文中采用基于退化的可靠性建模方法,对6台12 kV永磁机构真空断路器做了数万次退化试验,采用主成分分析法确定了超程为退化量来建立退化过程模型。根据超程退化数据,分别采用正态分布和Weibull分布建立退化分布模型,计算得到了相应的模型参数,并给出了可靠度函数和可靠度对比曲线。

关键词: 真空断路器; 机械可靠性; 主成分分析; 超程; 退化分布模型

Research on Reliability of Vacuum Circuit Breaker Based on Degradation

MU Yan, WANG Yongxing, ZOU Jiyang

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: As one of the terminal devices of the power system, the circuit breaker plays a role of control, regulation and protection, and its reliability level has an important influence on the stability of the power system. The focus of circuit breaker reliability research is on mechanical reliability. In order to make full use of the process information of the circuit breaker failure, this paper uses the degradation-based reliability modeling method to make tens of thousands of degradations test on six 12 kV permanent magnet mechanism vacuum circuit breakers. In the experiment, the principal component analysis method was used to determine the overtravel as the degradation amount to establish the degradation process model. According to the over-travel degradation data, the normal distribution and the Weibull distribution are used to establish the degradation distribution model respectively. The corresponding model parameters are obtained and the reliability function and reliability comparison curve are given.

Key words: vacuum circuit breaker; mechanical reliability; principal component analysis; overtravel; degradation distribution model

0 引言

断路器是能关合、承载、开断运行回路正常电流,也能在规定时间内关合、承载及开断规定的过载电流(包括短路电流)的开关设备。作为电力系统终端设备之一,断路器起着控制、调节和保护作用,其可靠性水平对电力系统的稳定产生重要的影响。断路器寿命分为电寿命和机械寿命。电寿命是指短路分断或额定电流下合分操作的电性能;机

械寿命指在不需修理或不更换机械零件的情况下,能承受的空载操作次数。文[1]表明机械故障是断路器失效的主要原因。我国电力部门对断路器运行故障率的不完全统计,机械故障占60%以上,其中不少电气故障也是机械原因引起的。因此,断路器可靠性研究的重点在于机械可靠性。

从20世纪70年代起,国内外学者已经开展了对断路器可靠性的研究。文[2]中在分析低压断路器电气操作和过载保护失效机理的基础上,提出断

收稿日期:2020-05-15; 修回日期:2020-07-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51337001); 辽宁省自然科学基金项目(2013020045)。

Project Supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China(51337001), Natural Science Foundation of Liaoning Province of China(2013020045).

路器电气操作和过载保护可靠性评估方法,并针对试验控制技术问题,提出相应的解决方案;文[3]中对断路器故障进行统计分析,建立断路器故障树,求解出各故障因素权重并采用萤火虫算法对权重进行寻优,建立断路器可靠性评估模型;文[4]中采用 Monte Carlo 法分析断路器操作机构的动作可靠性并建立了可靠性模型;文[5]中分析了小型断路器的可靠性指标和试验方法,定性的评估了断路器的可靠性;文[6]中分析了低压断路器的工作特点和主要故障模式,提出了采用操作故障率等级与瞬动保护成功率等级作为低压断路器的可靠性指标;文[7]中分析了断路器机械参数对其寿命的影响,结合断路器故障分析,认为断路器的研究重点应转向机械寿命和机械参数的提高;文[8]中介绍了基于贝叶斯统计的 SF₆ 断路器及操动机构的可靠性分析;文[9]中采用统计方法计算出了 SF₆ 断路器的可靠性估计,并给出了故障率和剩余寿命。在已公开发表断路器可靠性研究的文献中,在断路器可靠性研究重心是机械可靠性的问题上达成了共识,但是还存在如下问题:有的文献分析了断路器操动机构的可靠性,而没有针对整机可靠性进行研究;有的文献定性地分析了影响断路器寿命的因素,没有给出相应的可靠性模型;在进行断路器故障分析时,多是直接采用统计分析方法处理失效数据,忽略了断路器的失效过程信息,不利于掌握断路器的失效规律。

