

# 基于分段FFT的断路器故障诊断策略 设计及应用

柴斌<sup>1</sup>, 史磊<sup>2</sup>, 刘志远<sup>2</sup>, 徐辉<sup>1</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司 检修公司, 宁夏 银川 750011;

2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 换流站交流滤波器断路器是高压直流输电系统的重要组成部分, 其内部故障的发生将直接影响直流输电系统的稳定运行。针对滤波器用断路器的故障诊断, 提出了一种根据交流滤波器断路器的分合闸电流诊断断路器健康状态的高效在线监测方法。首先, 分析了交流滤波器断路器分合闸电流的时域特征和频域特征; 然后, 利用基于分段随机快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 的断路器分合闸涌流频域分析方法, 实现对故障信息的实时监测与判定; 最后, 基于灵州换流站 750 kV 交流滤波器场 7632 断路器 C 相故障录波数据, 开展诊断策略有效性分析与验证, 结合断路器拆解检查, 验证了所提故障诊断策略的有效性, 为换流站交流滤波器断路器故障的在线诊断提供了可靠的解决方法, 具有良好的工程应用价值。

**关键词:** 换流站; 交流滤波器; 断路器; 故障诊断; 分段快速傅里叶变换 (FFT)

**中图分类号:** TM28    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23377

## Design and Application of Fault Diagnosis Strategy for Circuit Breaker Based on Segmented FFT

CHAI Bin<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>2</sup>, LIU Zhiyuan<sup>2</sup>, XU Hui<sup>1</sup>

(1. Maintenance Company, State Grid Ningxia Power Corporation, Yinchuan 750011, Ningxia, China;

2. State Grid Ningxia Power Corporation, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

**Abstract:** The circuit breaker of AC filter in converter station is an important part of HVDC system. The occurrence of internal faults will directly affect the stable operation of HVDC system. In view of the fault diagnosis of the circuit breaker for filter, an efficient online monitoring method was proposed to diagnose the health status of the circuit breaker according to the on-off current of the AC filter circuit breaker. Firstly, the time-domain and frequency-domain characteristics of the switching current in the AC filter circuit breaker were analyzed. Then, the frequency-domain analysis method of the inrush current in the circuit breaker opening and closing based on segmented random fast Fourier transform (FFT) was used to realize the real-time monitoring and judgment of the fault information; finally, based on the data of C phase fault recording for the 750 kV AC filter field 7632 circuit breaker in Lingzhou converter station, the validity analysis and verification of diagnosis strategy were carried out. Combined with the circuit breaker disassembly and inspection, the effectiveness of the fault diagnosis strategy proposed was verified. It provides a reliable solution for the on-line diagnosis of circuit breaker fault in AC filter in converter station, and has good engineering application value.

**Key words:** converter station; AC filter; circuit breaker; fault diagnosis; segmented fast Fourier transform (FFT)

在直流输电系统中, 由于直流输电技术的限制, 换流器在进行电流转化时, 会产生大量的谐

波<sup>[1]</sup>, 并消耗大量无功, 为了不给电网带来负担, 各换流站在运行时, 会根据直流输电系统的输送

基金项目: 国家电网有限公司双创孵化项目 (SGNXJX00LZJS2000510)

作者简介: 柴斌 (1990—), 男, 本科, 工程师, Email: chai\_bin@foxmail.com

功率,在交流侧自动投入相应的交流滤波器组,提供换流器所需的无功并消除谐波,以提高电网的电能质量<sup>[2]</sup>。由于直流输电的灵活性,每天需要调整多次输送功率,因此交流滤波器也跟着频繁投切,使得其断路器的投切频率远远高于站内其他的线路断路器。这无疑给交流滤波器组的安全运行带来了压力,极大地考验着交流滤波器断路器的性能<sup>[3-5]</sup>。

断路器在线状态分析系统的运用能及时了解断路器的工作状态,可减少不必要的停电试验和检修。目前,国内外有很多针对断路器在线状态分析的研究,主要分为以下几类<sup>[6]</sup>:

