

有载分接开关触头缺陷对切换过程中电磁辐射的影响研究

刘浩宇¹, 臧 谦¹, 方天承², 张志刚³, 代璐健¹, 张 凡²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049; 3. 国网河北省电力有限公司, 石家庄 050021)

摘要: 有载分接开关切换过程会产生电弧, 伴随电弧发展产生的电磁辐射及高频电流信号可用于有载分接开关的在线监测。文中首先开展了 M 型有载分接开关的切换试验, 研究切换过程中的电磁辐射特性与切换时序的对应关系; 然后搭建了模拟触头平台, 研究了动静触头分离过程中的电磁辐射信号的频域特性。接着开展了触头松动与烧蚀的缺陷模拟, 提出了基于 Teager 能量算子联合阈值及时间间隔寻峰算法的电磁辐射信号特征提取方法, 获得了缺陷下燃弧时间和电磁辐射峰值的变化规律。研究表明, M 型有载分接开关切换过程电磁辐射具有 4 阶段特征; 触头分离过程中的高频电流频谱集中在 7.5 MHz 与 10.2 MHz 附近, 电磁辐射信号主要产生于电弧起始和熄灭时刻, 频谱集中在 7.0 MHz 与 10.0 MHz 附近; 触头松动时燃弧时间显著增加, 最长可达 50~60 ms; 触头烧蚀下的燃弧次数伴随触头烧蚀严重程度显著递增。文中的研究结论对分接开关的状态监测具有重要意义。

关键词: 有载分接开关; 切换时序; 高频电流; 电磁辐射; 缺陷模拟

Research on Electromagnetic Radiation Characteristics of On-load Tap Changer Switching under Different Contact States

LIU Haoyu¹, ZANG Qian¹, FANG Tiancheng², ZHANG Zhigang³, DAI Lujian¹, ZHANG Fan²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. National Key Laboratory of Electrical Material and Insulation, Xi'an Jiatong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The switching process of on-load tap changers generates arcs, where the resulting electromagnetic radiation and high frequency current signals can be utilized for online monitoring. This study firstly investigates the electromagnetic radiation characteristics and switching timing extraction methods through tests on a M-type on-load tap changer. A simulation contact platform is then established to analyze the frequency domain characteristics of electromagnetic radiation during the separation of moving and static contacts. Additionally, simulations of loose and ablative contact defects are conducted, leading to the development of a feature extraction method for electromagnetic radiation signals based on the Teager energy operator, combined with threshold and time interval peak detection algorithms. This method reveals the variations in arc duration and electromagnetic radiation peaks under defective conditions. The findings indicate that the electromagnetic radiation during the switching process of the M-type on-load tap changer exhibits four distinct phases. The high frequency current spectrum during contact separation is concentrated around 7.5 MHz and 10.2 MHz, while electromagnetic radiation signals primarily occur at the moments of arc ignition and extinction, with spectra concentrated around 7.0 MHz and 10.0 MHz. Notably, arc duration significantly increases with loose contacts, reaching up to 50 to 60 ms. The number of arcing under contact erosion increases significantly with the severity of contact ablation. The research conclusion of this article is of great significance for the status monitoring of on-load tap changers.

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(5204DY23000R)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.(5204DY23000R).

Key words: on-load tap changers; switching sequence; high frequency current; electromagnetic radiation; fault simulation

0 引言

有载分接开关通过切换开关内部机械动作实现电流转移^[1], 是变压器内故障率最高的部件之一^[2-4]。CIGRE 的统计结果表明有载分接开关是仅次于变压器绕组的第二大容易产生故障的变压器组件^[5]。对有载分接开关进行在线监测及故障诊断具有重要意义^[6]。

有载分接开关的在线监测及状态评估方法可以分为离线与在线监测两类^[7]。离线监测为切换波形或者动态电阻波形的测试, 带电监测以振动信号测量为主。由于分接开关各部件运动会产生振动信号, 因此可以从振动信号中提取切换时序进行诊断^[8]。切换开关分合时除产生振动信号外, 触头间电弧会引起回路电阻的快速变化, 引起高频电压电流振荡。宋冬冬^[9]等人研究了不同拓扑结构有载分接开关的燃弧过程并分析了不同机械结构对燃弧的影响。贾云飞^[10]等人研究了油中工频电弧的电磁辐射特征。J. Seo^[11]等人研究了分接开关切换过程中铁心的高频接地电流。杨涛^[12]等人研究了套管处的电磁辐射特性, 验证了从设备外部捕获电磁辐射的可行性。目前仍缺乏利用电弧的燃弧特性进行切换时序提取及故障分析的相关研究, 未建立切换时序和触头状态与电磁辐射特性间的对应关系。此外, 目前开展的电磁辐射特性研究大多基于正常状态下的切换过程, 缺乏与松动、烧蚀等触头缺陷状态下电磁辐射特性的对比, 对实际工况中有载分接开关的在线监测缺乏直接指导价值。

