

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210321

基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究

孙华¹, 王宾²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 电力系统及大型发电设备控制和仿真
国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘要: 高压真空断路器灭弧性能的退化易导致断路器触头动作过程中持续性电弧的产生, 将会破坏触头表面粗糙度, 导致滞后分合闸时间, 严重时会引起击穿爆炸事故。因此, 亟待开展高压真空断路器灭弧性能监测研究。现有对高压真空断路器灭弧性能的研究主要采用对灭弧室真空度的测量, 但是存在测量周期较长、无法保证气密性等问题。通过分析灭弧室内熄弧原理, 发现根据介质恢复时电弧电阻对电弧电流衰减特性的影响可以反演灭弧室内的熄弧水平。据此提取电弧电流趋势项作为灭弧能力的表征量, 提出了一种仅基于电气量的高压真空断路器灭弧能力在线检测方法。该方法具有能够快速实时监测及测量手段安全的优势, 现场实测数据及数字仿真验证了其有效性。

关键词: 高压真空断路器; 灭弧室; 电弧电流; 在线检测; 电气量

Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current

SUN Hua¹, WANG Bin²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Large-scale Generation Equipment
(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: The degradation of the arc extinguishing performance of high-voltage vacuum circuit breakers can easily lead to the generation of continuous arcs, damage to the contact surface and delay of the opening and closing time. In severe cases, a breakdown and explosion may occur. Therefore, research on monitoring the arc extinguishing performance of high voltage vacuum circuit breakers is important. Existing research methods for the arc extinguishing performance of high voltage vacuum circuit breakers consist mainly of measuring the vacuum degree of the arc extinguishing chamber, but there are problems such as long measurement period and inability to guarantee air tightness. The arc extinguishing principle in the arc extinguishing chamber is analyzed. Obtaining the arc extinguishing level in the chamber can be inverted using the influence of the arc resistance on the attenuation characteristics of the arc current when the medium is restored. Using this, the arc current trend item is extracted as the representative quantity of the arc extinguishing ability. An online detection method for the arc extinguishing ability of the high voltage vacuum circuit breaker based only on electrical quantities is proposed. This has the advantages of fast real-time monitoring and safety of measurement. The effectiveness of the method is verified by field measured data and digital simulation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077116).

Key words: high voltage vacuum circuit breaker; vacuum interrupter; arc current; on-line inspection; electrical quantity

0 引言

随着配网自动化系统的快速发展, 馈线中越来

越多地使用断路器作为开关设备, 并且基于断路器动作延时级差配合实现对故障区段的选择性隔离^[1-3]。此时一旦断路器灭弧性能不佳, 无法熄灭持续性电弧, 将滞后分合闸时间^[4], 严重威胁配电网运行安全, 因此亟待开展基于电气量的断路器灭弧能力在线检测技术研究。

现有对真空断路器灭弧室的检测方法一般采

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077116); 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室自主课题资助(SKLD21M09)

用对灭弧室内真空度的量测, 分为在线检测与离线检测两类。离线检测的特点在于可以定期检查与维护, 常见的主要方法有: 观察法^[4-5], 工频耐压法^[6-8], 磁控放电法^[9-10]。观察法原理为: 玻璃外壳随灭弧室内真空度降低其表面颜色由于电弧燃烧及器件氧化而发生变化, 在灭弧室仍具备良好真空度时其内部明亮, 而当严重受损时其内部灰暗; 该方法虽然简单直接, 但仅限于检测玻璃钢真空灭弧室。工频耐压法的原理是固定触头两端间距后通过逐渐增大极间电压, 判断能在固定时间内不被击穿认为真空度合格; 该方法只能定性判断真空度上限, 不适用于临界状态的灭弧室性能检测。磁控放电法通过向灭弧室施加电场和磁场, 检测离子电流与真空度的关系, 判断真空度的大小; 然而该方法在放电后灭弧室内有气体交换过程, 不能循环重复测量, 导致检测过程周期时长, 且存在诱发断路器接地或短路故障的风险。

为了提高供电可靠性和减少时间, 常见的在线检测方法有: 光电变化法^[11-12]、屏蔽电位法^[13-15]等。光电变换法利用电光效应, 基于传感器在不同电场中的光学性能变化判别真空状态; 该方法传感器元件成本高, 操作复杂且工作稳定性较差。屏蔽电位法利用正常情况下, 灭弧室屏蔽罩无静电荷附着, 但随着真空度绝缘度的降低, 屏蔽罩的直流电位将随之发生改变的原理, 通过测量屏蔽罩累积电荷判别真空度; 但该方法在实现屏蔽罩电气连接时无法保证灭弧室的气密性, 导致测量精度较低。