1)机械振动信号分析:通过增加相关振动传感器及在线分析系统,对断路器本体分合闸时的机械振动情况进行判断,输出告警。

2)分合闸线圈电流分析:用于判断分合闸线圈的异常情况,在分合闸线圈中加入流变、取样分析电路,得出分合闸线圈的正常与否情况。

3)断路器行程、速度监测:在断路器内部增加行程传感器,对断路器是否分合闸到位,以及分合闸时间进行综合判断,此方法安装困难,易对断路器本体的运行产生影响。

4)分合闸同期时间测量:针对断路器三相的分合闸时间进行综合统计比较,当断路器某一相或两相产生故障后,三相的分合闸时间则会出现较大差异,从而得出故障情况。

5)合闸弹簧状态监测:通过监测弹簧的机械状态,判断其是否存在劳损、断裂等情况,该方法仅适用于弹簧机构,并不适用于液压类机构。

上述在线监测系统对断路器的状态监测比较具有针对性,主要存在的问题是在实际断路器本体加装非原厂出厂的硬件装置,不具有通用性,实际产品缺少统一的考核与认证,所加装的装置不能保证很好的绝缘要求或会对断路器本体的正常运行带来一定程度的影响<sup>[7]</sup>。

依据特高压换流站内已有的故障录波仪,提取交流滤波器断路器分合闸电流,文中提出基于分段随机FFT分析分合闸电流频谱信息,建立故障判据,在异常扩大或造成不良影响之前发出告警信号至监控后台,避免交流滤波器组断路器故障导致直流输电系统工作异常。

## 1 分合闸电流特征分析

交流滤波器断路器的分合闸电流是反映交

流滤波器的物理属性变化的主要物理量。当交流滤波器物理属性产生异常变化时,可在对应断路器的分合闸电流中得以体现。以交流滤波器投切时记录的断路器分合闸电流为主要分析对象,通过对交流滤波器投切电流开展时域、频域特征分析,为后续断路器故障诊断判据的确定和诊断策略的设计提供理论依据。

### 1.1 时域特征分析

结合断路器分合闸时,动静触头分合过程中电流的动态过程,利用分合闸时间、电流极值、三相差异度等三项指标,开展时域特征分析。

#### 1.1.1 分合闸时间

断路器的分合闸时间是表征断路器操作性能的参数。合闸时间是指从断路器操动机构合闸线圈接通到主触头有效接触所需的时间;断路器的分闸时间包括固有分闸时间和熄弧时间两部分。分合闸时间可以表征断路器本体的分合闸属性,作为断路器本体机械损坏的预判依据<sup>[8]</sup>。

分合闸时间 $T_{bre}$ 均取三相分合闸时间的最大值,其具体计算方法如下式所示:

$$T_{bre} = \max(T_a, T_b, T_c) \quad (1)$$

式中: $T_a, T_b, T_c$ 分别为交流滤波器A相、B相和C相的分合闸时间。

#### 1.1.2 电流极值

交流滤波器内部或断路器的异常也会在电流有效值的极大值 $I_{max}$ 和极小值 $I_{min}$ 上有所体现。选取的极大值 $I_{max}$ 和极小值 $I_{min}$ 取分合闸断路器对应的三相最大值和最小值。

#### 1.1.3 三相差异度

时域里的三相差异度 $\gamma$ 表征的是三相电流的非一致性,如下式所示:

$$\gamma = \frac{\max_{i=1,2,\dots} \left[ \int_{2\pi i}^{2\pi(i+1)} (|i_a - i_b| + |i_b - i_c| + |i_c - i_a|) dt \right]}{(I_a + I_b + I_c)/3} \quad (2)$$