为了研究有载分接开关切换过程中的电磁辐射特性及缺陷触头对电磁辐射的影响规律, 文中首先在 M 型有载分接开关上开展了带载切换试验, 构建了电磁辐射信号与切换时序的对应关系; 然后搭建了触头分合的模拟试验平台, 研究动静触头分离过程中的高频电流和电磁辐射信号频域特性及产生机理; 最后, 通过模拟试验平台进行了触头松动、烧蚀的缺陷模拟, 提取了缺陷下的高频电流和电磁辐射信号特征。

1 M 型有载分接开关切换过程电磁辐

射特性研究

1.1 试验平台介绍

文中首先在真型有载分接开关上进行了带载切换实验, 获得切换过程中的电磁辐射特性。试验所使用的有载分接开关为贵州长征生产的 M 型油浸组合式有载分接开关, 具体参数见表 1。

表 1 真型有载分接开关参数

项目	参数
最大额定通过电流/A	600
额定频率/Hz	50
连接方式	三相 Y 接(星接)
最大工作分接位置数	带极性转换器, 共 1±19 档

分接开关带载切换的实验回路见图 1。调压器连接试验电源, 将 2 Ω 波纹电阻串联在回路中起限流作用。为研究切换开关动作时的燃弧情况, 将分接选择器各相对应的分接档位短接, 三相出线并联与中性点分别连接至调压器与限流电阻构成试验回路。

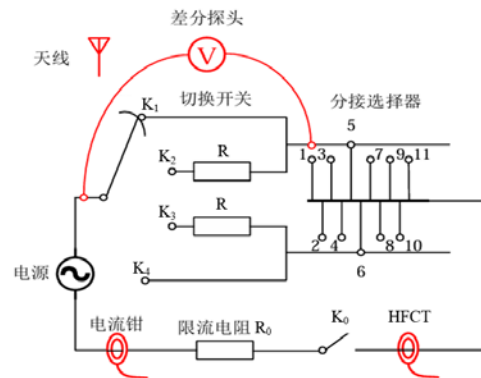


图 1 有载分接开关切换试验回路

Fig. 1 Circuit diagram of the on-load tap changer switch test

采用带宽 50 MHz 的差分电压探头测量切换开关室外壁接线柱与分接选择器抽头间的电压; 工频电流钳测量回路电流; 采用带宽为 1~100 MHz 的 HFCT 测量回路的高频电流; 0~650 MHz 宽频天线固定在距地面高度 1.5 m、距切换开关油室内触头水平距离 0.2 m 处, 用以测量燃弧时释放的电磁辐射信号。使用带宽 100 MHz、最高 2 GSa/s 采样频率的高采样

率示波器采集高频电流、电磁辐射，使用带宽 40 MHz、最高 500 MSa/s 的低采样率示波器采集工频电压和电压、电流。由于第一个过渡电阻的接入会使分接开关的分压由近乎 0 快速提升至 $U \cdot R / (R + R_0)$ ，故将电压信号作为触发信号。

1.2 触头切换时序与燃弧时间

调压器电压 55 V 条件下，分接开关从 5 分接至 6 分接切换时各信号波形见图 2。

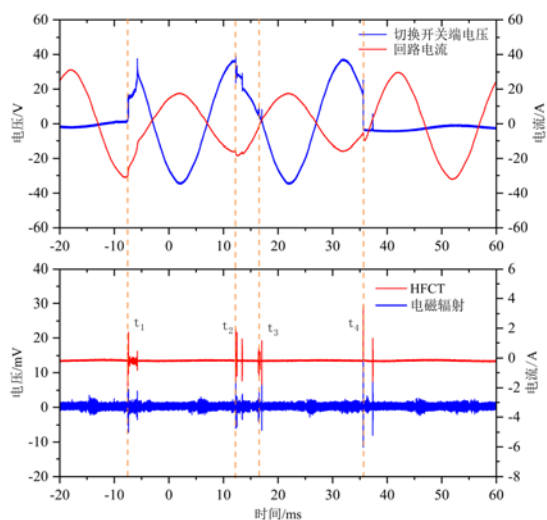


图 2 切换时各信号波形

Fig. 2 Waveform diagrams of various signals during switching

由图 2 可知，-7.5 ms 至 35.7 ms 阶段内为切换开关动作阶段。 t_1 (-7.5 ms)时，动触头与奇数侧主通断触头 K_1 分离，奇数侧过渡电阻接入电路，恢复电压快速上升至 18 V；-5.7 ms 时，电弧熄灭，燃弧时间约为 1.8 ms。 t_2 (12 ms)时，动触头快速靠近 K_3 时，动静触头间电压击穿油隙，产生电弧。电弧在 13.4 ms 时熄灭，此时动触头与 K_3 完全接触，奇偶两侧过渡电阻并联入电路，并联电阻约为 1.32 Ω 。 t_3 (16.5 ms)时，动触头与 K_2 分离，5 分接对应的切换开关奇数侧过渡电阻切出电路，17.1 ms 左右电弧熄灭，燃弧时间约为 0.6 ms。 t_4 (35.7 ms)时，动触头快速靠近 K_4 静触头并产生电弧，电弧最终在动触头与 K_4 接触时熄灭，随后 6 分接对应的切换开关偶数侧过渡电阻被短路，回路电流回升，电流主要流经偶数侧主通断触头 K_4 ，切换开关出线和中性点上的分压降为 0。由上述分析可知，在回路电流 30 A 条件下，有载分接开关切换时动静触头分合均会产生电弧，燃弧时间小于 2 ms。

