

基于暂态电流特征的 750kV 滤波器组断路器在线监测系统开发

曾喜闻¹, 张 民¹, 赵景禹², 蔡 旭², 邓军波²

(1. 国家电网有限公司 北京 100192; 2. 西安交通大学 西安 710049)

摘要: 高压交流 SF₆ 断路器在特高压直流输电中承担无功补偿与谐波滤除任务, 由于电压等级高, 投切容量大、交流滤波器组断路器的频繁动作会引起触头烧蚀甚至引发事故。针对某±800kV 换流站实际线路配置, 利用 PSCAD 对可能出现的工况进行建模分析, 研究了 750kV 滤波器组断路器合闸电阻阻值对合闸暂态的影响及合闸电阻不同状态下的暂态电流特征, 提出合闸电阻状态诊断方法。结果表明, 合闸电阻在 300 Ω-400 Ω 时在四类滤波器上均表现出良好的综合性能, 为主电容过电压、涌流和避雷器过电压提供了较优的抑制效果。通过谐波分析、涌流峰值时刻及三相合闸一致性判据, 可有效识别合闸电阻故障。提出动态电阻法结合神经网络、SF₆ 分解组分分析及历史投切数据校正三种电寿命评估方法, 动态电阻法预测误差可控制在 4% 以内。在此基础上开发了合闸电阻在线监测系统, 实现了断路器状态的实时评估, 为 750kV 滤波器组断路器合闸电阻的分级运维策略提供了技术支持。

关键词: 交流滤波器; 合闸电阻; 涌流与过电压抑制; 断路器电寿命评估; 在线监测系统

文章编号: XXXX-XXXX(XXXX)XX-0001-14

Development of an Online Monitoring System for 750kV Filter Bank Circuit Breakers Based on Transient Current Characteristic Recognition

ZENG Xiwen¹, ZHANG Min¹, ZHAO Jingyu², CAI Xu², DENG Junbo²

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100192, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High-voltage AC SF₆ circuit breakers in ultra-high-voltage DC transmission systems are responsible for reactive power compensation and harmonic filtering. Due to the high voltage level and large switching capacity, frequent operations of AC filter circuit breakers can cause contact erosion and even lead to failures. Based on the actual line configuration of a converter station, this paper uses PSCAD to model and analyze possible operating conditions, investigates the influence of closing resistance on switching transients and the current characteristics under different resistance states, and proposes fault diagnosis methods and electrical life assessment approaches. The results show that a closing resistance in the range of 300 - 400 Ω provides excellent comprehensive performance across four types of filters, effectively suppressing overvoltage across the main capacitor, inrush currents, and arrester overvoltages. By applying criteria such as harmonic analysis, inrush current peak timing, and three-phase closing consistency, faults in the closing resistor can be accurately identified. Three electrical life assessment methods are proposed: the dynamic resistance method combined with neural networks, SF₆ decomposition product analysis, and historical switching data correction. The dynamic resistance method achieves a prediction error within 4%. A developed online monitoring system enables real-time condition assessment of circuit breakers and recommends graded maintenance strategies, providing technical support for enhancing grid reliability.

Key words: AC filter; Closing resistor; Inrush current and overvoltage suppression; Circuit breaker electrical life assessment; Online monitoring system

1 引言

滤波器组断路器承担着我国特高压直流输电工程中无功补偿和谐波滤除的重要任务^[1-4], 然而由于电压等级高、投切容量大、操作频繁, 不断出现合闸电阻故障频发、选相不准、绝缘放电频发、电寿命不足等问题, 严重影响电网的安全稳定运行, 而且需要大量人力物力和不断维修, 大大降低换流站运行效率。高压直流输电系统中, 直流输送功率调节范围大、调节频繁^[5-10]。以灵绍直流为例, 由于新能源实施现货交易, 功率调整异常频繁, 导致交流滤波器断路器投切频繁, 严重影响断路器的电寿命和机械寿命, 缩短断路器检修周期, 提高运维成本。

国网范围内, 交流滤波器场断路器故障种类多、频次高。国网在运换流站滤波器组断路器故障达 137 起, 高达 17 次/年, 故障原因复杂多样, 至今尚未系统地分析事故的故障原因。根据国网统计, 近 3 年来交流滤波器故障种类与事故案例如下, 其中操作类机构故障 33 例, 灭弧室类故障 24 例, 其他故障 19 例。

收稿日期: XXXX - XX - XX

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(No. 5500-202335797A-3-8-KJ)。

作者简介: 曾喜闻(1980—), 男, 工程师, 主要从事直流输电建设运行方面的研究工作, E-mail: 1918852877@qq.com

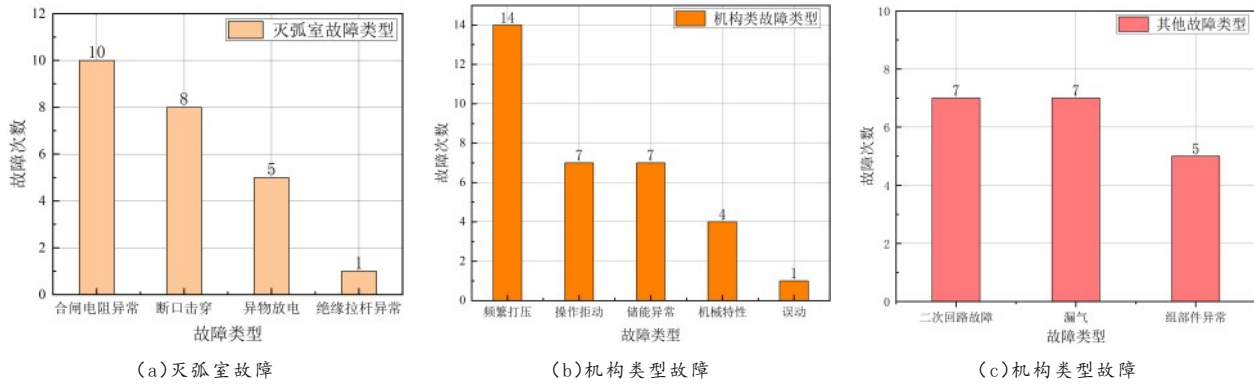


图1 近3年来交流滤波器故障种类与事故案例

Fig. 1 Types of ac filter failures and incident cases in recent 3 years

为了降低滤波器组断路器故障率并且能够有效评估其电寿命,需要针对性研究滤波器组断路器弧触头和合闸电阻性能综合评估、运行波形监测、绝缘性能监测等关键技术。河北工业大学李奎等人^[11]针对触头表面形貌的变化,揭示了电弧作用下触头形貌的沿面过程,并提出一种基于触头烧蚀区域形貌特征的电寿命评估模型,但该研究采用多阶段 Wiener 模型+Copula 函数+粒子群优化的方法,模型复杂,参数多,计算成本高,不利于实时在线评估。重庆大学邱震辉等人^[12]提出一种基于合闸电弧电参量变化特性的断路器触头劣化在线监测方法,利用触头烧蚀劣化模拟实验所得与击穿电压等数据,构建触头劣化过程中电参量变化程度的定量表征方法。

