

以可靠性为中心的滤波器小组断路器 检修策略研究*

梅冰笑¹ 徐华² 方鲲³ 王绍安¹ 韩睿¹ 王文浩¹ 郑宇³ 董旭柱³

摘要: 换流站滤波器小组断路器具有动作频繁、运行环境恶劣、故障率较高的特点, 其可靠性亟待提升。文中提出了以可靠性为中心的滤波器小组断路器检修策略, 首先分析滤波器小组断路器的故障特征, 获得以灭弧室缺陷为主的设备检修项目需求; 其次建立以设备运行风险最低为优化目标的换流站滤波器小组断路器运检策略优化模型, 计算得出增设灭弧室检修项目后的效益; 最后基于搜集到的特定类型断路器现场运行数据, 提出对该类型断路器分合闸操作 205 次时进行开盖内检具有最佳效益。基于文中研究结果总结了一套以可靠性为中心的滤波器小组断路器检修策略优化方法, 对今后改进换流站滤波器小组断路器检修策略具有一定参考意义。

关键词: 滤波器小组断路器; 检修策略; 可靠性; 优化模型; 可靠性检修

Study on Reliability Centered Maintenance Strategy for Filter Group Circuit Breakers

Binxiao MEI, Hua XU, Kun FANG, Shaoan WANG, Rui HAN, Wenhao
WANG, Yu ZHENG, Xuzhu DONG

Abstract: The circuit breaker of the converter station filter group has the characteristics of frequent operation, harsh operating environment, and high failure rate, and its reliability urgently needs to be improved. This article proposes a reliability centered maintenance strategy for filter group circuit breakers. Firstly, the fault characteristics of filter group circuit breakers are analyzed to obtain equipment maintenance project requirements mainly focused on arc extinguishing chamber defects; Secondly, establish an optimization model for the operation and maintenance strategy of the converter

收稿日期: XXXX-XX-XX

修回日期: XXXX-XX-XX

接受日期: XXXX-XX-XX

基金: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS220002)。

station filter group circuit breaker with the lowest equipment operation risk as the optimization objective, and calculate the benefits after adding an arc extinguishing chamber maintenance project; Finally, based on the collected on-site operation data of a specific type of circuit breaker, it is proposed that conducting an internal inspection of the opening and closing of this type of circuit breaker after 205 opening and closing operations has the best efficiency. Based on the research results of this article, a reliability centered optimization method for the maintenance strategy of filter group circuit breakers has been summarized, which has certain reference significance for improving the maintenance strategy of filter group circuit breakers in converter stations in the future.

Keywords: filter group circuit breaker; maintenance strategy; reliability; optimized model; reliability centered maintenance

0 引言

特高压直流输电已成为“双碳”战略背景下远距离传输清洁能源的主要手段^[1]。在直流输电系统中，换流站内均配置滤波器，以减少流入交流系统的谐波分量，提升电能质量^[2-4]。滤波器小组断路器投切频繁，设备故障频发，如何制定滤波器小组断路器检修策略，提升其可靠性，已成为当前亟待解决的问题。

目前高压断路器的运维检修策略以状态检修(condition-based maintenance, CBM)和周期性检修(time-based maintenance, TBM)为主，故障检出方式主要包括巡视、带电检测、停电检修试验等^[5-6]，依据行业内已颁布相关状态评价导则，评估设备状态，进而制定相应的检修策略^[7-8]。然而不同设备所处的运行环境、设备自身质量等都存在差异性，导致很难采用统一的标准评价所有设备状态^[9-12]。另一方面，以可靠性为中心的检修(reliability-centered maintenance, RCM)作为CBM的重要补充，已经在航空航天、核电、军事等领域得到应用^[13-16]，取得了较好的效果。RCM基于设备可靠性评估结果，确定检修项目和最优检修时机，使得设备总体运维成本最低，已成为设备检修策略研究的一个重要方向^[17]。

为获得RCM策略下设备最优的检修时机，有学者基于役龄回退理论，建立威布尔概率分布模型定量描述设备故障率的变化，进而确定最优检修间隔^[18-20]。有学者基于马尔科夫过程，综合运维成本、设备可靠性等多个指标，优化不同检修方式下的设备巡检间隔^[21-23]。上述研究为文中开展滤波器小组断路器的检修策略研究提供了理论基础。