由高频电流和电磁辐射信号可知，起弧与熄弧时两个信号有较好的同步性，高频电流幅值越高，对应的电磁辐射幅值也越高。因此，提取切换步骤的起始时刻、燃弧时间、信号尖峰数量及幅值，可以实现在线获取有载分接开关的切换时序和各阶段的燃弧特性，判断触头状态。

2 动静触头分离过程电磁辐射的频域特征研究

真型分接开关结构复杂，更换触头难度大，更换触头后带载切换存在安全风险。为了进一步研究切换过程中的电磁辐射特性影响因素，获得缺陷触头对应的电磁辐射特征，设计了触头分离模拟试验平台开展后续模拟实验。

2.1 触头分离的模拟实验平台

触头分离模拟实验装置见图 3。模拟触头装置的油室由有机玻璃制成，为保证模拟触头电极与真型有载分接开关动静触头的等效性，使用与该有载分接开关型号一致的定制触头，触头厚度为 8 mm。定制触头使用纯铜材质以增强通流能力，与真型有载分接开关的主触头材质一致，触头背面与上下两根支撑杆连接，可有效减少动静触头分离过程中的晃动。动触头连接驱动装置，静触头与弹簧连接提供压紧力，保证动静触头闭合后的接触压力。使用过程中油室内充满 25 号变压器油。

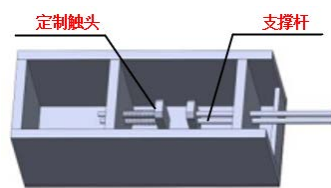


图 3 触头分离模拟实验装置

Fig. 3 Experimental setup to simulate the contact separation

触头分离模拟的实验回路见图 4。自耦调压器为实验回路提供电压，负载电阻 R 限制回路电流。使用多种传感器测量拉弧时的多种物理信号：工频电流、拉弧时回路高频电流信号、触头两端电压信号、拉弧时电磁辐射信号。

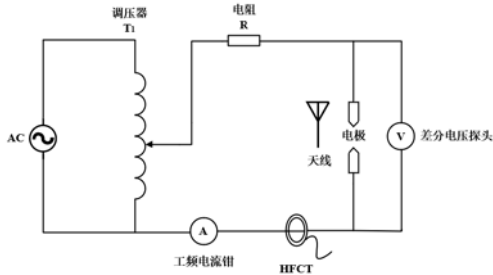


图 4 试验回路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental circuit

2.2 试验结果分析

调压器输出电压 100 V, 回路电阻为 10 Ω , 电流为 10 A 下触头分离过程中的典型工频电压、回路电流波形见图 5。

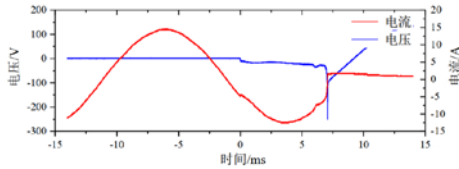


图 5 工频电压与回路电流试验结果图

Fig. 5 Test results graph of power frequency voltage and loop current

由图 5 可知, 0 ms 时触头分离, 动静触头间产生电弧, 触头分离后电压和电流波形产生畸变, 7.0 ms 时弧道电阻及电压骤升, 随后电弧熄灭, 电流降为 0。

上述过程中的高频电流和电磁信号见图 6。由图 6 可知, 0 ms 时, 伴随着动静触头分离, 回路中工频电压电流的突变产生振荡的高频暂态分量, 并向空间辐射电磁波; 在 0~7 ms 时段内, 电弧持续燃烧, 电磁辐射幅值不明显, 高频电流幅值显著高于背景噪声; 7 ms 时刻电弧熄灭, 随着回路电压的骤升和电流的骤降, 电磁辐射及高频电流再次出现显著尖峰。

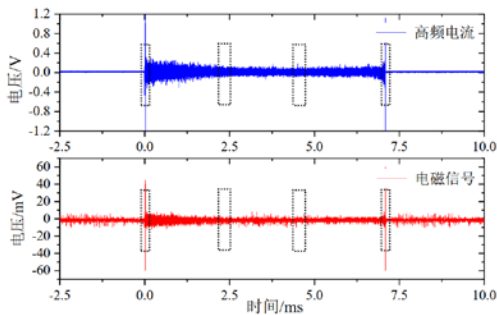
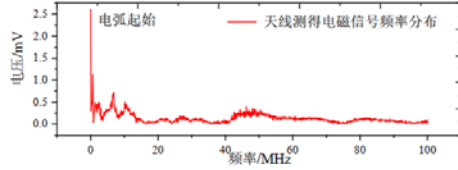
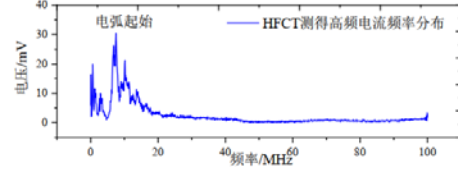