针对合闸电阻的状态监测评估基本处于待完善的阶段,现场的运维分析也基本没有对应的方式手段提供参考,但是相关的故障分析也指出了可能的研究方向,工程中出现的合闸电阻故障原因大多都是通过故障波形拟合和解体分析加以确定的。宁夏电科院马飞越等人^[13-14]对灵州整流站交流滤波器用断路器的合闸电阻在合闸过程中的间歇性缺陷展开研究,通过涌流波形分析、振动信号检测和返厂解体试验等方法确定了事故原因,并提出对电阻加装绝缘支撑环的方法。清华大学张鹏飞等人^[15]开展合闸电阻运行状态在线检测技术研究,用以对断路器合闸过程中辅助触头弹跳的状态进行研究和分析,并基于气体绝缘开关设备的宽频带电压测量,提出一种高压断路器合闸电阻装置辅助触头弹跳的在线检测和诊断方法。目前大多数换流站对于分闸后滤波器组断路器发生燃弧故障^[16-17]没有专门的监测方法,对于合闸动作时,合闸电阻运行期间实际投入的阻值监测手段存在欠缺,合闸电阻退化可能会导致合闸暂态抑制失效^[18]。因此需要对交流滤波器组断路器分合闸运行状态监测开展研究。另外,目前对于 750 kV 交流滤波器断路器的合闸电阻的取值没有明确的标准建议,其最佳选择需要根据断路器的具体工况以及实际的滤波器类型来决定。

本文系统遵循直流数字化架构设计,基于断路器运维处置经验规则,结合滤波器组断路器弧触头和合闸电阻性能综合评估、运行波形监测、电寿命评估、绝缘性能监测等关键技术,利用全寿命周期大数据,建立断路器的机械性能、开合性能、绝缘性能、电寿命评估等分析模型,实时评估断路器运行性能,实现了断路器状态可知、可控。

2 事故分析

2018年2月12日,7632断路器C相合闸波形存在明显异常,通过对C相合闸电流波形进行分析,发现该相断路器首端和尾端电流出现振荡性电流,该振荡性电流表明断路器合闸时合闸电阻未对涌流有效限制,说明合闸电阻已出现严重缺陷。此前,7632断路器C相在2月3日合闸时,在合闸电阻抑制合闸涌流阶段,电流波形已出现明显畸变。

该站 750kV 交流滤波器场 7632 断路器型号为 LW56-800, 额定电压 800kV, 额定电流 5000A, 合闸电阻由英国摩根公司生产,电阻值为 1500Ω,依据某经研院通过仿真研究后给定。合闸电阻投入期间,涌流幅值不大且较为平缓。而由图2可知,与A、B两相比,C相电流在合闸电阻投入期间波形畸变严重,合闸电阻未能起到抑制合闸涌流的作用,推测合闸电阻在投入期间发生了沿面闪络而击穿。

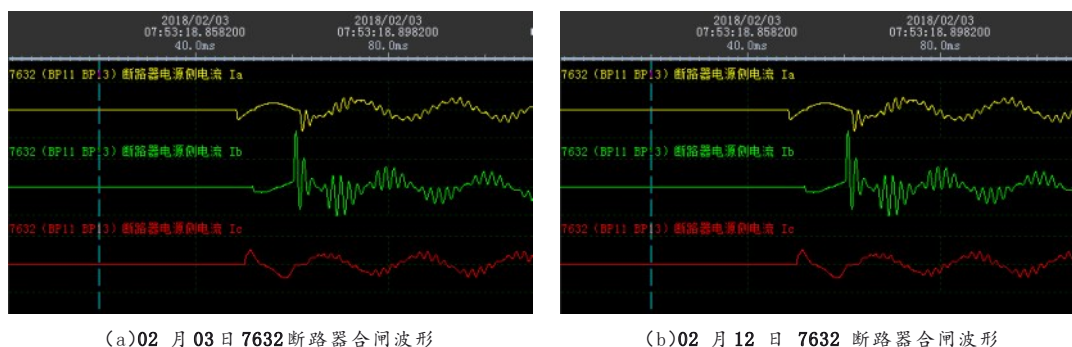


图2 7632断路器合闸涌流录波图

Fig. 2 Inrush current oscillogram of circuit breaker 7632 during closing operation

现场对7632断路器C相设备外观进行检查,未发现异常,但进行气体纯度、分解产物进行检测时,发现C相 SO_2 为 $1.2\mu\text{L/L}$,超过注意值 $1.0\mu\text{L/L}$,而A、B相未见异常。测试数据见下表1:

表1 气体纯度、分解产物检测数据

Table 1 Gas purity and decomposition product analysis data

序号	SO_2	H_2S	CO	HF	纯度
7632A相	0	0	0	0	99.78%
7632B相	0	0	0	0	99.88%
7632C相	1.2	0	14	0	99.88%
7632C相	1.2	0	14	0	99.88%

为进一步明确故障原因,对断路器罐体进行拆解检查,拆除断路器机构,将灭弧室与罐体分离,拆解结果如图3所示。绝缘筒、电容及绝缘拉杆外观良好,合闸电阻表面存在明显熏黑现象,第一柱合闸电阻支撑绝缘杆表面已全部熏黑,合闸电阻连接片存在不同程度烧伤现象,支撑绝缘子和分子筛附近存在少量黑色分解产物,合闸电阻片之间的连接铜片出现径向烧蚀,电阻绝缘支撑杆甚至被击穿,上述现象证明在合闸操作过程中,合闸电阻表面有很大的电弧电流流过。

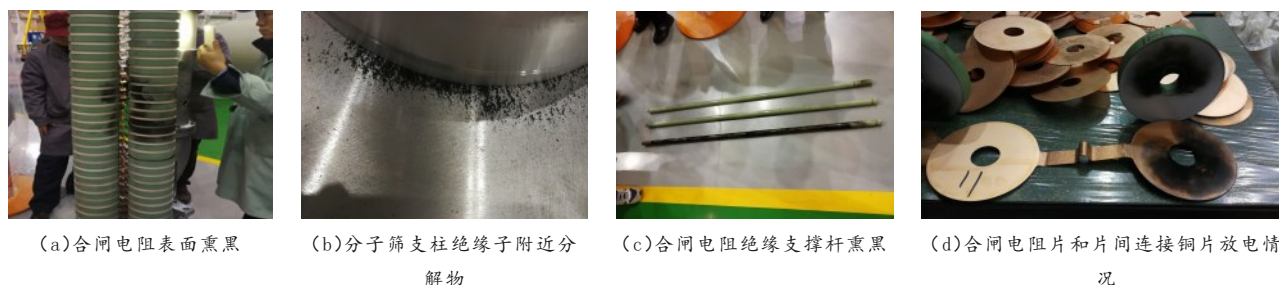


图3 7632断路器拆解结构

Fig. 3 7632 circuit breaker disassembly structure

经解体检查和现场分析合闸电阻片间压接工艺不良,导致部分合闸电阻片与连接铜片间接触电阻变大,承受合闸涌流时,造成第一柱合闸电阻部分合闸电阻片及绝缘材料损伤,进而污染范围扩大,最终导致第一柱合闸电阻绝缘支撑杆整体绝缘击穿。