文中提出将RCM策略应用于滤波器小组断路器，结合实际设备运维数据对其

理论模型、优化策略和运维效益进行分析，为今后优化制定滤波器小组断路器运维策略提供参考。

1 滤波器小组断路器故障特征

相较于常规交流断路器，应用于换流站投切滤波器的断路器因操作频繁且分闸后负荷侧存在残余电压，灭弧室内异物极易导致断口击穿故障。如图1所示，对某型号交流滤波器小组断路器进行返厂大修，发现灭弧室喷口绝缘击穿，弧触指护罩(即小喷口)局部碎裂，并严重影响断路器灭弧性能。



图1 某型号故障滤波器小组断路器灭弧室

Fig. 1 The situation of a type of faulty filter group circuit breaker arc extinguishing room

为有效评估滤波器小组断路器的运行情况，文中统计了2012—2022年10年间某地区换流站开关设备缺陷及故障信息，获得106起滤波器小组断路器典型故障案例。故障分类见图2，由图2可见滤波器小组断路器多为电气与机械故障，其占比分别为38.3%与44.3%。在电气故障中，涉及灭弧室的故障占30.9%，多为漏气、内部放电、重击穿等原因导致。

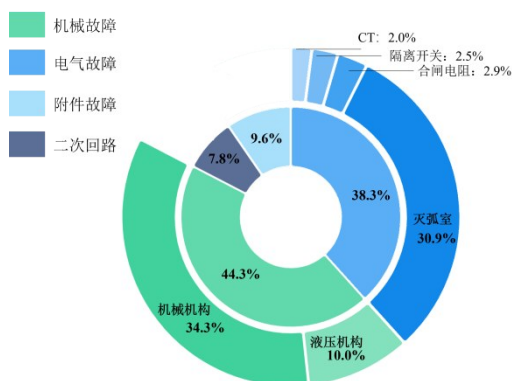


图2 滤波器小组断路器不同故障占比

Fig. 2 Proportion of different fault types of filter group circuit breakers

考虑到目前的滤波器小组断路器运维检修项目中尚未涉及灭弧室，针对灭弧室故障频发的问题，文中提出增设“开盖检查”这一停电检修项目，并采用RCM模型制定这一增设项目的实施周期，以提高滤波器小组断路器的可靠性。

2 滤波器小组断路器的RCM模型

本节将基于设备历史故障数据，建立滤波器小组断路器RCM模型，利用该模型确定项目最优周期。

当计及故障率时的设备期望维护费用随运检周期增大呈先下降后上升趋势，见图3。运检周期过短或过长均会使得设备维护总费用升高，当周期过短时，频繁的检修并不会使得设备故障率再显著降低，但人力成本投入却会显著升高，因此总费用升高；当周期过长时，可节约人力成本，但设备故障率上升，维修费用提高，因此总费用升高。优化制定合理的运检间隔 T ，在设备故障损失与运维成本之间形成平衡，将使滤波器小组断路器运检效益最高。

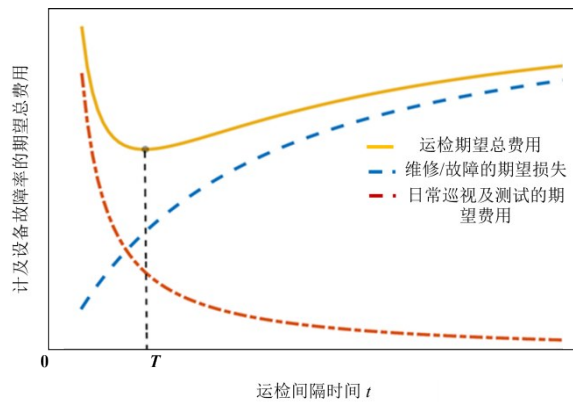


图3 计及设备故障率的期望费用随运检周期的变化关系

Fig. 3 The expected cost varying with the inspection and maintenance cycle based on the failure rate

为此有必要首先建立设备故障率计算模型。设备全生命周期内的故障率曲线呈“浴盆”状，当设备处于正常使用期时，设备故障率相对较低。电力设备故障率随运行时间的变化可用威布尔分布函数描述^[24]，其故障率函数 $\lambda(t)$ 见式(1)