文中针对真空断路器的可靠性研究问题,对 6 台 12 kV 永磁操动式真空断路器做了数万次退化试验,采用主成分分析法确定了超程为退化量来建立退化过程模型。根据超程退化值,分别采用正态分布和 Weibull 分布建立退化分布模型,计算得到了相应的模型参数,并给出了可靠度函数和可靠度对比曲线。

1 基于退化的可靠性研究

可靠性建模有两种方法:基于失效和基于退化。基于失效的可靠性建模方法是指根据失效时间或失效数来建立产品失效的分布函数,并计算产品可靠度的方法,该方法适用于大样本情形下的寿命预测技术;基于退化的可靠性建模方法关注产品失效过程信息,通过选择与产品寿命和可靠度高度相关的物理变量(即退化量),并采用定量的数学模型描述其随时间的变化规律,刻画产品的失效过程。基于失效的可靠性建模需要利用统计方法处理失效时间数据,当缺乏足够失效样本时,该方法是不合适的。断路器这种小子样长寿命高可靠度

产品更适用于基于退化的可靠性研究方法^[10-14]。

1.1 主成分分析

确定退化量以及基于退化量的产品失效判据,是开展基于退化的可靠性建模与分析的前提。退化量是与产品失效、可靠性和寿命存在相关性的性能指标。当有多个物理量能够表征产品的退化过程,并且存在比较复杂的相关性时,就需要通过适当的数据处理技术,如主成分分析法,进行降维和约简,把高维的原始变量空间的模式向量用低维的特征空间的新的模式向量来表达,从而找出最有代表性的、最有效的特征,作为退化量^[15]。

主成分分析(principal components analysis PCA)又称主分量分析,是一种降维的统计方法。它借助正交变换,把原变量重新组合成一组新的相互无关的综合变量,同时根据实际需要从中取出几个较少的综合变量尽可能地反映原来变量的信息。

主成分分析步骤为

1)原始数据标准化

若样本数据矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对原始数据进行标准化处理

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\text{Var}(x_j)}} \quad (i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,p) \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$; $\text{Var}(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ ($j=1,2,\cdots,p$)。

计算相关系数矩阵

$$R = [r_{ij}]_{p \times p} = \frac{Z^T Z}{n-1} \quad (3)$$

式(3)中, $r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n z_{ki} \cdot z_{kj}}{n-1}$ $i, j=1,2,\cdots,p$ 。

2)解样本相关矩阵 R 的特征方程 $|R - \lambda I_p| = 0$ 得 p 个特征根,确定主成分。对每个 $\lambda_j, j=1,2,\cdots,m$,解方程组 $Rb = \lambda b$ 得单位特征向量 b 。

3)将标准化后的指标变量转换成主成分 $U_j = Z_j^T b_j, j=1,2,\cdots,m$, U_1 称为第 1 主成分; U_2 称为第 2 主成分; U_p 称为第 p 主成分。

4)主成分综合评价。

1.2 退化分布建模

假设同一类产品样本的性能退化量所服从的分布形式在不同的测量时刻是相同的,分布参数随着时间不断变化,即产品性能退化量在不同测量时刻服从统一分布族,该分布族参数为时间变量的函

数。产品性能退化量分布的差异与时间有关,通过分析,得到退化量分布参数随时间的变化规律后,即可利用可靠性评估方法对产品的可靠性进行评估^[16-17]。

常用的退化量分布模型主要有正态分布模型 Weibull 分布模型。

1.2.1 正态型退化分布模型

如果性能退化量 y 服从均值为 $\mu_y(t)$ 和标准差为 $\sigma_y(t)$ 的正态分布,当失效判据 $y \leq D_f$ (退化曲线为单调下降情况)时,则其可靠度与性能退化分布之间的关系为

$$R(t) = 1 - P(y \leq D_f) = 1 - \Phi\left(\frac{D_f - \mu_y(t)}{\sigma_y(t)}\right) \quad (4)$$