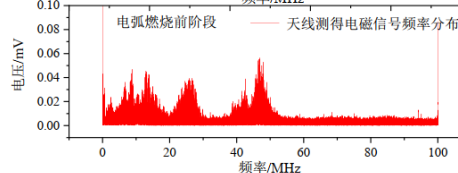
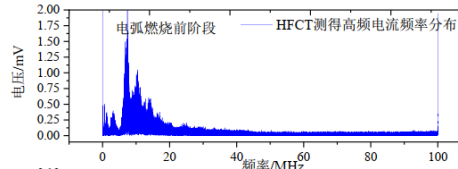
图 6 高频电流与电磁辐射试验结果图

Fig. 6 Test results graph of HFCT and electromagnetic radiation

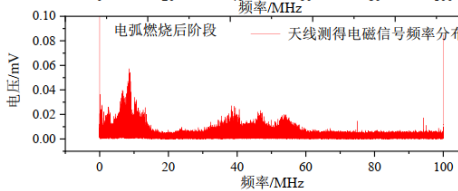
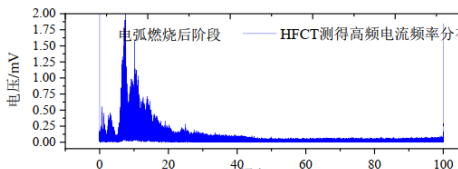
为了研究电弧起始、发展和熄灭时高频电流和电磁辐射信号的频率特性, 在图 6 中分别提取了电弧起始、燃弧 1/3 处、燃弧 2/3 处以及熄灭时的信号进行快速傅里叶分析, 获得的频谱见图 7。



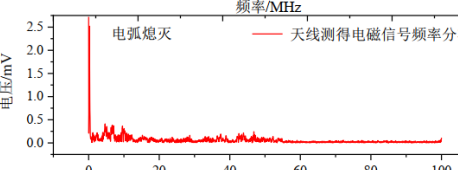
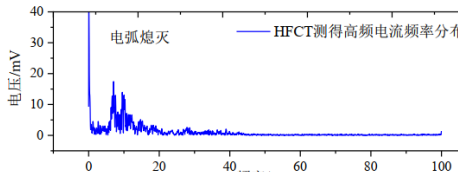
(a) 电弧起始



(b) 燃弧 1/3 处



(c) 电燃弧 2/3 处



(d) 电弧熄灭

图 7 燃弧过程中高频电流和电磁辐射信号的频谱

Fig. 7 Spectrum of the High frequency current and radiation signals during the arc

由图 7 可知,随着电弧发展,高频电流峰值对应的频率基本不变,而电磁辐射信号的频率峰值有一定变化,不同阶段两类信号峰值对应的频率见表 2。

表 2 高频电流与电磁信号频率情况表

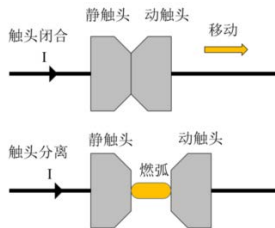
Table 2 Table of high-frequency current and electromagnetic signal frequency characteristics

阶段	高频电流峰值频率/MHz	电磁信号峰值频率/MHz
电弧起始阶段	7.5、10.2	6.8、10.1
燃弧 1/3 处	7.4、10.3	8.7、13.0、26.0、47.0
燃弧 2/3 处	7.5、10.2	8.7、10.3、38.2、46.7
电弧熄灭阶段	7.2、10.0	7.1、9.6

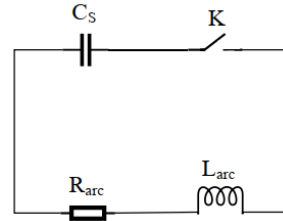
由表 2 知,高频电流的频率几乎不随电弧发展变化,主要集中在 7.5 MHz 与 10.2 MHz 附近,说明电弧自起始至熄灭全过程的放电机理及等效回路变化不大。电磁辐射信号只在电弧起始与熄灭时会有明显峰值,集中在 7.0 MHz 与 10.0 MHz 附近,其余时刻所测到的峰值信号幅值均低于 0.06 mV,受背景噪声干扰较大,说明只有在电弧起始时刻与熄灭时刻才会产生幅值可观的电磁辐射,电弧稳定燃烧时向外辐射的电磁信号强度很低。

2.3 高频电流和电磁辐射频率的理论分析

有载分接开关切换时动静触头分离下高频电流和电磁辐射的产生机理可以用图 8 所示的电弧电流脉冲模型进行解释^[13]。当动静触头分离时,两个电极之间出现局部并相互隔离的带电斑点,电容值为 C_s 。足够高的电荷密度使极间电压迅速升高,击穿带电斑点附近油隙,产生长 l 的放电电弧 I_{arc} 。该模型中电弧产生的自感 L_{arc} 和电弧电阻 R_{arc} 串联,电容 C_s 对 L_{arc} 和 R_{arc} 回路放电。