3 合闸电阻型断路器关合波形评估

由于滤波器断路器合闸电阻缺陷,断路器合闸后会出现波形异常情况,主要体现为合闸电阻抑制阶段出现振荡性电流。灵州站和昌吉站通过波形排查提前发现多起合闸电阻缺陷,故可以利用合闸波形监测,提前预判部分合闸电阻损坏导致的故障。

3.1 合闸电阻技术原理

合闸电阻型断路器的基本内部结构如图4所示。该断路器采用三断口串联结构设计,包含两个主断口和一个合闸电阻断口。其中,合闸电阻与电阻断口并联配置,投入时间为8-11ms,以有效抑制操作过电压。此外,主断口两端均装有均压电容器,确保双主断口间的电压均衡分布^[19]。

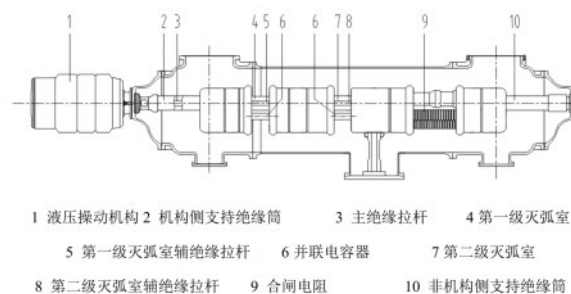


图4 合闸电阻型800kV断路器结构

Fig. 4 Structure of 800kV circuit breaker with closing resistor

断路器进行合闸操作时,主断口首先合闸,同时,合闸电阻投入运行以抑制合闸暂态过程,在8-11ms后,辅助端口合闸,合闸电阻被辅助断口短接而退出运行。断路器由合闸状态开始进行分闸操作时,主断口先分闸,电阻开关后通过复位弹簧分闸^[20]。

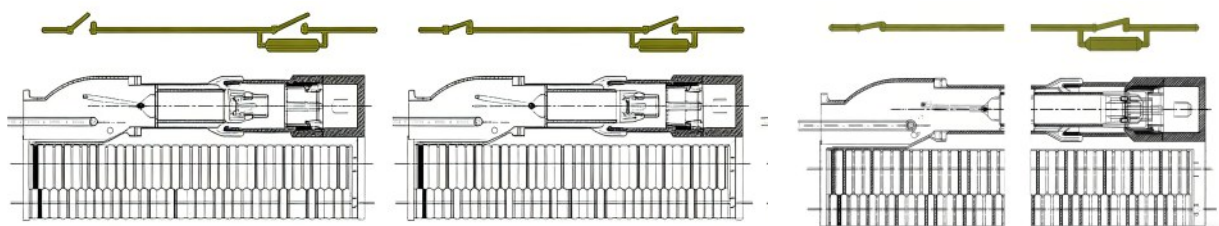


图5 合闸电阻型断路器关合动作过程

Fig. 5 Closing operation process of circuit breaker with pre-insertion resistor

3.2 合闸电阻阻值对合闸暂态过程的影响

本文仿真负载侧是逆变侧换流站交流滤波器组,换流站的交流滤波器包括BP11/BP13、HP24/36、HP3和SC电容器四种共16小组滤波器,每四小组滤波器组成一大组滤波器,分别考虑SC滤波器组,BP11/13滤波器组,HP24/36滤波器组和HP3滤波器组的背靠背合闸操作。为了能够得到各种情况下可能出现的最大过电压和涌流,同时考虑750kV断路器三相合闸不同期性小于3ms,本文利用PSCAD中多重运行工具,改变断路器合闸电阻值,研究不同合闸电阻值下滤波器小组合闸暂态。同时,在不同合闸电阻值下,对断路器合闸操作进行200次随机合闸,模拟实际运行工况,记录合闸涌流及合闸过电压最大值。

使用带合闸电阻的断路器对滤波器进行合闸操作时,会在合闸电阻投入及退出时刻产生两次暂态电流尖峰^[21]。合闸电阻投入过程中,涌流幅值与阻值呈负相关,即阻值越大,抑制效果越好。但在其退出过程中,阻值越大,所产生的合闸涌流也越大,这会加剧对交流滤波器与交流侧系统的冲击^[22]。

未加装合闸电阻时,所有滤波器小组均面临严重的暂态过电压和涌流问题,其中,负载为SC滤波器合闸涌流峰值最大,峰值为13.0kA。四组滤波器均接在750kV交流母线上,电源电压相同,然而,SC滤波器由纯电感电容组成,电容器回路的感抗较低,其值远小于其他交流滤波器。这使得该回路对合闸涌流的限制能力较弱,导致合闸瞬间产生幅值较高且衰减缓慢的涌流。

由于电容器具有储能及阻碍电压突变的作用,在进行合闸操作时,高压电容直接与交流母线接触,过电压最为严重,其中,SC滤波器组主电容过电压最高,峰值为1058.1kV。因此在确定绝缘配合方案时,要尤其注意高压电容器的绝缘水平及绝缘裕度,确保元件能够承受正常的操作过电压。

加装合闸电阻后,合闸暂态得到明显抑制,电容过电压和涌流随电阻值变化均呈现先降后升的非线性

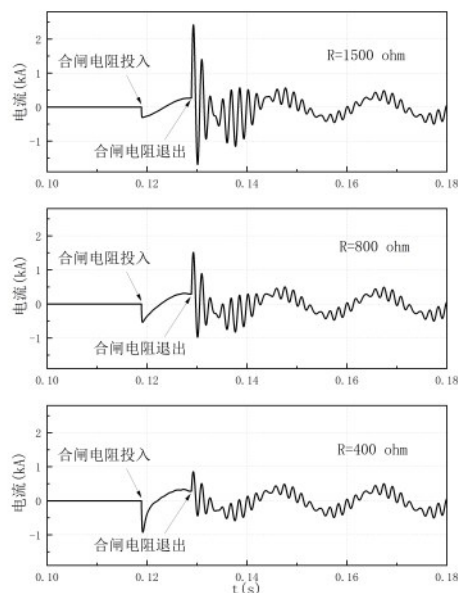


图6 装配不同阻值合闸电阻时合闸涌流波形

Fig. 6 Switching inrush current waveforms with pre-insertion resistors of different values 特性,各滤波器组所使用的合闸电阻存在最优阻值区间以达到最佳抑制效果。主电容过电压方面,SC滤波器在 100Ω 时达到最低值 667.1kV ;BP11/13 滤波器在 300Ω 时最低为 718.4kV ;HP24/36 滤波器在 200Ω 时最低为 650.2kV ;HP3 滤波器在 400Ω 时最低为 717.3kV 。合闸涌流抑制效果尤为明显,SC 滤波器在 300Ω 时涌流降至 2.7kA ;BP11/13 滤波器在 $400\text{--}500\Omega$ 区间达到最低 1.2kA ;HP24/36 滤波器在 $300\text{--}400\Omega$ 时最低为 1.8kA ;HP3 滤波器在 $400\text{--}1000\Omega$ 区间可降至 0.6kA 。除 HP24/36 滤波器组外,避雷器过电压随电阻值增大呈现缓慢下降趋势,均保持在较低水平。