式(4)中, t_i 时刻总体均值 μ_y 的点估计为

$$\hat{\mu}_y(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (5)$$

t_j 时刻总体标准差 σ_y 的点估计为

$$\hat{\sigma}_y(t_j) = S_y(t_j) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式(6)中, $S_{y(t_j)}$ 为样本标准差; y_{ij} 为 t_j 时刻所有样本性能退化量的均值。

1.2.2 Weibull 型退化分布模型

如果性能退化量 y 服从形状参数为 $m_y(t)$ 、尺度参数为 $\eta_y(t)$ 的 Weibull 分布,则当产品是失效判据为 $y \leq D_f$ 时,则其可靠度与性能退化分布的关系为

$$R(t) = 1 - P(y \leq D_f) = \exp\left\{-\left[\frac{D_f}{\eta_y(t)}\right]^{m_y(t)}\right\} \quad (7)$$

其中尺度参数和形状参数作为时间的函数,进行建模求解得到。

2 真空断路器的机械可靠性研究

国标 GB/T 3309—1989 规定,真空断路器的机械寿命是断路器能够按照指令可靠完成规定的合闸、分闸动作;当断路器的性能参数明显劣化或关键部件变形,设备无法完成基本操作和功能时,认为断路器失效。

文中依据《设备可靠性试验》(GB/T 5080—1986) 系列标准,选用6台已通过出厂试验的12 kV 永磁操动式真空断路器样机作为研究对象,对整套样机进行编号。常温下,试验在主回路既无电压又无电流的条件下进行机械特性的测量,以初始机械特性参数作为参考的机械特性参数。试验中的机械特性参数是在额定电源电压交流220 V下,对试验样品进行 C-15 s-O-15 s 顺序序列的操作时获得的。每1 000次机械操作完成后,在不拆卸断路器任何

零部件的情况下,对样机的机械特性参数进行记录^[18-21]。

2.1 退化量的确定

退化量是与产品寿命和可靠性高度相关的物理变量。真空断路器的机械可靠性与多个机械特性相关,比如触头开距、超程、合闸时间、分闸时间、平均合闸速度和平均分闸速度等。由于影响断路器可靠性的机械特性较多,同时各个机械特性之间存在一定的相关性,因此文中采用主元分析法来确定合适的退化量。6台3801型真空断路器初始状态参数特性^[22-26]见表1。

表1 真空断路器机械特性

机械特性	1号	2号	3号	4号	5号	6号
触头开距 X_1/mm	7.88	8.67	7.64	8.24	8.59	8.40
超程 X_2/mm	3.82	3.43	3.76	3.53	3.31	3.42
合闸时间 X_3/ms	63.08	63.26	63.10	63.90	62.16	62.08
分闸时间 X_4/ms	67.95	68.85	68.67	68.30	70.23	67.25
平均合闸速度 $X_5/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.43	0.50	0.47	0.49	0.49	0.50
平均分闸速度 $X_6/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.96	0.90	0.87	0.93	0.95	0.89

根据之前提到的主元分析法,得到的数据结果见表2。

表2 主成分分析结果

特征向量	第1主成分 U_1	第2主成分 U_2	第3主成分 U_3
X_1	-0.542 3	0.139 8	0.067 3
X_2	0.573 7	-0.001 3	-0.105 0
X_3	0.234 1	-0.037 5	0.963 2
X_4	-0.253 7	0.506 3	0.163 5
X_5	-0.505 2	-0.349 6	0.173 2
X_6	0.048 0	0.774 9	0.005 5
特征根	2.953 9	1.414 3	0.893 5
贡献率	49.232 2	23.571 7	14.892 0
累计贡献率	49.232 2	72.853 8	86.695 5