式中: $i_a, i_b, i_c$ 分别为移相后A相、B相和C相的电流瞬时值; $I_a, I_b, I_c$ 分别为A相、B相和C相的电流幅值。

三相差异度的数值越小,表示三相越平衡;三相差异度的数值越大,则说明交流滤波器的本体可能存在结构异常<sup>[9]</sup>。

### 1.2 频域特征分析

频域分析是电力系统中分析设备运行状态、

反映内在特征的常用手段,其频域信息构成和含量能够有效反映设备状态的动态变化。

交流滤波器及其配套断路器在正常稳态运行下,三相交流波形基本对称。若滤波器本体或断路器内部存在微小异常时,其三相电流时域值不易反映上述异常。通过对某特高压换流站交流滤波器断路器的85次分合闸电流波形就频域分析发现,其异常状态下的谐波含量与正常状态下有显著区别。因此,有必要对分合闸电流开展频域分析。

### 1.2.1 谐波最大值

为便于横向比较谐波幅值,消除交流滤波器个体参数差异的影响,取实际谐波最大值与对应的滤波器额定电流的比值,并取A,B,C三相的最大值,如下式所示<sup>[10]</sup>:

$$I_{H,max} = \max\left(\frac{I_{H,2}}{I_r}, \frac{I_{H,3}}{I_r}, \dots, \frac{I_{H,n}}{I_r}\right) \quad (3)$$

式中: $I_{H,max}$ 为谐波最大值; $I_{H,k}$ 为k次谐波有效值; $I_r$ 为对应滤波器额定电流。

### 1.2.2 总谐波畸变率

对分合闸断路器的三相电路分别计算其总谐波畸变率 $K_{THD}$ ,如下式<sup>[11]</sup>所示:

$$K_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_{H,k}^2}}{I_{rate}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $I_{rate}$ 为三相电流的额定有效值。

式(4)反映了断路器三相动作过程的不对称性及合闸电阻的投切动态。

通过时域、频域特征分析,发现两类特征的综合运用是提高断路器分合闸电流特征表达能力的有效手段,以分合闸时间、电流极值等时域特征参数表征分合闸过程的持续时间,以谐波最大值和总谐波畸变率等频域特征参数表征分合闸涌流的内在差异,作为判断和定位故障点位的判据。

## 2 断路器故障诊断策略

换流站交流滤波器断路器分合闸过程中,通过对录波波形的在线监测与分析,及时发现断路器工作异常,迅速给出预警或报警信号,是换流站运行过程中预先消除故障、提高运行稳定性的重要手段。

傅里叶变换是时域-频域变换分析中最基本的方法之一。FFT(fast Fourier transform)被称为快速傅立叶变换。

在数字处理领域应用的离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)是许多数字信号处理方法的基础。从物理意义上来看,DFT将时域的数字信号变换成频域的离散信号,根据变换之后的结果可知时域数字信号在不同频率上的幅值,确定时域信号主要分布在哪些频段上;从数学角度来看,DFT是将数字信号变换到几个正交的坐标系中。频域特征的提取与分析具有延迟时间长、运算量大等特点,不利于在线监测的实现。以故障诊断录波装置常采用的10 kHz采样频率为例,单个工频周波的采样点数量为200个,10 s时间间隔内采样点数为100 000个,若对上述采样序列直接进行时域串行分析或整段FFT计算,所需的运算存储空间和计算量巨大,不适合软件接收机特别是现场的嵌入式接收机的实现。因此,分段FFT是减轻处理负担、减少运算量的有效方式,但分析对象为连续周期性波形时,使用等间隔分段FFT方法进行频谱分析,有可能出现频谱分析的分段间隔与连续波形的周期“同步”现象,导致频谱缺失。

本文采用分段随机FFT方法,对断路器分合闸涌流进行频谱分析,以便更完整地分析电流频谱。

### 2.1 分段随机FFT基本原理

分段随机FFT在采样间隔内进行“随机分析”,即对干扰信号分段后,不是在每段数据的起始点做FFT,而是在间隔内的数据中随机选取一点作为起始点做FFT,以便更“完整”地分析干扰信号的频谱,避免陷入频谱分析的分段间隔与连续波形周期“同步”。