3.3 关合波形评估

根据滤波器组断路器波形中的开关量变化先判断并提取出对应滤波器小组的整体波形,提取涌流出现时刻前后首端电流固定时段波形,依据电流增大幅度值及比率来判定是否出现高频涌流,同时进行涌流出现时刻的比对,合闸电阻投入阶段典型异常情况如图8所示。

以 BP11/13 为例,不同合闸电阻值下的合闸电阻和滤波器组成的支路的谐波阻抗如图9所示。可见,当合闸电阻出现故障而导致其实际阻值发生变化时,合闸电阻和滤波器组成的支路对各频次谐波的阻抗也会随之变化,尤其是在基波和主谐波附近。当合闸电阻值为 1500Ω 时,支路对基波和 11 次谐波的阻抗分别为 3461.2Ω 和 3005.2Ω ,二者比值为 1.2。而当合闸电阻值为 0 时,支路对基波和 11 次谐波的阻抗分别为 1722.7Ω 和 5.7Ω ,二者比值为 302。即合闸电阻值越小,支路对各谐波分量的阻碍作用就越弱,但对基波和主谐波的相对阻碍作用差距就越大。因此,正常情况下合闸,在合闸电阻投入期间,波形近似于基波电流,但当合闸电阻出现短路、断路、击穿等故障时,在合闸电阻投入期间谐波含量会明显增加,尤其是主谐波含量,从而导致波形畸变。

对图8所示电流进行快速傅里叶变换(FFT),得到在不同合闸电阻故障下,合闸电阻投入期间的涌流中谐波含量,结果如下图10所示。可见,当合闸电阻出现短路或者击穿故障时,合闸电阻投入期间的谐波含量会有较大变化,尤其是主谐波附近^[23]。考虑到合闸电阻投入时间较短,合闸相角可能会对各谐波含量有所影响,进一步计算出主谐波与基波幅值之比,结果如表2。

正常情况下,在合闸电阻投入期间,主谐波与基波的幅值之比在 0.1 附近,但当发生短路或者击穿故障时,比值明显偏大。将阈值取为 0.3,当比值超过 0.3 时,可以判定合闸电阻出现了故障。

3.4 合闸涌流峰值出现时刻

对于不同类型的交流滤波器,合闸电阻的投入时间都是一样的,考虑预击穿及机械动作的时间分散性

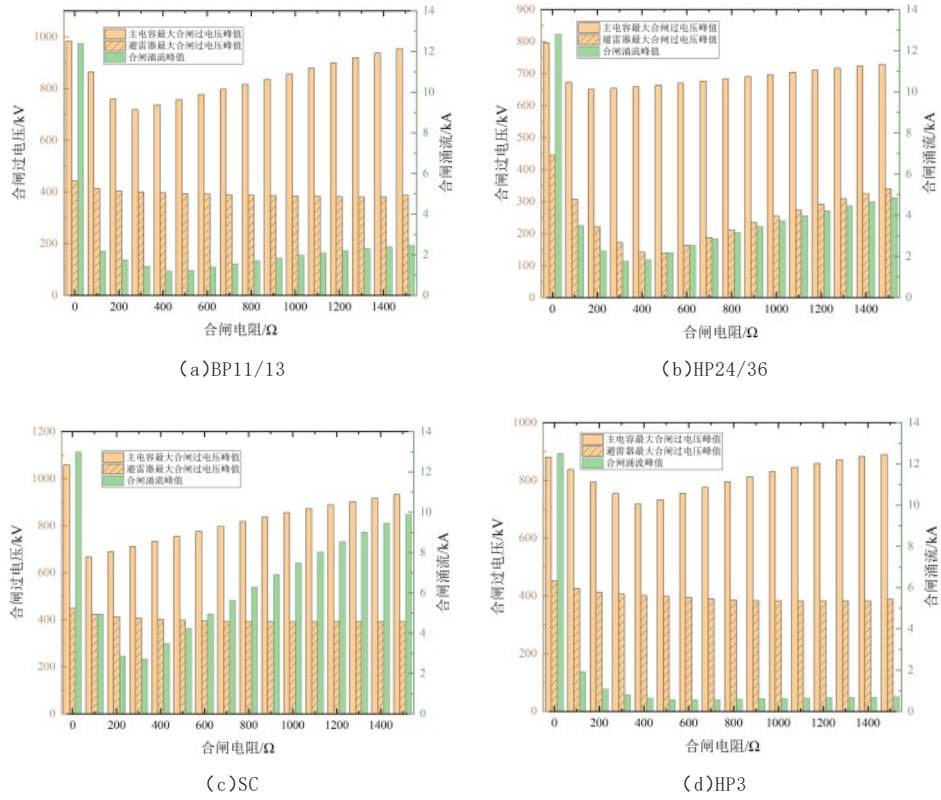


图7 滤波器合闸电阻阻值与合闸涌流及合闸过电压关系

Fig. 7 Relationship between closing resistor value, inrush current, and switching over-voltage in filter banks

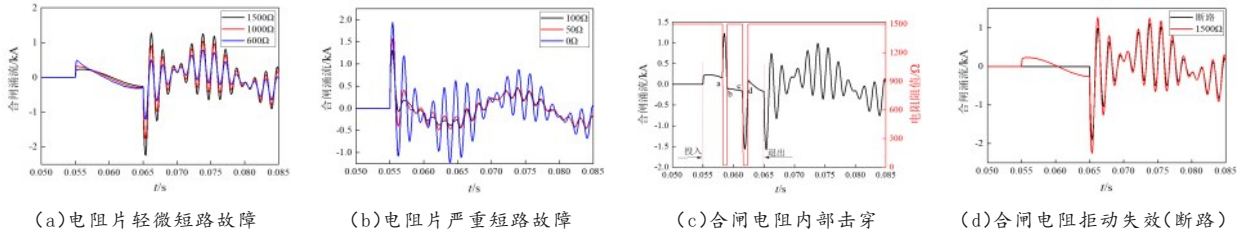


图8 合闸电阻投入阶段典型异常情况

Fig. 8 Typical abnormal conditions during closing resistor engagement phase

的影响下,均为8~11ms。由图6可知,配置1500Ω合闸电阻合闸涌流峰值出现在合闸电阻退出时刻。图8中所示的短路及击穿情况下,合闸涌流的峰值出现在了合闸电阻投入期间。对于图8中的合闸电阻拒动失效工况,合闸电阻未投入运行,合闸涌流峰值仅仅出现在主断口和辅助断口均闭合后,相邻峰值出现时间小于7ms。因此,根据初始相邻合闸涌流峰值的出现时刻也可以判断合闸电阻是否发生故障。统计数次合闸数据,合闸电阻投入时间均大于7ms,因此将阈值取为7ms,当峰值出现时间小于7ms,可以判定合闸电阻出现故障。该阈值由合闸电阻投入时间决定,与滤波器参数无关。