主成分个数提取原则为主成分对应的特征值大于1的前 m 个主成分,通过表2可知,应选择 U_1 、 U_2 两个主成分。

则

$$\begin{cases} U_1 = -0.542 3X_1 + 0.573 7X_2 + 0.234 1X_3 - \\ \quad 0.234 1X_4 - 0.505 2X_5 + 0.048 0X_6 \\ U_2 = 0.139 8X_1 - 0.001 3X_2 - 0.037 5X_3 + \\ \quad 0.506 3X_4 - 0.379 6X_5 + 0.774 9X_6 \end{cases} \quad (8)$$

主成分综合模型为

$$U = 0.492 3U_1 + 0.235 7U_2 = -0.234X_1 + 0.282X_2 + 0.106X_3 - 0.006X_4 - 0.331X_5 + 0.206X_6 \quad (9)$$

由此可见, X_2 和断路器的可靠性正相关,并且相

关系数最大,则 X_2 对断路器的可靠性的影响最大,因此确定超程作为退化量来建立退化过程模型。

2.2 退化分布模型

6台12 kV永磁机构真空断路器的超程退化数据见表3,要求范围是 (3.5 ± 0.5) ,mm。

表3 真空断路器超程数据

$t/\text{次}$	1号	2号	3号	4号	5号	6号
0	3.82	3.43	3.76	3.53	3.32	3.42
1 000	3.80	3.39	3.73	3.52	3.31	3.40
2 000	3.73	3.38	3.71	3.51	3.30	3.39
3 000	3.69	3.32	3.69	3.49	3.29	3.35
4 000	3.66	3.27	3.68	3.48	3.27	3.32
5 000	3.65	3.25	3.66	3.46	3.25	3.30
6 000	3.63	3.22	3.63	3.43	3.23	3.27
7 000	3.57	3.15	3.60	3.41	3.20	3.26
8 000	3.51	3.10	3.59	3.40	3.18	3.24
9 000	3.51	3.09	3.55	3.29	3.16	3.23
10 000	3.50	3.08	3.54	3.38	3.13	3.22
11 000	3.48	3.06	3.52	3.37	3.11	3.20

1)正态分布模型根据表3给出的超程数据进行Jarque-Bera测试,结果表明,在置信水平 $\alpha=0.05$ 下接受原假设,数据服从正态分布。是各个测量时刻的样本均值和样本标准差见表4。

表4 超程正态分布参数估计

$t/\text{次}$	均值	标准差
0	3.723 3	0.213 2
1 000	3.688 3	0.227 6
2 000	3.566 7	0.215 9
3 000	3.565 0	0.173 3
4 000	3.561 7	0.232 3
5 000	3.511 7	0.238 9
6 000	3.396 7	0.220 4
7 000	3.348 3	0.263 0
8 000	3.333 3	0.193 7
9 000	3.335 0	0.201 5
10 000	3.296 7	0.211 8
11 000	3.278 3	0.225 5

表4中的均值呈线性下降趋势,采用线性模型对其进行拟合,结果为

$$\begin{cases} \hat{\mu}_y(t) = -0.0412x + 3.739 \\ \hat{\sigma}_y(t) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \hat{\sigma}_y(t_i) = 0.218 \end{cases} \quad (10)$$

把 $\hat{\mu}_y(t)$ 和 $\hat{\sigma}_y(t)$ 代入式(5),取失效阈值 $D_f=4$ mm,即得到超程退化量服从正态分布时,断路器在给定时间 t 的可靠度函数,其可靠度曲线见图1中虚线。

$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{D_f - \mu_y(t)}{\sigma_y(t)}\right] = 1 - \left[\frac{4 - (-0.0412t + 3.739)}{0.218}\right] \quad (11)$$