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

式(1)中： t 为设备运行时间； α 和 β 分别称为分布函数的形状参数和尺度参数。选取不同的尺度参数可描述不同生命周期内设备故障率变化趋势。如图4所示，当

$\beta < 1$ 时, 故障率随时间增加呈下降趋势, 可对应浴盆曲线的早期故障期; 当 $\beta \approx 1$ 时, 故障率可近似为常数, 设备处于偶然故障期内; 当 $\beta > 1$ 时, 设备处于损耗故障期, 其故障率随运行时间增加而上升^[25]。

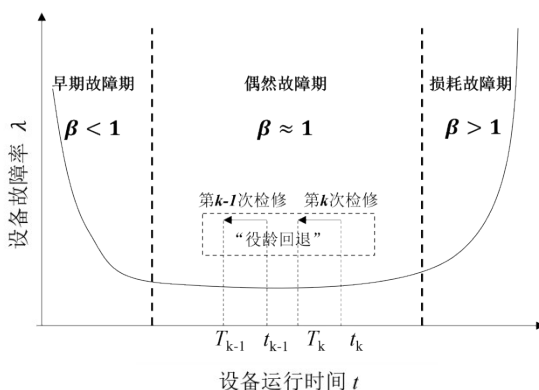


图4 设备故障率函数图

Fig. 4 Device defect density function diagram

基于设备历史故障数据, 通过分段拟合设备故障率所对应的威布尔分布, 可求解 α 、 β , 进而建立设备故障率模型。对威布尔分布函数进行参数估计时, 通常有图解法与算法两类, 不同评估方法的特点如表1。最小二乘法具有不易受异常数据干扰等优点, 因此本节将基于最小二乘法求解滤波器小组断路器的威布尔分布参数。

表1 不同威布尔分布参数评估方法特点

Table 1 Characteristics of different Weibull distribution parameter evaluation methods

方法		特点
图解法 ^[24]		依赖典型案例求解相关参数, 计算结果往往存在较大误差
数值法	极大似然法	在求解分布参数时, 需求取对数似然函数的二阶偏导, 计算过程较为复杂。
	最小二乘法	计算速度快、建模原理简单且原理清晰
	贝叶斯法	因存在后验分布难以显示解、先验分布取法不一致等问题, 实际应用较少
神经网络法、蚁群算法等		建模较为复杂, 拟合速度慢

在确定形状参数 α 与尺度参数 β 时, 可分段求解设备处于偶然故障期与损耗故障期的参数值及分界点, 具体求解过程见图5。将统计的历史故障案例按设备运行年限分类, 得出不同运行年限的故障率, 并任选两组数据作为第一次迭代初值, 根据式(1)分别对 α 与 β 进行偏微分计算; 求解第一次迭代的阻尼系数、迭代后的参数值及迭代的残差平方和 Q_1 , 再将第一次迭代后的参数值作为第二次迭代的初值,

重复迭代过程至 $Q_{i+1} > Q_i$ 结束，进而确定 α 与 β 的最终参数估计值。

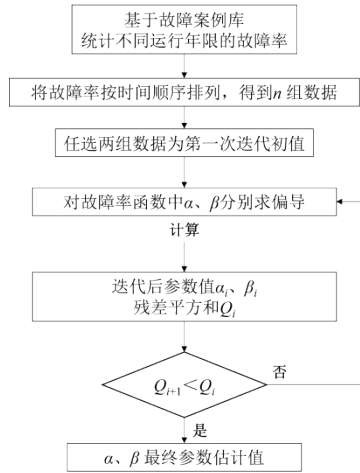


图5 形状参数与尺度参数的求解流程

Fig. 5 The process of estimation of model parameters

为求解滤波器小组断路器的故障率分布曲线，首先需求解偶然故障期与损耗故障期的分界年限 T_p 。通过式(2)可进行 T_p 的求解。

$$S_{T_p} = \sum_{i=1}^{T_p} |\lambda_i - \lambda| + \sum_{i=T_p+1}^{T_{\max}} |\lambda_i - \lambda(t_i)| \quad (2)$$