断路器在正常操作过程中,均为同期合闸,但由于预击穿及机械误差的影响,实际合闸时间会略有不同,差距不大。由图8(d)可以看出,当某一相的断路器用合闸电阻断路时,该相的合闸涌流出现时间会明显晚于其他两相。因此,根据三相合闸不一致性也可以判断合闸电阻是否发生故障。考虑机械误差以及预击穿带来的不同期合闸的影响,将阈值定为5ms,即非首相和前一相的合闸涌流出现时间超过5ms,即判定为合闸电阻出现故障。该阈值与三相合闸时间不同期性有关,与滤波器参数无关。

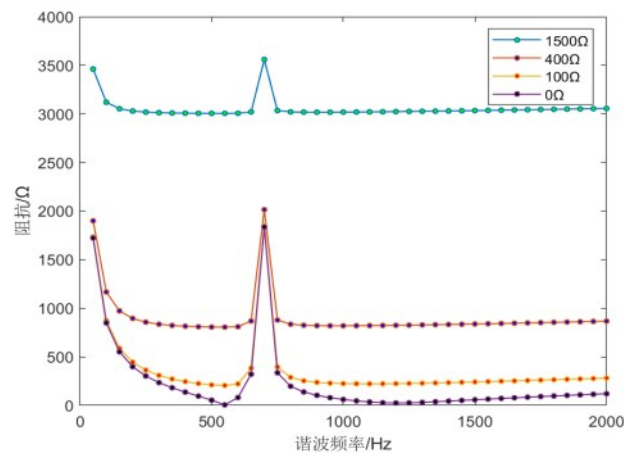


图9 不同合闸电阻值下的合闸电阻和滤波器组成支路的谐波阻抗

Fig. 9 Harmonic impedance characteristics of closing resistor and filter branch under different resistor values

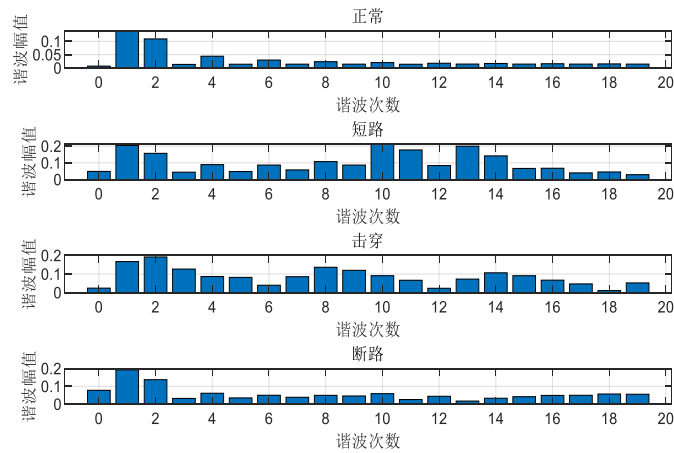


图10 合闸电阻投入期间谐波含量

Fig. 10 Harmonic content during closing resistor engagement

表2 不同合闸电阻状态下的主谐波含量

Table 2 Main harmonic content under different closing resistor states

合闸电阻状态	基波	11次谐波		13次谐波	
	幅值/kA	幅值/kA	比值	幅值/kA	比值
正常	0.1394	0.0140	0.1002	0.01471	0.1055
短路	0.2130	0.1830	0.8589	0.2068	0.9711
击穿	0.1950	0.09715	0.4846	0.0992	0.5088
断路	0.1926	0.02583	0.1341	0.0172	0.0894

4.5 合闸电阻故障诊断方法

将合闸电阻投入期间的谐波含量、合闸涌流峰值出现时刻及三相合闸时间不一致性作为合闸电阻故障诊断的判据,以实现利用合闸时电流暂态特性自动诊断断路器合闸电阻故障的目的。如果将判据规定为从三个维度分别考量,当至少两项超过阈值,即合闸电阻投入期间主谐波幅值与基波幅值比值大于等于0.3、涌流峰值出现时间小于等于7.0ms、相邻两相合闸时间间隔大于等于5.0ms,任意两个条件满足时,即判定为合闸电阻故障。