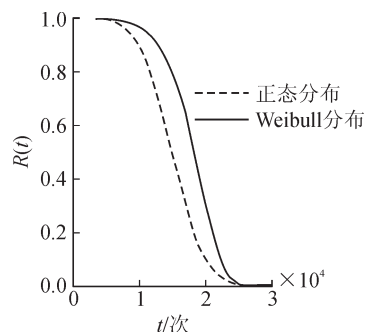


图1 真空断路器可靠度曲线

Fig. 1 Vacuum circuit breaker reliability curve

2)Weibull分布模型。根据表3得到的产品性能退化量进行威布尔变换,得到威布尔概率图,通过图形法判断各个时刻的退化量均符合威布尔分布,并采用极大似然法确定各个测量时刻的形状参数和尺度参数,见表5。

表5 超程Weibull分布参数估计

$t/\text{次}$	形状参数	尺度参数
0	3.810 9	20.038 4
1 000	3.787 5	19.520 8
2 000	3.679 6	18.099 1
3 000	3.669 3	18.802 3
4 000	3.620 2	20.095 6
5 000	3.616 2	17.680 5
6 000	3.430 9	19.179 2
7 000	3.425 7	17.774 3
8 000	3.422 3	18.159 9
9 000	3.417 5	21.251 7
10 000	3.383 6	20.421 4
11 000	3.376 8	18.636 7

其中,样本形状参数是时间的近似线性函数,尺度参数随时间增加变化不大,故可求得形状参数和尺度参数的估计值为

$$\begin{cases} \hat{\eta}_y(t) = -0.0428t + 3.832 \\ \hat{m}_y(t) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \hat{m}_y(t_i) = 18.305 \end{cases} \quad (12)$$

把 $\hat{\eta}_y(t)$ 和 $\hat{m}_y(t)$ 代入式(8),取失效阈值为 $D_f=4$ mm,即得到产品性能退化量服从Weibull分布时,产品在给定时间 t 的可靠度函数,其可靠度曲线见图1。

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{4}{-0.0428 \times t + 3.832}\right)^{18.305}\right] \quad (13)$$