式(2)中： λ_i 为设备在第 t_i 年的故障率； λ 为偶然故障期的故障率； $\lambda(t_i)$ 为设备在损耗期的故障率。当基于实际设备故障率统计结果，改变 T_p 遍历各个时间使得 S_{T_p} 取得最小值时，即为分界点 T_p ，进而可确定滤波器小组断路器的故障率理论分布。

RCM模型的目标函数为设备维护总费用，通常包括4部分：设备更换费用、维修费用、设备停运负荷损失费用、日常巡视及测试费用，见表2。

表2 设备维护总费用

Table 2 Total cost of maintenance

费用类别	费用明细
设备更换费用 C_r	视设备不同部件的更换费用决定，设备部件或整体更换费用。
维修费用 C_m	根据设备当前状态，维修产生的维修费用。
设备停运负荷损失费用 C_l	主要由设备故障带来的负荷损失费用。
日常巡视及测试费用 C_d	检测费用 ε 、人工费用 γ 与通勤费用 k 等。

总费用 C_{Total} 表达式见式(3), N 为执行该运检项目的设备总数量。

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^N (C_{ri} + C_{mi} + C_{li}) + C_{di} \quad (3)$$

周期优化模型用式(4)表示, 该目标函数包括两部分: 一是设备由于故障导致的期望损失费用; 二是设备日常巡视及测试的期望费用。计算最优运检周期时的自变量为周期 T , T_{max} 为一个规划时间段(比如目前断路器的停电检修周期为3年), C_{budget} 为巡检及测试费用预算。约束条件包括由设备故障率、规划周期的上限、巡检及测试费用预算共同构成。该模型的数学表达式为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N (C_{ri} + C_{mi} + C_{li}) \cdot \lambda(T) + \frac{T_{max}}{T} C_{di} \\ 0 \leq T \leq T_{max} \\ \lambda(T) = \beta T^{\beta-1} / \alpha^{\beta} \\ C_d \leq C_{budget} \end{cases} \quad (4)$$

3 滤波器小组断路器的RCM模型求解

以统计获得的106起故障数据为基础, 基于历史故障率数据分析其故障率分布特点, 并求解其RCM模型确定增设“开盖检查”的最优周期。

该型号断路器在不同运行年限下的历史故障率见表3, 基于该数据, 按前文求解流程可建立该型号滤波器小组断路器的故障率模型。利用最小二乘法估计威布尔分布参数, 同时确定分界年限, 得出设备的基础故障率模型。其中, $\alpha=78.91$, $\beta=2.51$, $T_p=9$, 均方根误差RMSE为0.0006, 拟合效果较好。

表3 某型号断路器故障率与运行年限统计

Table 3 Failure rate and operating life statistics of a certain type of circuit breaker

运行年限	故障率	运行年限	故障率
1	0.00084	11	0.00131
2	0.00106	12	0.00144
3	0.00042	13	0.00148
4	0.00106	14	0.00156
5	0.00127	15	0.00180
6	0.00113	16	0.00238
7	0.00115	17	0.00296
8	0.00121	18	0.00301
9	0.00109	19	0.00407
10	0.00106	20	0.00528

根据计算结果，绘制该型号断路器故障率拟合曲线，见图6，当该型号滤波器小组断路器的最优分界年限为第9年时，偶然故障期的故障率 $\lambda=0.00121$ ，并由此得到的故障率分布见式(5)

$$\lambda_0(t) = \begin{cases} 0.00121 & t \leq 9 \\ 2.51 \times \frac{t^{1.51}}{78.91^{2.51}} & t > 9 \end{cases} \quad (5)$$