(a) 触头间电弧放电模型



(b) 触头间电弧放电等效电路

图 8 触头间电弧放电模型及等效电路

Fig. 8 Diagram of arc discharge model between contacts and equivalent circuit

忽略电弧电感时,电磁辐射功率谱在 $\omega = \omega_0$ 时最大^[14],近似为

$$P_{arc}(\omega) \approx \frac{k^2 \dot{I}_{arc}(0)^2 \omega^2 w^2 R_{arc}^2 C_s^2}{l + R_{arc}^2 C_s^2 \omega^2} \quad (1)$$

式(1)中: $\dot{I}_{arc}(0)$ 为初始时刻电弧电流;

$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{arc} C_s}$ 为电弧电路固有频率;

$k = 1/4\pi\epsilon_0 c^2$ 为常数。

由式(1)可知,功率谱的最大值的一半发生在 $\omega = 1/R_{arc} C_s$, 故峰值频率为

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_{arc} C_s} \quad (2)$$

将电弧视作柱形导体,则电弧电阻和触头间电容可表示为:

$$R_{arc} = \rho_{arc} \frac{l}{S} \quad (3)$$

$$C_s = \epsilon \frac{A}{l} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: ρ_{arc} 为电阻率; S 为弧道截面积; ϵ 为油中介电常数,其值为 $2\epsilon_0$; A 为触头有效储能面积。由式(2)-(4)可得电弧放电频率如下

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\epsilon\rho_{arc}} \cdot \frac{S}{A} \quad (5)$$

$$\rho_{arc} = R_{arc} \frac{S}{d} = 5.55\Omega \cdot mm^2 / m \quad (6)$$

由电弧体电阻率可计算, 当有效储能面积为 70 mm^2 时频率理论值约为 11.6 MHz , 与试验实测频率相近。

3 松动缺陷触头分离时的电磁振荡特性

3.1 触头的多点接触模型及特征提取算法

动静触头分离时, 电流通过触头表面的多个弧斑并联流过触头间隙, 见图 9(a)。由于触头表面粗糙度的不同, 见图 9(b), 并联弧斑上的电弧将依次熄灭, 弧斑依次消失时, 回路中将产生振荡的电流并产生电磁辐射。此外, 动静触头可能出现刚脱离接触又因松动、晃动而再次接触, 见图 9(c)。此时, 部分弧斑重新导通, 也会引起回路振荡产生振荡电流和电磁辐射。

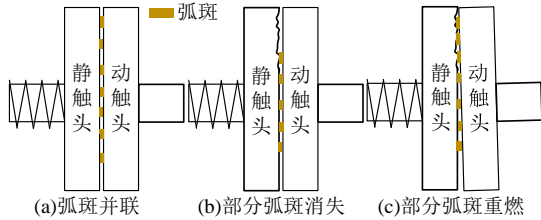


图 9 触头缺陷对应的电磁辐射产生机理

Fig. 9 Generation of electromagnetic radiation of defected contacts

由上述分析可知, 表面粗糙和松动的触头在分离过程中会产生多组高频电流和电磁辐射信号。为了获得上述信号的出现时刻, 采用 Teager 能量算子提取高频电流和电磁辐射信号中快速变化的特征。连续信号 $x(t)$ 的 Teager 能量为^[15]

$$\text{TEO} = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (7)$$

式(7)中: t 为时间; TEO 为信号的 Teager 能量; $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为 $x(t)$ 的一阶导数和二阶导数; 令 $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$, 则(7)可化简为

$$T(t) = A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t) + A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) = A^2 \omega^2 \quad (8)$$

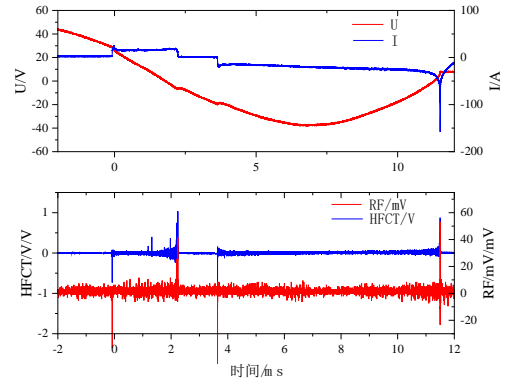
式(8)中, A 和 ω 分别为正弦信号的幅值和角频率。

触头缺陷下的典型波形见图 10(a)。由高频电流波形可知, 可将触头分离时起至最终熄弧分为两个燃弧阶段: $0 \sim 2 \text{ ms}$ 和 $3.5 \sim 11.5 \text{ ms}$ 。上述时间段的起始和结束时, 电压或电流突变时存在明显的高频电流和电磁辐射, 其余时刻信