针对上述问题, 本文摒弃以断路器灭弧室真空度来表征断路器灭弧能力的传统做法, 基于弧隙能量平衡熄弧原理, 以介质恢复时电弧电阻对电弧电流衰减特性的影响来反演灭弧室内熄弧水平, 提出了一种仅基于电气量的真空断路器灭弧能力在线检测方法。

1 灭弧室灭弧能力的表征

1.1 灭弧机理分析

高压真空断路器中核心部件为真空灭弧室^[16], 又名真空开关管, 如图 1 所示, 主要包括气密绝缘外壳、导电回路、屏蔽系统、波纹管等部件。

其中, 波纹管主要承担电极能在一定范围内运动和长期保持高真空的作用, 保证真空灭弧室的剩余寿命。在真空断路器分合闸过程中, 波纹管受到伸缩作用, 而且波纹管内外存在气压差时, 表面应力发生改变, 同时, 其在切合短路电流时, 导电杆的余热将传递至波纹管上, 高温会影响波纹管的疲

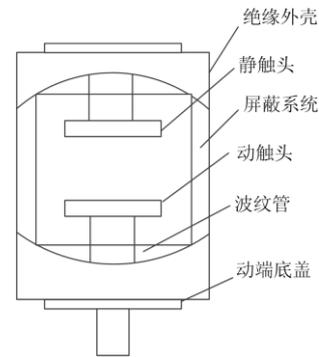


图 1 真空灭弧室结构图

Fig. 1 Structure drawing of vacuum arc extinguishing chamber

劳程度。屏蔽系统能够吸收一部分电弧能量, 有利于提高触头间介质恢复强度, 但长时间使用后, 其冷凝电弧的生成物将附着在屏蔽罩表面, 将会影响其灭弧水平。可见, 灭弧室的灭弧工况与温度气压密切相关。

为了进一步探寻灭弧室内温度气压对灭弧能力的影响, 分析灭弧的机理如下。对于稳定燃烧的电弧, 其输入能量与耗散能量相等^[17]; 一旦耗散能量大于输入能量时, 电弧将逐渐趋于熄灭。单位时间单位体积下, 散热形式包括三种形式: 传导散热 P_T 、辐射散热 P_S 、对流散热 P_K , 电弧的能量平衡方程表达式^[18]为

$$P = P_T + P_S + P_K \quad (1)$$

式中, P 为单位体积下电弧的输入能量。

1) 传导散热 P_T

$$P_T = \frac{2\pi\lambda |T - T_0|}{\ln \frac{r_0}{r}} \quad (2)$$

式中: λ 为平均热导率; T 为灭弧室气体温度; T_0 为弧柱表面温度; r_0 为电弧轴心半径; r 表示距离电弧轴心半径 r 处。由式(2)可见, 当灭弧室内温度升高, 温差绝对值减小, 其传导散热值减小。

2) 辐射散热 P_S

$$P_S = B \frac{P_2 - P_1}{T} e^{\frac{E_m}{kT}} \quad (3)$$

式中: B 为辐射散热系数, 其值为由实验获取的常数; P_1 为灭弧室内气压; P_2 为灭弧室的大气压(pa); E_m 为激发粒子的高能统计值。断路器操作过程中, 灭弧室中可能会发生放体、吸气、扩散、渗透、漏气等现象, 由于灭弧室内外存在压力差, 空气会通过细微小孔慢慢进入灭弧室引起内压上升。根据式(3)可知辐射散热表达式为温度和气压的函数, 内压

上升引起辐射散热降低。

3) 对流散热 P_K

$$P_K = 0.322d^2v \ln \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

式中： v 为气体流动速度； d 为电弧直径。对流散热受气体流动速度影响较大，真空灭弧室虽然不具备 SF_6 灭弧室中的气体吹弧功能，但其触头产生的横向磁场同样对弧道电子的扩散起到积极作用^[19]。

综上所述，当灭弧室内温度较高时，意味着波纹管疲劳程度较高，不利于传导散热；气压较高时，灭弧室内外压差不利于辐射散热；灭弧室触头受损严重则不利于对流散热。可见，灭弧室内主要器件受损劣化将直接影响灭弧室内电弧的散热性。