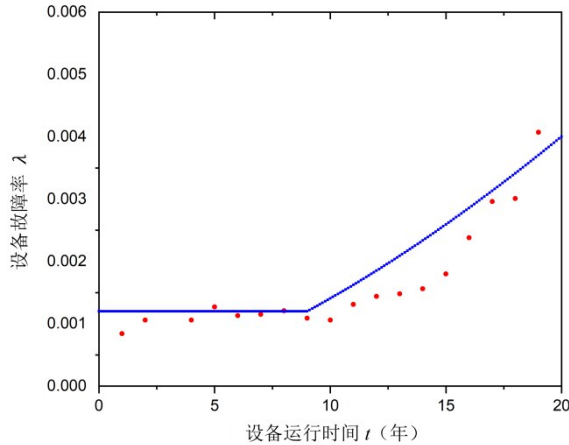


图6 滤波器小组断路器故障率拟合曲线

Fig. 6 The filter group circuit breaker failure rate fitting curve

在最大周期 T_{\max} 内，增设开盖内检项目的检修次数 k 由式(6)确定。

$$k = \frac{T_{\max}}{T} \quad (6)$$

计算设备因故障导致的损失费用时，设备更换费用 C_r 由更换产生，该类型断路器的老化失效率统计结果见表4，由此可计算因老化导致的设备损失费用；维修费用 C_m 、设备停运负荷损失费用 C_l 则取决于设备当前故障率。

根据现有运维经验，针对该类型断路器开展运维检修的各部分费用见表5。

将上述统计结果与故障率计算结果共同代入式(4)，即可绘制增设“开盖检查”项目产生的设备维护总费用随周期 T 变化的关系，见图7。当周期 T 为2.727年时，增设“开盖内检”项目导致的维护总费用最小。据统计，该型号断路器的年平均分合闸操作次数约为75次/年，将周期换算为对应的分合闸次数，对应的分合闸次数为205次，即对该型号断路器在分合闸次数为205次时进行开盖检查，将使得设备维护总费用最低，即运检效益最高。

为评估增设开盖检查项目后的运检策略产出的效益，综合设备风险与维护成本

进行分析。单台断路器设备风险 R_i 可由故障频率 f_i 与设备重要度 I_i 的乘积表示

表4 某型号断路器老化失效率统计

Table 4 Aging failure rate statistics of a certain type of circuit breaker

运行年限	老化失效率	运行年限	老化失效率
1	0.001 27	11	0.002 11
2	0.000 21	12	0.003 80
3	0.002 11	13	0.002 32
4	0.004 01	14	0.000 63
5	0.006 54	15	0.000 21
6	0.003 38	16	0.001 27
7	0.001 48	17	0.002 53
8	0.003 38	18	0.001 90
9	0.000 42	19	0.000 84
10	0.002 74	20	0.001 06

表5 某型号断路器运检费用明细

Table 5 Details of the operation and inspection cost of a certain type of circuit breaker

费用类别	费用明细
设备更换费用 C_r	该型号断路器市场单价为9.85万元/台
维修费用 C_m	当设备处于正常运行期时，维修费用为0.875万元/台；当设备处于损耗期时，维修费用为3.5万元/台。
设备停运负荷电能质量损失费用 C_l	该类型断路器主要应用于±500 kV 或±1 100 kV 换流站，由于故障造成的负荷电能质量损失，根据经验值可确定为1.47万元/台。
日常巡视及测试费用 C_d	检测费用 ε 为0.97万元/次；人工费用 γ 与通勤费用 k 每次约0.05万元/次。

$$R_i = f_i(t) \cdot I_i \quad (7)$$

基于单台设备风险评估结果，可求得故障案例库中滤波器小组断路器的总体风险 R

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad (8)$$

针对该型号断路器，由于设备电压等级相同，且投运场景差异较小，在确定设备重要度时，着重考虑设备缺陷等级。其中，缺陷等级按劣化程度分为“注意、异常、严重”3类，分别对应的重要度 I 为0.5、0.75、1。结合现有故障案例可知，未增设开盖内检时，该型号断路器的年平均缺陷率为12.8次/年，结合式(7)、(8)，可得出设备总体风险随投切次数变化关系图见图8。