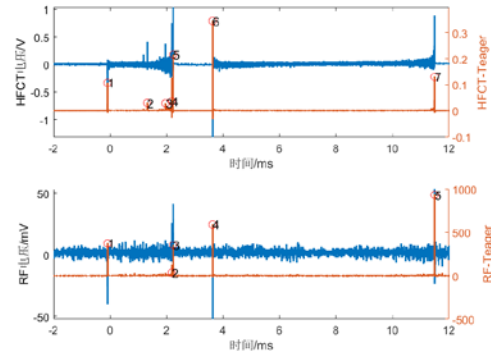
号幅值较低。高频电流和电磁辐射信号经 TEO 计算的特征见图 10(b), 触头分合时向外辐射的电磁信号被显著放大。进一步使用基于阈值和时间间隔的寻峰算法确定峰值 $A_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 及对应的时刻 $T_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。其中, 阈值为 TEO 中的噪声信号幅值的 50 倍, 最小时间间隔为 $50 \mu\text{s}$, 燃弧时间为

$$T = T_n - T_1 \quad (9)$$

由计算结果可知, 在燃弧的第一阶段中, 高频电流和电磁辐射信号中分别存在 5 个和 3 个峰值; 燃弧的第二阶段中, 高频电流和电磁辐射均产生 2 个峰值, 出现在电弧起始和结束时。由式(9)计算的燃弧时间为 11.6 ms 。



(a) 工频电压电流及电磁振荡



(b) 电磁辐射信号及其 TEO

图 10 缺陷触头的电磁振荡特征

Fig. 10 Electromagnetic oscillation characteristics of defected contacts

3.2 触头松动

为了能对动静触头碰撞过程起到一定的缓冲作用, 进而延长触头寿命, 动静触头尾部均安装有弹簧基座, 包括螺旋弹簧与金属垫片弹簧。在弹簧松弛或是尾部紧固件松脱时, 触头在分离过程中往往难以维持竖直状态, 影响正

常分离，动静触头可能会出现刚脱离接触状态又发生倾斜而再次接触的情况。

为了模拟触头松动故障，文中制作了直径更小的触头尾部支撑杆用以模拟静触头松动，并保持动触头支撑强度不变。由于支撑杆与油室结构有较大缝隙，支撑杆在穿过油室基座时触头会因重力而向下倾斜，见图 11。当支撑杆直径越小，触头分离时倾斜程度更大：直径 5 mm 的支撑杆最大倾斜角度为 4.74°，直径 4 mm 的支撑杆最大倾斜角度为 10.87°。

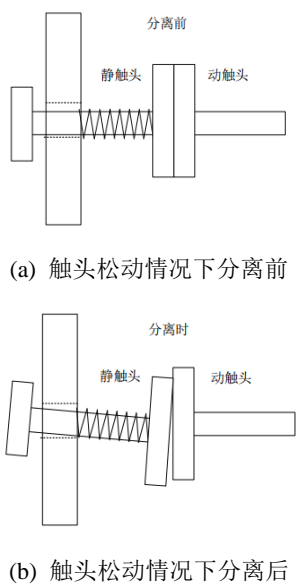


图 11 触头松动故障示意图

Fig. 11 Schematic diagram of loose contact fault

在触头松动情况下，电弧在电流过零点处不熄灭的现象更加显著，见图 12。

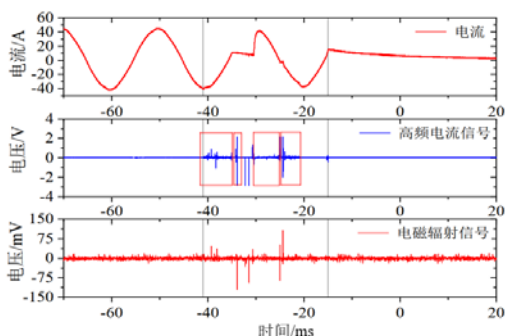


图 12 触头松动下的波形

Fig. 12 Waveform diagram under loose contact

由图 12 可知，触头在电流相位 260°时初次分离，电弧在电流两次过零点时熄灭后复燃。由于燃弧过程中几乎无幅值显著电磁辐射，电磁辐射信号在时域上仅表现为彼此孤立的尖峰，而高频电流信号在燃弧过程中依旧存在幅

值，因此通过高频电流可以清晰分辨电弧的燃弧与熄灭的阶段。为了准确统计燃弧次数，将燃弧时间大于 0.05 ms 且与相邻燃弧间隔时间大于 0.05 ms 的视为一次燃弧，因此，此波形中有 4 次燃弧，如图中红框部分，其余时间段为触头因松动倾斜而再次接触，表现为无高频电流与电磁辐射产生。