分段随机FFT的原理示意图如图1所示<sup>[12]</sup>。

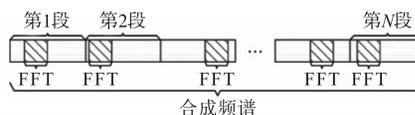


图1 分段随机FFT示意图

Fig.1 Schematic diagram of segmented random FFT

分段随机FFT的具体实现步骤:

- 1)将待分析干扰信号均匀分为N段,计算段内点数(分段时若不能整除,可在分段前补零解决);
- 2)在每段数据中随机选取一个起点,做分段256点FFT(明确分段采样点数量,避免FFT末端点数超过分段长度);
- 3)对N段FFT频谱结果进行叠加,得到干扰

信号的“完整”频谱;

4)频率分析与中心频率计算:将起止时间内的干扰信号变换至频域。先对功率谱进行平滑去除毛刺,有利于频率分析。令 $S(k)$ 为平滑后的功率谱,找出 $S(k)$ 的最大幅值 $S(k_0)$ ,再找出超过最大值一半的所有谱线,即可得到3 dB带宽<sup>[13]</sup>。令 $k$ 表示 $S(k)$ 中所有大于 $0.5S(k_0)$ 的谱线的序号集合,则干扰信号带宽的估计值为

$$\hat{B} = [\max(k) - \min(k)] \cdot \Delta f \quad k \in \arg\{S(k) > 0.5S(k_0)\} \quad (5)$$

中心频率的估计值为

$$\hat{f}_0 = \frac{[\max(k) + \min(k)]}{2} \cdot \Delta f \quad k \in \arg\{S(k) > 0.5S(k_0)\} \quad (6)$$

式中: $\Delta f$ 为频率分辨率;函数 $\arg\{S(k) > 0.5S(k_0)\}$ 为求取 $S(k)$ 中所有大于 $0.5S(k_0)$ 的谱线的序号集合。

## 2.2 合闸涌流高频分量判据

在断路器合闸时采用上述分段随机FFT方法,分析提取合闸电阻的作用时间,以频谱分析结果为判断依据,以合闸电阻作用时间为量化指标,判断断路器状态是否异常<sup>[14]</sup>:

1)当合闸作用时间在0~8 ms时,判定为断路器异常;

2)当合闸作用时间在8~12 ms时,判定为断路器正常;

3)当合闸作用时间大于12 ms时,判定为断路器异常。

在断路器合闸时,提取录波装置采集的三相合闸涌流波形,如图2所示。

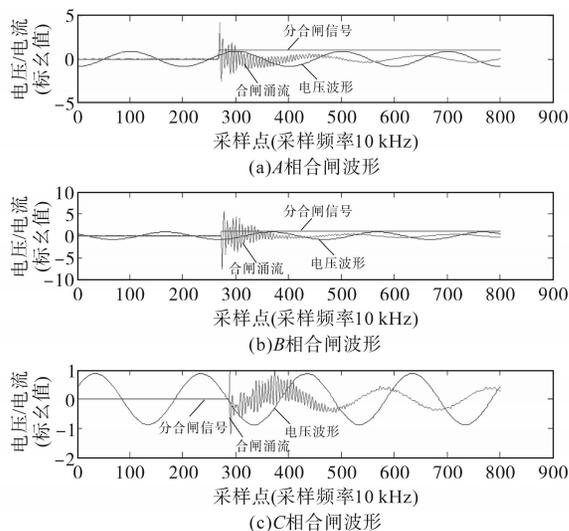


图2 三相合闸涌流录波波形

Fig.2 Recording waves of three phase closing inrush current

为便于比较分析,对电压电流信号进行标么化处理,分合闸信号曲线中,0电平代表分闸状态,1电平代表合闸状态。由图2可知,三相的合闸涌流区别较大,A相的合闸涌流最小,C相的合闸涌流最大。