从图8中可知，在增设开盖内检后，设备第二次进行该项目时，就能有效降低

风险 88%，并且该风险水平随运检次数增加而显著降低，始终将设备故障率维持在较低水平。

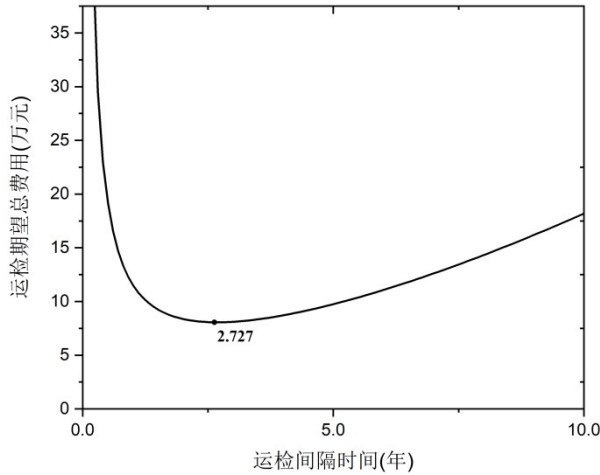


图7 运检总费用与周期的关系

Fig. 7 Curve diagram of total maintenance cost and period

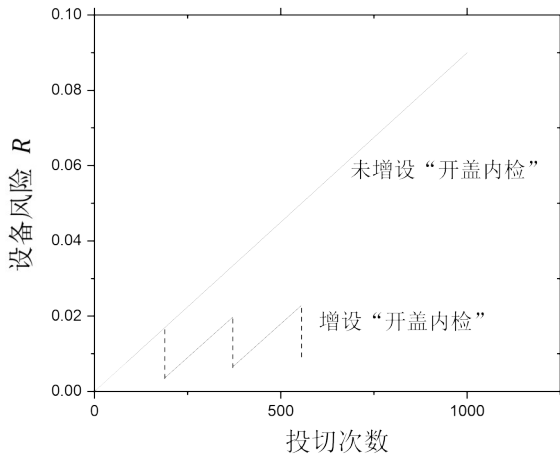


图8 设备风险随投切次数变化关系图

Fig. 8 The risk of equipment changes with the number of switching

4 结论

文中研究结论如下：

1)通过对滤波器小组断路器的实际故障情况展开分析，发现灭弧室故障占比较

高，达到30.9%，故障形式多为漏气、内部放电、重击穿等。提出增设“开盖检查”项目，以提高滤波器小组断路器的可靠性。

2)采用RCM模型建立了滤波器小组断路器增设“开盖检查”项目后，该项目的检修周期优化模型。结合实际运行中的历史故障数据分析，得出周期为2.727年，或分合闸次数达到205次时开展该项目具有最佳运检效益。

3)文中基于RCM提出的滤波器小组断路器检修策略优化方法，对于其他电力设备开展RCM运维策略具有参考意义；随着未来运行中故障数据的不断增加，需要不断依据RCM方法对运维策略进行迭代更新，从而得出当前一段时间内最优的运维策略。

参考文献

- [1] 马为民, 王玲, 李明, 等. 新型电力系统中的特高压直流输电 SLCC 换流技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4941-4948.
MA Weimin, WANG Ling, LI Ming, et al. SLCC converter technology of UHVDC transmission in new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4941-4948.
- [2] 马飞越, 相中华, 倪辉, 等. 750 kV 滤波器场断路器合闸电阻预投入异常仿真[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 65-73.
MA Feiyue, XIANG Zhonghua, NI Hui, et al. Simulation of abnormal pre-insertion for the closing resistor in 750 kV AC filter circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 65-73.
- [3] 孙龙勇, 姚灿江, 孟岩, 等. 550 kV 投切滤波器组瓷柱式 SF₆ 断路器可靠性研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2514-2525.
SUN Longyong, YAO Canjiang, MENG Yan, et al. Research on the reliability of 550 kV switching filter bank-porcelain SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2514-2525.
- [4] 倪辉, 陈晓慧, 何春应, 等. 750 kV 交流滤波器断路器的合闸暂态特性及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1846-1854.
NI Hui, CHEN Xiaohui, HE Chunying, et al. Switching transient characteristics and its suppression measures of 750 kV AC filter circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1846-1854.
- [5] 张斌. 断路器机械特性状态评价与检修策略管理改进[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
ZHANG Bin. Mechanical characteristics state evaluation and maintenance strategy management improvement of circuit breaker[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [6] 万书亭, 马晓棣, 陈磊, 等. 基于振动信号短时能熵比与 DTW 的高压断路器状态评估及故障诊断[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4249-4257.
WAN Shuting, MA Xiaodi, CHEN Lei, et al. State evaluation and fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on short-time energy entropy ratio of vibration signal and DTW[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4249-4257.