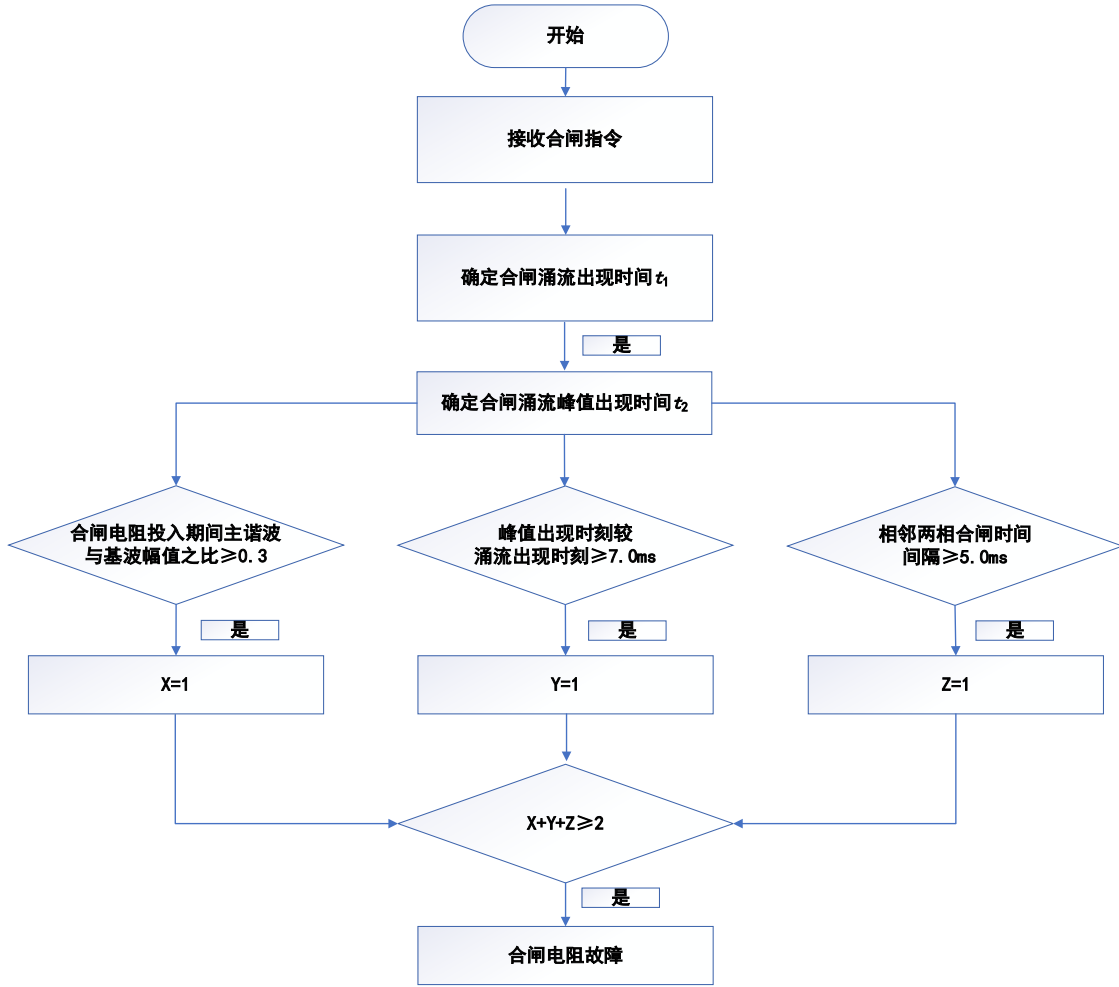


图 11 断路器合闸电阻故障诊断原理图

Fig. 11 Schematic Diagram of Circuit Breaker Closing Resistor Fault Diagnosis

4 滤波器组断路器电寿命评估技术

4.1 基于动态电阻法的断路器电寿命诊断方法

在断口两端接入大电流源,对断路器进行合-分操作,测量断口间电压、通过断口的电流和触头运动行程,计算触头接触电阻随行程变化的曲线。分闸过程中弧触头分离前无弹跳,采用分闸过程的电阻-行程曲线进行断路器触头评估。第一阶段为主触头与弧触头同时接触,电阻为主触头的动态接触电阻;第二阶段为弧触头接触,电阻为弧触头接触电阻。

动态电阻法通过实时监测断路器操作过程中主触头与弧触头的电阻变化,结合机械行程参数(总接触行程、主触头行程、弧触头行程),构建多维特征向量以评估电寿命退化。开展触头烧蚀模拟试验,使得触头状态逐渐劣化,同步进行动态接触电阻测量,得到各参数的变化趋势。

引入 L-M 算法(Levenberg-Marquardt)对电阻-行程关系进行非线性拟合,降低局部极小值干扰^[24];结合 MEA 算法(Mind Evolutionary Algorithm)对神经网络权重进行全局寻优,优化模型泛化能力。实验表明,双算法协同可将预测误差从传统方法的 12% 降至 4% 以内。模型最终输出电寿命关键指标,包括触头烧蚀量 S 和剩余电寿命 RL ,其数学表达式为:

$$RL = \left(1 - \frac{\Delta S}{S_{\max}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

其中, $S_{\max}$ 为触头材料允许的最大烧蚀阈值。

由式(1)可以计算断路器的剩余电寿命,显然,断路器剩余电寿命的取值范围在 $[0, 1]$ 之间。首先把断

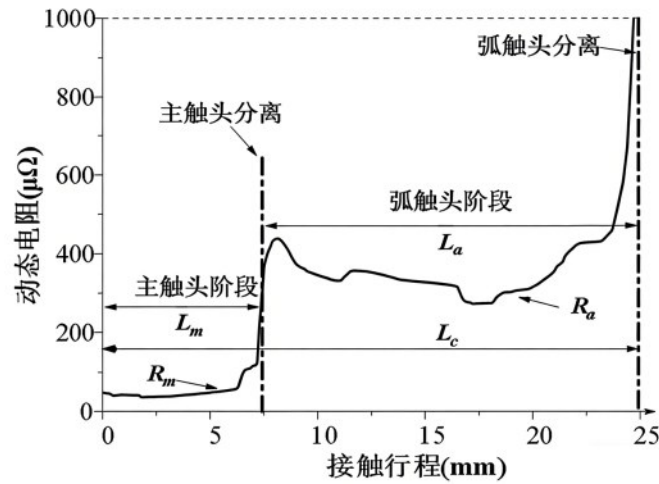
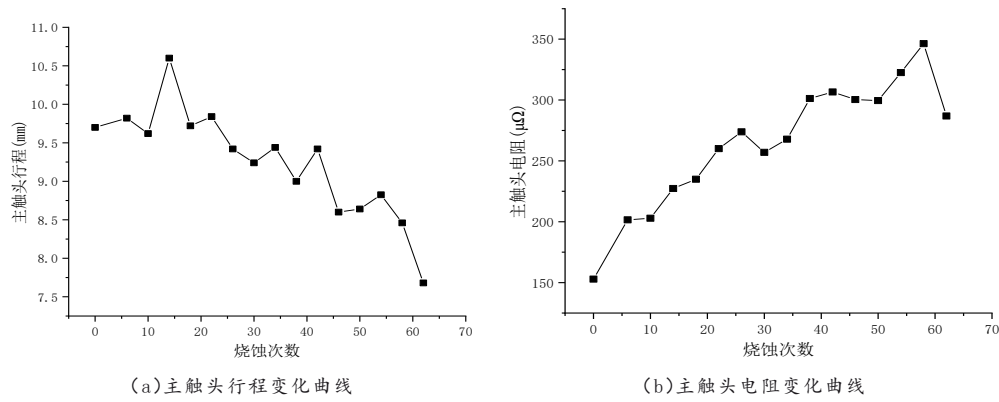


图12 分闸过程的电阻-行程曲线

Fig. 12 Resistance-stroke curve during opening process



(a)主触头行程变化曲线

(b)主触头电阻变化曲线

图13 主触头行程及电阻随烧蚀次数增加的变化趋势

Fig. 13 Variation trend of main contact travel and resistance with increasing number of arcing operations

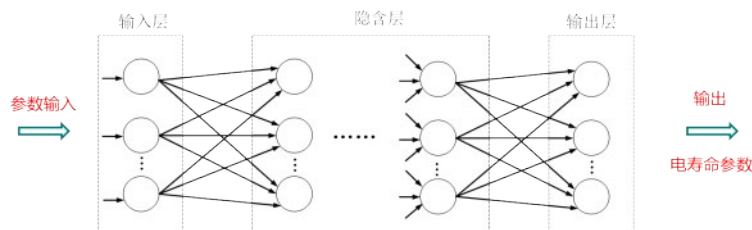


图14 基于L-M法与MEA算法双重优化的神经网络模型

Fig. 14 Dually optimized neural network model via L-M and MEA

路器的剩余电寿命划分成不同的状态,再将根据监测电流数据计算得到的断路器电寿命状态与设定阈值进行比较,如下表所示:

表3 剩余电寿命状态等级表

Table 3 Circuit breaker remaining electrical life status classification table

状态指示等级	I	II	III	IV
参数取值范围	$0 < RL \leq 0.25$	$0.25 < RL \leq 0.5$	$0.5 < RL \leq 0.75$	$0.75 < RL \leq 1$
对应状态	正常状态	一般状态	注意状态	报警状态
检修等级	D	C	B	A