分段分析分段电流的FFT频谱(如图3所示),依据前述频谱分析式(3)、式(4),计算高频分量占比和具体值,同时计算高频分量变化趋势。

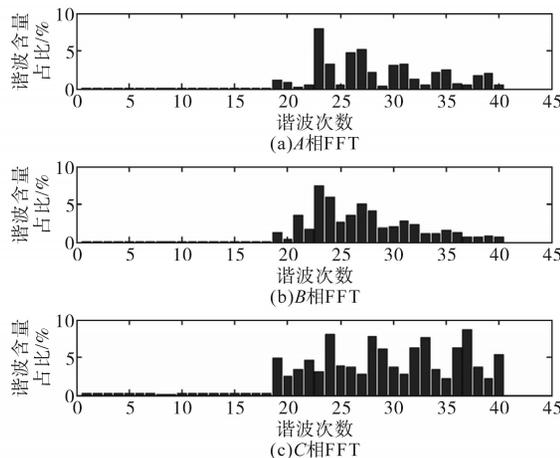


图3 FFT频谱分析

Fig.3 FFT spectrum analysis

图3频谱分布表明:A相的高频谐波最低,而C相的高频谐波含量最大,说明C相断路器存在异常,与图2的时域波形结果相符。如果在设定时间内(8 ms)高频分量占比超过阈值(经大量实际运行数据统计分析,选为15%),则判断断路器出现异常。

## 3 诊断策略验证与试验分析

为验证上述基于分段随机FFT的断路器诊断策略的有效性,以灵州换流站750 kV交流滤波器场7632断路器C相故障为例,开展分析。

### 3.1 设备概况及故障简述

灵州换流站750 kV交流滤波器场7632断路器型号为LW56-800,新东北电气集团高压开关有限公司制造,2018年6月14日投运,额定电压800 kV,额定电流5 000 A,额定短路开断电流63 kA。配用合闸电阻为英国摩根公司生产AB410-14R28±5%型,电阻值1 500 Ω,其断口均压电容为瑞士MAXWELL公司生产的CDOR2648B10型,电容量为2 000 ± 40 pF。

2018年12月31日21:19:20,灵州换流站正常投入7632小组交流滤波器后,故障录波数据显

示7632断路器C相合闸波形存在明显异常,为防止闪络事件再次发生,现场将断路器进行隔离。

### 3.2 诊断策略应用及故障分析

在交流滤波器断路器在线诊断系统中,合闸涌流有效判据采用本文提出的基于分段随机FFT的频域分析方法,判定涌流的采样点数量为1 000个,时长为20 ms,正常情况下断路器合闸电阻预投入时间为8~12 ms。合闸电阻退出运行时,合闸电流会出现明显的增量跳变。因此,通过观察故障滤波数据,确定合闸电流的最大值对应的采样点。

合闸涌流抑制时间为最大值采样点对应时刻与合闸时间的差值。对2018年12月31日7632断路器的故障异常波形开展频域分析,诊断结果显示:A相合闸涌流抑制时间为12 ms,B相抑制时间为8.4 ms,而C相抑制时间为0 ms。与A,B相合闸电流相比,C相合闸涌流无平滑抑制阶段,合闸涌流明显,谐波含量大于15%,判定其合闸电阻未能发挥作用,初步判断C相合闸电阻未正常工作。

### 3.3 断路器解体检查

基于分段随机FFT的断路器故障在线诊断系统,根据故障录波波形分析结果,给出了故障的初步判断结果,给出了故障定位信息。

为验证上述结论的准确性和诊断策略的有效性,对7632断路器进行返厂解体检查,确定故障点位。

#### 3.3.1 外观检查及气体成分检测

现场检查7632断路器外观无异常,气室压力正常,外部及接地引下线部位没有发现明显的放电点,周围环境无异物、无烧蚀放电后的异常气味,一次设备无明显异常。

对围栏内一次设备本体及外观进行检查,未发现异常。

对7632断路器C相气室进行SF<sub>6</sub>气体分解物检测,检测数据如表1所示。

表1 SF<sub>6</sub>气体分解物检测结果

Tab.1 Test results of SF<sub>6</sub> gas decomposition products

检测成分	检测数据/( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ )	检测结果
SO <sub>2</sub>	0	合格
H <sub>2</sub> S	0	合格
CO	0	合格
HF	0	合格