3 结论

1)文中对6台永磁机构真空断路器作了11 000次

退化试验,根据记录的退化特性参数,采用主元分析法,确定了超程作为退化量。

2)根据超程退化数据,分别采用正态分布和Weibull分布建立退化分布模型,计算得到了相应的模型参数,并给出了可靠度函数和可靠度对比曲线。

3)断路器失效分为突发失效和退化失效。文中在进行可靠性分析时,主要考虑的是真空断路器的退化失效,因此,突发失效和退化失效的竞争模型是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] ANTON J, DIRK M, SOLVER C E. International surveys on circuit-breaker reliability data for substation and system studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (2): 808-804.
- [2] 王丽丽. 低压断路器的可靠性评估及其试验技术研究[D]. 天津:河北工业大学,2016.
WANG Lili. Research on reliability evaluation and test technology of low-voltage circuit breaker[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [3] 彭文邦,于虹,韦根原.基于萤火虫算法的断路器可靠性分析与研究[J]. 云南电力技术,2017,45(6):3-6.
PENG Wenbang, YU Hong, WEI Genyuan. Research of reliability analysis of circuit breaker based on firefly algorithm[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(6):3-6.
- [4] 陈文华,张文,潘骏,等.小型断路器操作机构的动作可靠性分析[J]. 中国机械工程,2015(21):2918-2922.
CHEN Wenhua, ZHANG Wen, PAN Jun, et al. Reliability analysis of operating mechanism in miniature circuit breaker[J]. China Mechanical Engineering, 2015(21):2918-2922.
- [5] 陆俭国,王景芹,陆宾.电器可靠性工作概况与发展前景[J]. 低压电器,2014(2):1-7.
LU Jianguo, WANG Jingqin, LU Bin. Overview and development prospect of reliability of electrical apparatus[J]. Low Voltage Apparatus, 2014(2):1-7.
- [6] 陆俭国,王景芹.低压断路器可靠性评估方法与验证试验方案的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):193-197.
LU Jianguo, WANG Jingqin. Study on the reliability evaluation method and compliance test sampling plan of low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12):193-197.
- [7] CHARLS E. An introduction to reliability and maintainability engineering[M]. United States of America: Waveland Press, 2005.
- [8] MAHIR M, KEMO S, MIRSAD K. Modelling of high voltage SF₆ circuit breaker reliability based on bayesian statistics[C]//7th IEEE-GCC Conference and Exhibition: Toward Improving Quality of Life. Qatar: IEEE, 2013:30-33.
- [9] ZHANG X, GOCKENBACH E, LIU Z L, et al. Reliability estimation of high voltage SF₆ circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data[J]. Electric Power Systems Research, 2013(103):105-113.
- [10] 孙权,冯静,潘正强.基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术[M]. 北京:科学出版社,2015.
SUN Quan, FENG Jing, PAN Zhengqiang. Long-life product life prediction technology based on performance degradation [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 余琼.航天继电器可靠性评价及寿命试验方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
YU Qiong. Research on reliability evaluation and life test methods for space relays[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [12] 袁荣.基于性能退化分析的可靠性方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.
YUAN Rong. Research on reliability modeling and analysis methods based on the performance degradation[D]. Chengdu: School of Mechatronics Engineering, 2015.
- [13] 贺春,陈光华,王朋飞,等.高加速寿命试验在就地化保护装置可靠性研究中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):181-186.
HE Chun, CHEN Guanghua, WANG Pengfei, et al. Application of highly accelerated life test in reliability study of outdoor installation protection device[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20):181-186.
- [14] 熊显名,朱文博,杨志伟.基于LabVIEW的电动触点电寿命试验失效类型的自动识别[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(16):124-129.
XIONG Xianming, ZHU Wenbo, YANG Zhiwei. Automatic identification of failure type of electric contact life test based on LabVIEW[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16):124-129.
- [15] 金光.基于退化的可靠性技术模型、方法及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
JIN Guang. Degradation-based reliability technology model, method and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [16] 王桂增,叶昊.主元分析与偏最小二乘法[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
WANG Guizeng, YE Hao. Principal component analysis and partial least squares[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [17] 杨志超,李晓健,陆文伟,等.基于主元分析法的高压断路器全寿命周期成本研究[J]. 电测与仪表,2017, 54 (1):55-60.
YANG Zhichao, LI Xiaojian, LU Wenwei, et al. Life cycle cost research of high voltage circuit breaker based on principal component analysis[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(1):55-60.
- [18] 翟国富,王淑娟,许峰,等.基于超程时间和吸合时间建模的继电器双变量寿命预测方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2002(7):76-80.
ZHAI Guofu, WANG Shujuan, XU Feng, et al. Research on double-variable life forecasting based on model building of super-path time and pick-up time for relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2002(7): 76-80.
- [19] 胡亮.关于真空断路器可靠性标志的讨论[J]. 高压电器,2001,37(2):5-8.

(下转第140页)