- [7] 刘建寅. SF₆高压断路器机械特性测试及其状态评价[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 173-180.
LIU Jianyin. Mechanical characteristic testing and status evaluation of SF₆ high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 173-180.
- [8] HUYNH K T, BARROS A, BERENQUER C. Maintenance Decision-Making for systems operating under indirect condition monitoring: value of online information and impact of measurement uncertainty[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(2): 410-425.
- [9] 薛安成, 刘中硕, 刘一民, 等. 基于改进役龄模型和全生命周期成本的继电保护装置服役年限确定[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 219-224.
XUE Ancheng, LIU Zhongshuo, LIU Yimin, et al. Determination of service life for relay protection device based on improved age-reduction model and life cycle cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 219-224.
- [10] ZOU Guilin, HUANG Yan, CHEN Wen, et al. Life-cycle cost model and evaluation system for power grid assets based on fuzzy membership degree[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 434-440.
- [11] PENG Ying, DONG Ming, ZUO Mingjian. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1): 297-313.
- [12] ZHONG J, LI W, BILLINTON R, et al. Incorporating a condition monitoring based aging failure model of a circuit breaker in substation reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015(6): 3407-3415.
- [13] 刘海峰, 肖繁, 赵永生, 等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 157-164.
LIU Haifeng, XIAO Fan, ZHAO Yongsheng, et al. Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 157-164.
- [14] 叶远波, 谢民, 陈晓东, 等. 基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 167-173.
YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. A condition-based maintenance strategy for a relay protection system based on failure probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 167-173.
- [15] 严英杰. 基于大数据分析技术的输变电设备状态评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
YAN Yingjie. Research on state evaluation method of power transmission and transformation equipment based on big data analysis technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [16] 顾洁, 杜渐, 秦杰, 等. 基于全生命周期成本的变电站设备检修模糊规划模型[J]. 电力系统自动化, 2014(1): 44-50.
GU Jie, DU Jian, QIN Jie, et al. A fuzzy programming model based on Life cycle cost for

- equipment maintenance in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(1): 44-50.
- [17] 吐松江·卡日, 逯浩坦, 高文胜, 等. 基于系统动力学的高压断路器全寿命成本评估[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 169-175.
Tusongjiang Kari, LU Haotan, GAO Wensheng, et al. Life cycle cost assessment of high voltage circuit breaker based on system dynamics approach[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 169-175.
- [18] 黄凯. 高压断路器剩余寿命评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
HUANG Kai. Research on residual Life evaluation of high voltage circuit breaker[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 郑重, 周圆, 王琪, 等. 基于杜鹃算法的变压器全寿命周期成本优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 49-55.
ZHENG Chong, ZHOU Yuan, WANG Qi, et al. Research on transformer Life cycle cost based on cuckoo optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 49-55.
- [20] 冯玓, 林圣, 张奥, 等. 基于连续时间马尔可夫退化过程的牵引供电设备可靠性预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1937-1945.
FENG Ding, LIN Sheng, ZHANG Ao, et al. Research on reliability prediction method for traction power supply equipment based on continuous time markov degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1937-1945.
- [21] STRAZZA C, DEL BORGHI A, COSTAMAGNA P, et al. Life cycle assessment and life cycle costing of a SOFC system for distributed power generation[J]. Energy Conversion and Management, 2015(100): 64-77.
- [22] 郝运金. 基于马尔可夫过程的漏电断路器服役状态及可靠性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
HAO Yunqian. Study on service status and reliability of leakage circuit breaker based on Markov process[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [23] 李赞. 基于可信性理论的高压断路器状态评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
LI Yun. State evaluation of high-voltage circuit breaker based on credibility theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [24] XIE M, TANG Y, GOH T N. A modified Weibull extension with bathtub-shaped failure rate function[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 76(3): 279-285.
- [25] 裴瑶, 武建文, 马速良, 等. 基于多特征评估与XGBoost的高压断路器故障诊断[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 1-9.
CHANG Yao, WU Jianwen, MA Suliang, et al. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multi-feature assessment and XGBoost[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 1-9.

作者简介

梅冰笑(1978—)，男，高级工程师，主要从事输变电设备状态感知、健康评估、智能运检等方面的研究工作(E-mail: 48733021@qq.com)。