由表1结果可知,气体含量各项指标均为

0  $\mu\text{L}/\text{L}$ ,检测结果合格,说明断路器内部未发生放电故障。

#### 3.3.2 罐体拆解检查

拆除断路器机构,将灭弧室与罐体分离,屏蔽筒表面清洁,无电弧烧灼痕迹,灭弧室端板无颗粒物等杂质,主断口、并联电容表面光洁,无明显熏黑及放电痕迹,现场拆解如图4所示,说明断路器本体无故障。

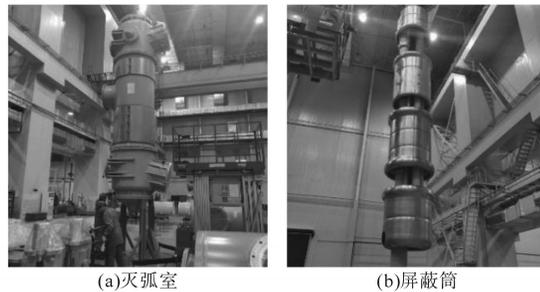


图4 灭弧室拆除及屏蔽筒检查

Fig.4 Removal process of arc extinguishing chamber and inspection for shielding cylinder

#### 3.3.3 主断口拆解检查

对断路器主断口的构成部件进行拆解,对第一级和第二级灭弧室解体检查,发现绝缘筒、并联电容及绝缘拉杆没有电弧烧灼及熏黑痕迹,如图5所示。

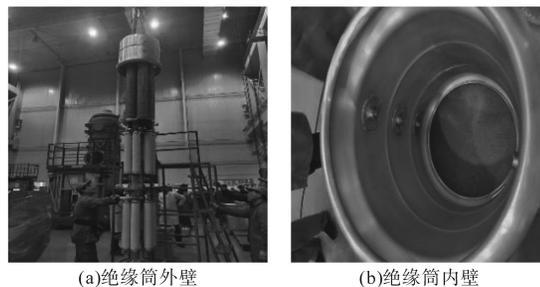


图5 绝缘筒内外部检查

Fig.5 Internal and external inspection of insulating cylinder

由图5可知,主断口正常,性能良好。

#### 3.3.4 合闸电阻及辅助断口检查

合闸电阻及辅助断口并联后与主断口串联,两端安装有屏蔽罩。

合闸电阻及辅助断口外侧表面外观清洁无异常,拆解后合闸电阻整体电阻测试值为1 565  $\Omega$ (符合1 500  $\Omega \pm 5\%$ 标准)<sup>[15]</sup>,对电阻片分解拆除后,合闸电阻第二柱绝缘柱表面存在放电烧蚀的痕迹,对应该位置的第4,5,6,9片合闸电阻内圈出现不同程度的破损,与之相连的电阻连接铜箔与聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene, PTFE)垫片存在熏黑情况,如图6、图7所示。