在触头安装不同直径的支撑杆情况下，燃弧次数随燃弧时间变化见图 13。

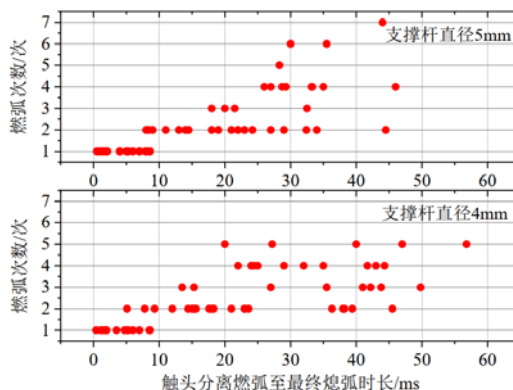


图 13 不同直径支撑杆下触头间燃弧次数随燃弧时间变化图

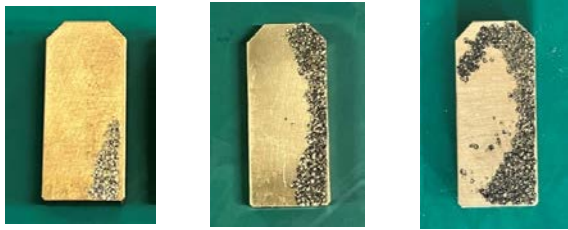
Fig. 13 Diagram of arc count vs. arc duration for contacts under different diameter support rods

由图 13 可知，随着燃弧时间的增加，燃弧次数也逐渐增加，说明分离过程中动静触头多次碰撞、接触，且随着燃弧时间增加触头再次接触的概率增大，说明触头松动情况下更不容易熄弧。在触头松动情况下，燃弧时间大于 40 ms 的次数显著增加，部分可达 50~60 ms，电流多次过零点不熄弧。取 40 ms 及以上燃弧时长占比作为判据，通过高频电流及电磁辐射信号可实现有载分接开关触头松动缺陷的在线判断。

3.3 触头烧蚀

100 V/30 A 条件下，不同分离次数对应的触头表面见图 14。由图 14 可知，触头分离 100 次后，触头右下部分出现明显的烧灼痕迹，表面凹凸不平，说明动静触头初期分离时弧斑主要位于触头的右下角。触头分离 500 次后，触头烧灼痕迹布满了触头右边缘，表明触头分离时放电点会集中在已有的放电点附近以及触头边缘处。此时表面粗糙度增大，多次放电的熔池互相叠加，触头表面粗糙度增大。触头分离

1000 次后, 烧蚀痕迹由触头上、下边缘向触头左侧迁移, 触头中央烧蚀痕迹较轻。



(a) 分离 100 次 (轻度烧蚀) (b) 分离 500 次 (中度烧蚀) (c) 分离 1000 次 (高度烧蚀)

图 14 不同分离次数的触头表面

Fig. 14 Contacts' surface with different separation times

不同烧蚀程度下提取的电磁辐射信号峰值数量与燃弧时间、峰值数量占比见图 15。由图 15 可知, 随烧蚀程度的增加, 电弧过零点熄灭的概率降低, 燃弧时间超过 10 ms 的概率越大。轻度烧蚀、中度烧蚀与高度烧蚀下燃弧时间大于 10 ms 的占比依次为 1.6%、4.7%、12.0%。此外, 在电磁辐射尖峰个数分布上, 轻度烧蚀、中度烧蚀与高度烧蚀下电磁辐射峰大于 2 个的占比依次为 26.5%、53.8%、65.2%, 中度烧蚀下占比显著提高, 因此可以将触头分离过程中电磁辐射尖峰的分布作为触头烧蚀的判据。

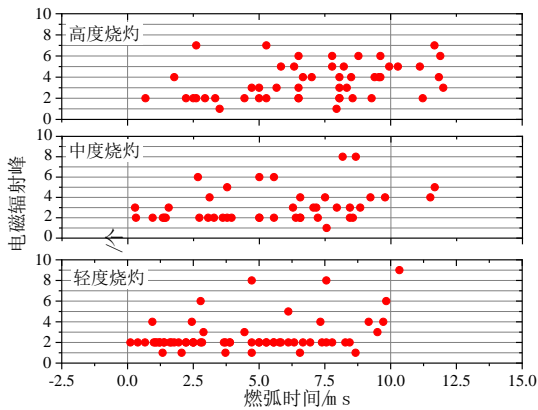


图 15 不同烧蚀程度下电磁辐射信号峰值数量与燃弧时间

Fig. 15 The peak number of electromagnetic radiation signals to the arcing time under different ablations

4 结论

文中基于真型有载分接开关和模拟试验平台研究了切换开关触头分离过程中高频电流和电磁辐射信号的产生机理, 并在触头正常与松动、烧蚀缺陷下获得了高频电流和电磁辐射的

时频域信号特征, 得到的主要结论有:

1)M 型有载分接开关实测结果表明, 在单次切换过程中主要存在 4 次燃弧及熄弧过程, 其产生机理分为动静触头分离时续流燃弧及动静触头快速靠近时击穿油隙两种。高频电流及电磁辐射信号对应了触头的分合, 可用于提取切换时序。