- ating the condition of arc chamber in SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 54-55.
- [15] 毛文奇,黎治宇,邓集. 动态电阻法评估 SF₆断路器灭弧室状况初探[J]. 湖南电力, 2010, 30(4): 43-44.
MAO Wenqi, LI Zhiyu, DENG Ji. Estimation of the status of arc chamber in SF₆ circuit breaker by dynamic resistance method[J]. Hunan Electric Power, 2010, 30(4): 43-44.
- [16] 胡伊兰,程红,张丰,等. 高压断路器动态电阻测试仪的设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 105-106.
HU Yilan, CHENG Hong, ZHANG Feng, et al. Design of dynamic resistance tester for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 105-106.
- [17] TINGTING C, WENJUN Z, GUANGYAO J, et al. Influence of the injected current on dynamic contact resistance measurements of HV circuit breakers[C]//China International Conference on Electricity Distribution(CICED).Shenzhen: IEEE, 2014: 1477-1481.
- [18] STANISIC Z. Method for static and dynamic resistance measurements of HV circuit breaker[C]//2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies(ISGT Europe). Manchester: IEEE, 2011: 1-5.
- [19] DE SOUZA R T, DA COSTA E G, DE ARAÚJO J F, et al. A system for dynamic contact resistance with Arduino platform on MV and HV circuit breaker[C]//IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC)Proceedings. Montevideo: IEEE, 2014: 369-373.
- [20] 傅中,陈维江,李志兵,等. 电容器组用 SF₆断路器弧触头关合磨损特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2953-2962.
FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Capacitor set SF₆ circuit breaker arc contact closure wear characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2953-2962.
- [21] 刘北阳,傅中,刘春,等. 高压断路器弧触头动态接触电阻研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 43-51.
- LIU Beiyang, FU Zhong, LIU Chun, et al. Research on dynamic contact resistance of arc contact of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 43-51.
- [22] 岳刚. 断路器异常分析[J]. 电工技术, 2018(13): 132-133.
YUE Gang. Circuit breaker abnormality analysis[J]. Electrical Engineering, 2018(13): 132-133.
- [23] 夏亚龙,林莘,徐建源,等. 高压六氟化硫断路器触头间动态击穿特性试验研究[J]. 电工电气, 2016(4): 7-11.
XIA Yalong, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Experimental study on dynamic break down characteristics between high voltage SF₆ circuit breaker contacts[J]. Electrical Engineering, 2016(4): 7-11.
- [24] 万杰枫. 高压断路器实时监测安全运行预警系统设计与研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WAN Jiefeng. Design and research of real-time monitoring and safety operation early warning system for high voltage circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [25] 王伟,李成榕,丁燕生,等. 局部放电 UHF 信号检波及其仿真[J]. 高电压技术, 2004(2): 32-47.
WANG Wei, LI Chengrong, DING Yansheng, et al. Simulation on the application of detection technique to detecting UHF PD signals[J]. High Voltage Engineering, 2004(2): 32-47.
- [26] 王彩雄. 局部放电特高频检测抗干扰与诊断技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
WANG Caixiong. Research on anti-interference and diagnosis technology for partial discharge UHF detection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.

马宏明(1987—),男,高级工程师,硕士研究生,研究方向为高压开关设备状态评价(E-mail:ncepuming@126.com)。

(上接第134页)

- HU Liang. Discussion on the reliability criterion of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(2): 5-8.
- [20] 王阳英夫. 高压断路器的机械可靠性分析及寿命评估[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG Yangyingfu. Mechanical reliability analysis and life evaluation of high voltage breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [21] 杨青,戴道立. 船用低压断路器可靠性试验方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(24): 20-26.
YANG Qing, DAI Daoli. Research on reliability test method of low voltage circuit breakers in ships[J]. Electrical Energy Management Technology, 2018(24): 20-26.
- [22] 钱晓江. 某新型塑壳式断路器的可靠性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
QIAN Xiaojiang. Research reliability of a new type of moulded case circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [23] 李生虎,张维,孙琪. 含断路器失灵保护的保护系统可靠性建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 14-20.
LI Shenghu, ZHANG Wei, SUN Qi. Reliability modeling of protection system considering circuit breaker failure protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(9): 14-20.
- [24] 姜生,李世民,王继元. 真空断路器机械特性的探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 61-64.
JIANG Sheng, LI Shimin, WANG Jiyuan. Discussion on the mechanical characteristic of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 61-64.
- [25] 翟永昌,高永强,余江. 高压断路器选相合闸方法研究[J]. 广东电力, 2020, 30(6): 107-113.
ZHAI Yongchang, GAO Yongqiang, YU Jiang. Research of method for selecting phase and controlled switching of high-voltage circuit breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(6): 107-113.
- [26] 吴思源,柯飒,李婉卿,等. 基于故障仿真分析的高压直流断路器测试要求的确定方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 53-58.
WU Siyuan, KE Sa, LI Wanqing, et al. Method to determine experimental requirements of HVDC circuit breaker based on fault simulation analysis[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 53-58.
- 穆艳(1982—),女,博士研究生,主要研究方向为智能电器和控制工程(E-mail:77351330@qq.com)。