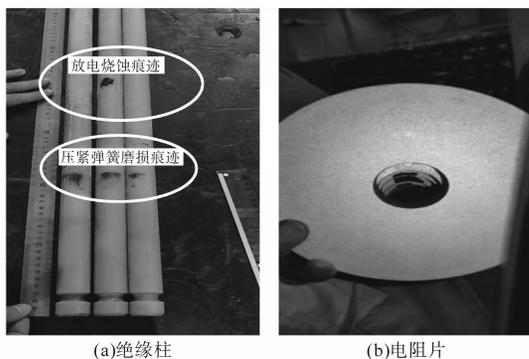


图6 绝缘柱及电阻片烧蚀痕迹

Fig.6 Ablation marks of insulation column and resistor plate

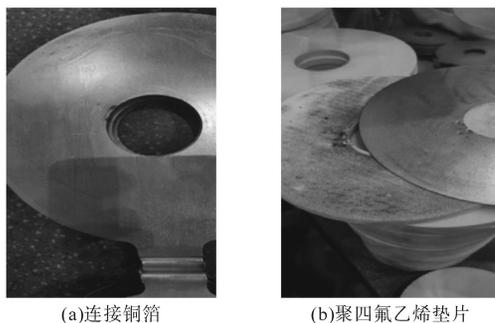


图7 连接铜箔及聚四氟乙烯垫片放电痕迹

Fig.7 Discharge traces of connecting copper foil and PTFE gasket

对用于投入、切除合闸电阻的辅助断口进行解体,发现辅助断口动静触头存在明显电弧灼伤痕迹。这是由于合闸电阻的非正常投入,导致合闸涌流没有得到有效抑制,长时间高幅值的合闸涌流,致使辅助断口的动、静触头的合闸电流过大,烧蚀触头,如图8所示。

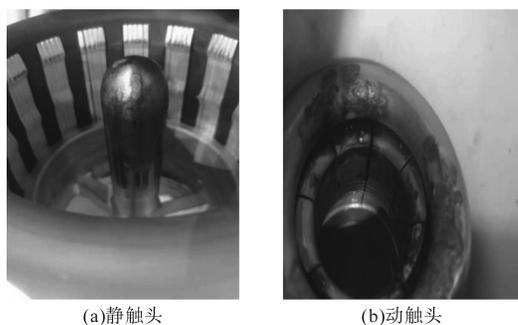


图8 辅助断口动静触头烧灼痕迹

Fig. 8 Burning marks of dynamic and static contacts in auxiliary fracture

### 3.4 故障诊断策略有效性分析

断路器拆解检查结果,表明断路器故障原因及部位与基于分段随机FFT的在线诊断系统预测结果一致,证明了故障诊断策略的有效性。

通过对12月31日灵州换流站交流滤波器场7632断路器C相合闸电流波形进行分析,该断路器合闸波形与B相合闸电阻退出后一段的波

形基本一致,说明7632断路器C相在合闸时,合闸电阻未产生作用,合闸电阻或辅助断口存在异常可能是导致断路器合闸时抑制涌流作用失效的原因。

通过合闸电阻解体情况并对其结构进行建模分析,发现其横向安装于灭弧室,当断路器分合闸工作时,由于振动会导致合闸电阻与穿过其内芯的绝缘柱存在间隙,在合闸瞬间,间隙内会存在电离高温气体,引起电阻片对绝缘柱放电或者连接铜箔对绝缘柱放电形成放电通道,放电通道等效于并联于合闸电阻,将合闸电阻短接,使其无法发挥抑制合闸涌流的作用。

## 4 结论

文中提出了一种基于分段随机FFT的换流站交流滤波器断路器故障诊断方法。该方法可以有效克服传统时域分析方法和整段FFT分析方法所面临的长时间延迟、在线诊断计算量过高等问题,其获取的分合闸涌流频谱信息能够正确反映断路器的异常工作状态,并给出故障定位信息。

利用灵州换流站交流滤波器场7632断路器C相合闸电流波形开展诊断策略有效性分析与验证,结合断路器拆解检查,验证了文中所提故障诊断策略的有效性,为换流站交流滤波器断路器故障的在线诊断提供了可靠的解决方法,具有重要的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 李璟延,杨一鸣,吴方劫.  $\pm 800$  kV 直流输电工程交流滤波器暂态定值计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 562-567.  
Li Jingyan, Yang Yiming, Wu Fangjie. Transient rating calculation of AC filters in  $\pm 800$  kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 562-567.
- [2] 张先伟,彭开军. 特高压直流换流站交流滤波器场布置研究[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 15-18.  
Zhang Xianwei, Peng Kaijun. Study on layout of AC filter switchyard of UHVDC converter station[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 15-18.
- [3] 张晓滨,黄佳敏,伍文俊,等. 弱电网条件下的有源电力滤波器无锁相环控制[J]. 电气传动, 2019, 49(2): 16-22.  
Zhang Xiaobin, Huang Jiamin, Wu Wenjun, et al. Active power filter control strategy without phase-locked loop under weak grid condition[J]. Electric Drive, 2019, 49(2): 16-22.
- [4] 帅海燕,邹必昌. 背靠背变换器的虚拟磁链估计预测控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 28-34.