2)模拟触头平台的试验结果表明, 高频电流的频率几乎不随电弧发展变化, 主要集中在 7.5 MHz 与 10.2MHz 附近, 且电弧发展过程中放电机理及等效回路变化不大。电磁辐射信号只有在电弧起始与熄灭时刻有显著峰值, 集中在 7.0 MHz 与 10.0 MHz 附近, 与理论计算值接近。

3)当触头存在松动缺陷时, 触头间出现多次燃弧且燃弧时间大于 40 ms 的次数显著增加, 且高频电流与电磁辐射信号存在明显的尖峰簇, 可作为触头松动缺陷的判据。当触头存在烧蚀缺陷时, 燃弧时间超过 10 ms 的概率增加。当烧蚀程度达中度时, 触头分离过程中大部分燃弧次数超过 2 次, 可作为触头烧蚀的判据, 实现触头烧蚀的在线监测。

参考文献:

[1] 陈羽, 吕玮, 孙超, 等. 一种新型分体式换流变压器有载分接开关[J]. 浙江电力, 2024, 43(1): 91-98.
CHEN Yu, LYU Wei, SUN Chao, et al. A novel split type on-load tap changer for converter transformers[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(1): 91-98.

[2] 李小双. 有载调压变压器分接开关机械故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
LI Xiaoshuang. Research on mechanical fault diagnosis of on-load tap-changer transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[3] 王蕾, 袁洪跃, 王季琴, 等. 变压器有载分接开关技术和故障诊断发展现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 171-180.
WANG Lei, YUAN Hongyue, WANG Jiqin, et al. Development status and prospect of transformer on-load tap-changer technology and fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 171-180.

- [4] 赵希洋, 孟腾龙, 陆洪建, 等. 一起换流变压器有载分接开关故障分析及处理[J]. 宁夏电力, 2020(3): 57-61.
ZHAO Xiyang, MENG Tenglong, LU Hongjian, et al. Analysis and treatment of the fault of on-load tap-changers of transformer[J]. Ningxia Electric Power, 2020(3): 57-61.
- [5] TENBOHLEN S, JAGERS J, VAHIDI F. Standardized survey of transformer reliability on behalf of CIGRE WG A2.37[C]/2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 593-596.
- [6] 高树国, 岳国良, 周 聪, 等. 应用改进 Hilbert-Huang 变换下的 Volterra 模型诊断 OLTC 机械故障[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 173-180.
GAO Shuguo, YUE Guoliang, ZHOU Cong, et al. Applying Hilbert-Huang transform of the volterra model to diagnosing mechanical fault for on-load tap changer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 173-180.
- [7] 韩 帅, 高 飞, 王博闻, 等. 基于 Mel 频谱滤波和 CNN 的有载分接开关可听声辨识方法[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3609-3617.
HAN Shuai, GAO Fei, WANG Bowen, et al. Audible sound identification of on load tap changer based on Mel spectrum filtering and CNN[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3609-3617.
- [8] 陈文通, 盛 骏, 钱 肖, 等. 基于相空间张量分解的有载分接开关故障诊断[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 248-255.
CHEN Wentong, SHENG Jun, QIAN Xiao, et al. Intelligent diagnosis of mechanical fault of on-load tap-changer based on tensor decomposition in phase space[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(4): 248-255.
- [9] 宋冬冬, 丁来伟, 董 彪, 等. 不同拓扑结构有载分接开关燃弧过程实验分析与研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(12): 55-62.
SONG Dongdong, DING Laiwei, DONG Biao, et al. Experiment analysis and research on the arc process of different topology on load tap-changer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(12): 55-62.
- [10] 贾云飞, 贾双瑞, 罗 迅, 等. 变压器内部电弧故障快速检测方法研究与对比[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2158-2165.
JIA Yunfei, JIA Shuangrui, LUO Xun, et al. Research and comparison on rapid detection methods of transformer internal arc fault[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2158-2165.
- [11] SEO J, MA Hui, SAHA T K. A joint vibration and arcing measurement system for online condition monitoring of onload tap changer of the power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1031-1038.
- [12] 杨 涛, 吴建蓉, 朱 勇, 等. 暂态冲击作用下 GIS 套管电磁辐射特性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 176-185.
YANG Tao, WU Jianrong, ZHU Yong, et al. Research on electromagnetic radiation characteristics of GIS bushing under transient impulse[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 176-185.
- [13] DAMAS M C, ROBISCOE R T. Detection of radio-frequency signals emitted by an arc discharge[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(2): 566-574.
- [14] 颜 馨. 基于 Hilbert 分形天线的弓网电弧电磁辐射特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YAN Xin. Research on electromagnetic radiation of pantograph-catenary arc based on Hilbert curve fractal antenna[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [15] 徐振洋, 莫宏毅, 包 松, 等. 基于 VMD-Teager 的露天边坡爆破振动信号能量特征研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 77-88.
XU Zhenyang, MO Hongyi, BAO Song, et al. Energy characteristics of blast vibration signals of open-pit slope based on VMD-Teager[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(7): 77-88.
- 刘浩宇(1993—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事变压器设备状态感知与智能评估技术研究(E-mail: 1102132065@qq.com)。