当断路器剩余电寿命消耗到了报警阶段时,判定断路器应采取动态电阻测量试验,以便进一步检验断路器的电寿命状态。

4.2 基于分解组分分析的断路器电寿命诊断方法

SF_6 电弧分解产物的组分浓度与电弧能量存在显著关联,但受灭弧室内吸附剂(如活性氧化铝)影响^[25],针对其分解产物特性设计检测方案:

断路器单次开合的电弧能量与 SO_2 浓度的关系如式(2)所示,在无吸附剂条件下, SO_2 浓度与电弧能量呈线性关系;而 CF_4 因化学惰性可长期存在,其余产物(如 SOF_2 、 HF)在吸附剂作用下迅速衰减(半衰期 <30 min)。

$$E = k \times v(\text{SO}_2) \quad (2)$$

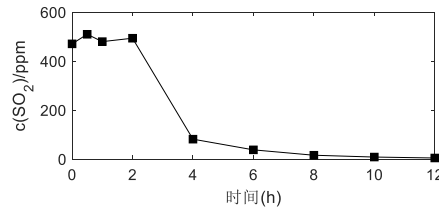


图 15 吸附剂作用下的 SO_2 浓度变化曲线

Fig. 15 The change of SO_2 under adsorbent

在断路器单次动作之后,产物扩散至吸附剂之前,测量 SO_2 浓度,换算电弧能量,进而根据电弧能量评估断路器电寿命。

$$RL = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k E_i}{AE_{\text{arc}}} \right) \times TL \quad (3)$$

其中, RL 表示剩余电寿命, TL 表示总电寿命, AE_{arc} 表示允许开断的总能量。

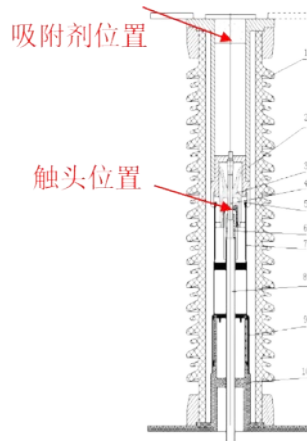


图 16 灭弧室结构图

Fig. 16 Arc Extinguishing Chamber Structure Diagram

4.3 基于历史投切电学数据的断路器电寿命诊断方法

通过挖掘断路器历史操作数据中的电学特征,建立预击穿燃弧时间 t_{arc} 与电寿命退化的映射关系。基于 PSCAD/EMTDC 构建容性负载关合模型,模拟不同滤波器类型(C型、L-C型)及合闸相角下的涌流与过电压波形。计算对应的转移电荷量、能量理想值。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt \quad (4)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (5)$$

合闸预击穿燃弧时间(t_2-t_1)由 BC2 型式试验数据结合合闸相角确定,如图 15 所示。

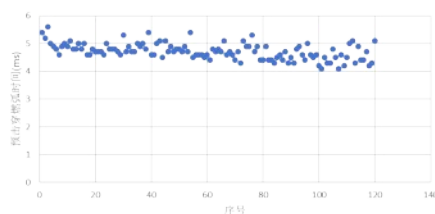


图 17 BC2 型式试验中关合预击穿燃弧时间

Fig. 17 Pre-strike Arcing Time During Closing in BC2 Type Test

断路器模拟烧蚀试验得到预击穿时间随电寿命变化规律,实际评估时根据电寿命状态对预击穿燃弧时间进行校正,得到校正后的单次关合电荷量、能量值。

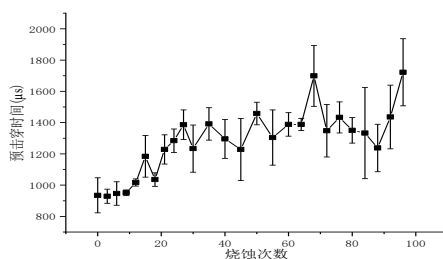


图 18 电寿命退化过程中预击穿燃弧时间变化

Fig. 18 Variation of pre-strike arcing time during electrical endurance degradation

4.4 滤波器组断路器电寿命评估系统

开发 750 kV 滤波器组断路器电寿命在线监测与状态检修策略智能推荐系统,实现滤波器组断路器电寿命的实时检测,据不同的评估结果,对其分级划分,制定相应分级的运维指标,最终形成一套涵盖断路器全寿命状态下技术经济性最优的状态检修策略。下图电寿命评估区域顶端展示设备最近一天累积动作能量或累积动作次数或距离下次大修检修年限得出的设备状态结论:正常/告警。



图 19 滤波器组断路器电寿命评估系统

Fig. 19 Electrical life evaluation system for filter bank circuit breakers

5 结论

本文针对高压交流 SF₆ 断路器在容性负载关合过程中存在的合闸电阻故障、触头烧蚀及电寿命退化等问题,研究了合闸电阻阻值对暂态过程的影响,并提出了合闸电阻状态诊断及滤波器组断路器电寿命评估手段,具体结论如下。

1) 基于 PSCAD 建模仿真揭示了合闸电阻阻值对四类滤波器小组暂态特性的影响规律,确定 300-400Ω 为最优阻值范围,可有效抑制主电容过电压、合闸涌流及避雷器过电压。根据《QGDW 1105—2015 800kV 高压交流断路器技术规范》,400Ω 能够很好满足技术要求。提取合闸电阻不同故障工况下的电流特征,提出融合谐波含量、涌流峰值时刻与三相合闸一致性的多判据故障诊断方法,实现了合闸电阻短路、击穿等典型故障的精准识别。

2) 动态电阻法结合 L-M 算法与 MEA 优化的神经网络模型,将断路器电寿命预测误差降低至 4% 以内,显著优于传统方法;基于 SF₆ 分解组分浓度的电弧能量评估与历史投切数据校正方法,进一步提高了电寿命诊断的可靠性。三者结合的综合评估体系为断路器全寿命周期管理提供了多维度数据支撑。开发的在线监测系统通过实时采集波形、分解产物及机械参数,实现断路器状态分级预警与运维策略智能推荐,能有效降低非计划停运风险。

参考文献:

- [1] Qian, Weirong, et al. Breakdown accident analysis occurred in 750kV AC circuit breaker for filter banks in ±800kV UHVDC transmission system. *Electric Power Systems Research* 246 (2025): 111670.
- [2] 程锦. 750kV 交流滤波器用断路器合闸电阻故障预判方法探究[J]. *高压电器*, 2023, 59(08): 239-244.
Cheng Jin. Study on Fault Prediction Methods of Pre-insertion Resistor for 750kV Circuit Breaker for AC Filter[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(08): 239-244.
- [3] 孟维东, 殷福煜, 常越, 等. 800kV SF₆ 罐式断路器合闸电阻研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(8): 109-113.
Meng Weidong, Yin Fuyu, Chang Yue, et al. Research of Closing Resistor in 800kV SF₆ Tank Circuit Breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(08): 109-113.
- [4] 史磊, 蒋超伟, 刘青杨, 等. 灵州换流站交流滤波器跳闸导致直流功率回降原因分析[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(3): 34 - 40.
Shi Lei, Jiang Chaowei, Liu Qingyang, et al. Cause Analysis of DC Power Drop Caused by Tripping of AC Filter at Lingzhou Converter Station[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(03): 34-40
- [5] 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(07): 2514-2525.
SUN Longyong, YAO Canjiang, MENG Yan, et al. Reliability research of 550 kV porcelain-column SF₆ circuit breaker for switching filter banks. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(07), 2514 - 2525.
- [6] Xu M, Tong W, Li H, et al. Design and experiments of a bidirectional thyristor bridge switch for LC commutation in high-current DC vacuum circuit breaker[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2025, 168110685-110685.
- [7] Sorokin S A, Kovalenko I A, Maliuten S M, et al. Algorithm for Automated Assessment of the Condition of a High-Voltage SF₆ Circuit Breaker Based on a Limited Data Set[J]. *Power Technology and Engineering*, 2024, (prepublish): 1-5.
- [8] 汪娟娟, 梁泽勇, 李子林, 等. 高压直流输电系统低功率运行的无功控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(06): 154-158.
Wang Juanjuan, Liang Zeyong, Li Zilin, et al. Reactive Power Control Strategy for Low Power Operation of HVDC Transmission System [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(06): 154-158.
- [9] 李山, 杨定乾. 某换流站 750kV 交流滤波器投切仿真计算及现场实测分析[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(1): 91 - 95.
Li Shan, Yang Dingqian. Simulated Calculation and Measurement Analysis on Switching of 750kV AC Filter at Converter Station[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(01): 91-95.
- [10] 丁久东, 冯亚东, 朱继红, 等. 高压直流断路器控制保护系统设计与开发[J]. *浙江电力*, 2021, 40(3): 21 - 28.

- Ding Jiudong, Feng Yadong, Zhu Jihong, et al. Design and Development of Control and Protection System for High-voltage DC Circuit Breaker[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(03): 21-28.
- [11] 李奎,张月,姜惠,等. 基于触头形貌特征的低压直流断路器可靠性评估[J]. 仪器仪表学报,2024,45(12):118-128.
- Li Kui, Zhang Yue, Jiang Hui, et al. Based on contact appearance characteristics of low voltage DC circuit breaker reliability evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, (12): 118-128.
- [12] 邱震辉,杨庆,马飞越,等. 基于合闸预击穿电弧特性分析的电容器组断路器触头劣化状态评估[J/OL]. 高电压技术, 1-11.
- Qiu Zhenhui, Yang Qing, Ma Feiyue, et al. Assessment of Capacitor Bank Circuit Breaker Contact Degradation Based on Analysis of Pre-breakdown Arc Characteristic[J/OL]. High Voltage Engineering, 1-11.
- [13] 马飞越,牛勃,黎炜,等. 750kV 交流滤波器用断路器合闸电阻故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(04): 145-151.
- Ma Feiyue, Niu Bo, Li Wei, et al. Fault Analysis of Circuit Breaker's Closing Resistor for 750 kV AC Filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(04): 145-151.
- [14] 牛勃,马飞越,丁培,等. 800 kV 交流滤波器场用断路器合闸电阻故障分析[J]. 高压电器,2020,56(07):36-43.
- Niu Bo, Ma Feiyue, Ding Pei, et al. Fault Analysis of Circuit Breaker's Closing Resistor for 750 kV AC Filter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(07): 36-43.
- [15] 张鹏飞,丁登伟,杨新志,等. 基于暂态电压的 GIS 断路器辅助触头弹跳监测与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023,63(07):1164-1172.
- Zhang Pengfei, Ding Dengwei, Yang Xinzhi, et al. Monitoring and analysis of the auxiliary contact bounce of a gas-insulated switchgear circuit breaker according to transient voltage[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(07): 1164-1172.
- [16] 王宾,魏向向,张国辉,等. 换流站交流滤波支路断路器燃弧故障建模分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(05):1496-1503.
- Wang Bin, Wei Xiangxiang, Zhang Guohui, et al. Fault Arc Modeling and Analysis in Circuit Breaker in HVDC Converter Station Filter Branch [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(05): 1496-1503.
- [17] 王宾,魏向向,张国辉,等. 交流滤波器支路断路器高频燃弧故障检测研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(06):1837-1845+1921.
- Wang Bin, Wei Xiangxiang, Zhang Guohui, et al. High-frequency Arc Fault Detection in Circuit Breaker in Substation AC Filter Branch[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(06): 1837-1845+1921.
- [18] 孙晋茹,戴辉翔,陈维,等. 断路器碳陶瓷合闸电阻能量耐受及失效特性[J]. 高电压技术,2024,50(06):2590-2600.
- Sun J., Dai H., Chen W., et al. Energy withstand and failure characteristics of carbon-ceramic closing resistors in circuit breakers. High Voltage Engineering, 2024,50(06), 2590 - 2600
- [19] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2015:66-67
- Li Bin Design of SF₆ High Voltage Electrical Apparatus [M]. Beijing: Beijing: China Machine Press, 2015:66-67.
- [20] He J., Li, et al. Elimination of Closing Resistors for Breakers in 1000-kV UHV System by Surge Arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(4):2168-2175.
- [21] 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(05): 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(05):1846- 1854.
- [22] 孙龙勇,徐刚,李付永,等. 550 kV 滤波器组断路器的研究设计[J]. 高压电器,2020,56(12):67 - 74
- Sun Longyong, Xu Gang, Li Fuyong, et al. Research and Design of 550 kV Filter Bank Circuit Breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2020,56 (12): 67-74
- [23] 林圣,牟大林,刘磊,等. 基于特征谐波阻抗比值的 HVDC 直流滤波器高压电容器接地故障保护方案[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6617-6627.
- Lin S., Mu D., Liu L., et al. Ground fault protection scheme for HVDC DC filter high-voltage capacitors based on characteristic harmonic impedance ratio. Proceedings of the CSEE, 2019,39,(22), 6617-6627.
- [24] 王永兴,张一帆,倪辉,等. 基于现场运行数据和 L-M 神经网络算法的滤波器场断路器合闸动作时间预测方法[J]. 高电

- 压技术,2025,51(11):5481-5491.
- Wang Y., Zhang Y., Ni H., et al. Prediction method of circuit breaker closing operation time in filter fields based on field operation data and L-M neural network algorithm [J/OL]. High Voltage Engineering, 2025,51(11):5481-5491.
- [25] 相中华,孙尚鹏,魏莹,等. SF₆断路器模拟烧蚀过程中气体分解产物特性研究[J]. 高压电器,2024,60(04):131-138+145.
- Xiang Zhonghua, Sun Shangpeng, Wei Ying, et al. Research on the Characteristics of Gas Decomposition Products in the Simulated Ablation Process of SF₆ Circuit Breakers [J]. High Voltage Apparatus,2024,60(04):131-138+145.