Shuai Haiyan, Zou Bichang. Research on virtual flux estimation predictive control of back-to-back power converter[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(12):28-34.

[5] 杨新华, 王志强, 黄玉珍, 等. 降低直流磁铁电源纹波用有源滤波器研究[J]. *电气传动*, 2018, 48(7):87-91.

Yang Xinhua, Wang Zhiqiang, Huang Yuzhen, *et al.* Research on active filter for reducing DC magnet power ripple[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(7):87-91.

[6] 颜晟, 苏广宁, 张沛超, 等. 基于故障录波时序信息的电网故障诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(17): 114-119.

Yan Sheng, Su Guangning, Zhang Peichao, *et al.* Fault diagnosis of power grid based on fault recorder sequential information[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(17): 114-119.

[7] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠, 等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. *电机与控制学报*, 2011, 15(10): 43-49.

Huang Jian, Hu Xiaoguang, Gong Yunan, *et al.* Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(10): 43-49.

[8] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于三谱线插值FFT的电力谐波分析算法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 130-136.

Niu Shengsuo, Liang Zhirui, Zhang Jianhua, *et al.* An algorithm for electrical harmonic analysis based on triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 130-136.

[9] 邸彩芸, 赵志, 李明星, 等. 一种基于T型三电平APF的优化无差拍控制[J]. *电气传动*, 2020, 50(10):63-66.

Di Caiyun, Zhao Zhi, Li Mingxing, *et al.* An optimized dead-beat control based on T-type three-level active power filters[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(10):63-66.

[10] Wang Fei, Mi Zengqiang, Su Shi, *et al.* Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters[J]. *Energies*, 2012, 5(5): 1355-1370.

[11] 秦斌, 张俊杰, 王欣, 等. 基于RBF网络的车载超级电容滑模控制系统[J]. *电气传动*, 2018, 48(8):65-69.

Qin Bin, Zhang Junjie, Wang Xin, *et al.* Sliding mode control system of vehicle supercapacitor based on RBF neural-network[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(8):65-69.

[12] Kebriaei H, Araabi B N, Rahimi-Kian A. Shortterm load forecasting with a new nonsymmetric penalty function[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 1817-1825.

[13] He Wuming, Wang Peiliang. Analog circuit fault diagnosis based on RBF neural network optimized by PSO algorithm[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE Computer society. 2010:628-631.

[14] 刘皓明, 朱芳芳, 钱程晨. 收网算法及其在低压配电网潮流优化中的应用[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4): 43-48.

Liu Haoming, Zhu Fangfang, Qian Chengchen. Shrinking net algorithm and its application in power flow optimization of low-voltage distribution system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 43-48.

[15] Chun Yang. FFT Acquisition of periodic, aperiodic, puncture and overlaid code sequences in GPS[C]//ION GPS 2001. Salt Lake City, UT, 2001: 11-14.

收稿日期:2021-04-20

修改稿日期:2021-05-16

(上接第37页)

[8] 陈杰, 刘名凹, 陈新, 等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(7):73-78.

Chen Jie, Liu Mingao, Chen Xin, *et al.* Wireless parallel connection and circulating current suppression technology of inverter based on droop control[J]. *Journal of Electrotechnics*, 2018, 33(7):73-78.

[9] 刘靖宇, 于惠均, 龚星宇, 等. 基于虚拟阻抗的低压微电网功率均分控制策略[J]. *湖南工业大学学报*, 2021, 35(3):49-54.

Liu Jingyu, Yu Huijun, Gong Xingyu, *et al.* Power sharing control strategy of low voltage microgrid based on virtual impedance[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2021, 35(3):49-54.

[10] 周晨. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略及谐波抑制方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.

Zhou Chen. Research on sag control strategy and harmonic suppression method of microgrid based on virtual impedance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

收稿日期:2021-06-30

修改稿日期:2021-12-14