1.2 灭弧能力的量化表征

电弧的输入能量与耗散能量平衡时维持稳定燃烧，且电弧的熄灭过程与其散热性密切相关。因此，本文接下来将从电气量角度探寻可量化表征断路器灭弧室灭弧能力的特征量，分析如下。

采用三段式电弧模型模拟灭弧室的燃弧-熄弧特性^[20]，其核心 Mayr 电弧模型基于能量平衡理论，描述了电弧的弧隙耗散功率(散热性、熄弧特性)与电弧间隙输入功率(来自外施电源)之间的函数关系，如式(5)所示。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) \quad (5)$$

式中： g 为电弧电导； τ 为电弧时间常数； P 为单位长度弧隙输入功率； P_0 为单位长度弧隙耗散功率。

与式(1)相同，式(5)中 P_0 同样为式(2)一式(4)的和，其值受温度、气压影响。温度升高气压变大使耗散功率 P_0 减小， dg/dt 的正负号可表征电弧电阻增大或者减小的变化趋势。当耗散功率 P_0 小于输入功率 P 时， $dg/dt > 0$ ，说明电弧电阻值呈减小趋势，可见，电弧的散热性可由电弧电阻值的变化趋势来量化表示。但断路器内电弧电阻与电弧电压无法直接测量，可量测的只有测量点电压和电流，因此接下来分析量测点和断路器内部电气量之间的关系。

以断路器所在交流滤波器支路为例^[21]，绘制电弧等值高频振荡回路，如图 2 所示。

图中： R 为电源内阻、线路电阻和回路损耗电阻之和； U_a 为电弧电阻电源，由母线侧发出； L 、 C 分别为回路等值电感、电容，其值大小主要取决于所在交流滤波器支路； R_a 为非线性电弧电阻。

根据基尔霍夫定律，将电阻电压值、回路等效电感电压、回路等效电容电压、动态电阻电压分别用 $u_R(t)$ 、 $u_L(t)$ 、 $u_C(t)$ 、 $u_{Ra}(t)$ 表示，可列写回路电压方程：

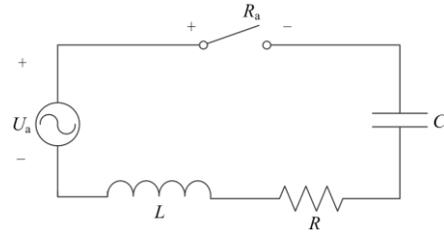


图 2 电弧电流衰减振荡回路

Fig. 2 Arc current attenuation oscillating loop

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + (R + R_a(t))C \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = e(t) \quad (6)$$

当断口间隙刚被击穿，电弧尚未完全燃烧，处于起弧阶段时，电弧阻值较大，有 $[(R+R_{arc}(t))/(2L)]^2 > 1/(LC)$ ，式(6)所描述系统回路将呈现过阻尼状态，一旦电弧进入稳态燃烧阶段，电弧电阻值将明显减小，此时系统将从过阻尼状态过渡到欠阻尼状态。由于 $i(t) = Cdu/dt$ ，式(6)经拉普拉斯变换最终得电流表达式，如式(7)所示。

$$i(t) = I_a \left\{ \left[\frac{\omega_0}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega t) - \cos \varphi \cos(\omega_0 t) \right] e^{-\alpha t} + \cos(\omega t + \varphi) \right\} \quad (7)$$

式中： I_a 为稳态初始电流幅值； ω_0 为振荡频率； α 为衰减系数，其定义为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R + R_a(t)}{2L} \right)^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{R + R_a(t)}{2L} \quad (9)$$

分析式(6)一式(9)可见，电弧电流 $i(t)$ 的衰减特性主要取决于 $(R+R_a(t))/(2L)$ ，由于同一系统 R 、 L 固定，可见 $i(t)$ 衰减受电弧电阻值 R_a 的直接影响，如图 3 所示，并且结合如图 4 所示实际录波数据可见^[22]，仿真与实际燃弧波形在起弧时刻都有迅速起弧上升趋势，并在第一次过零后衰减呈稳态振荡状态，经皮尔逊相关系数计算后得出两组电流波形相似系数为 0.886，即呈现高度相关性，证明了本文仿真结果的较高准确性。

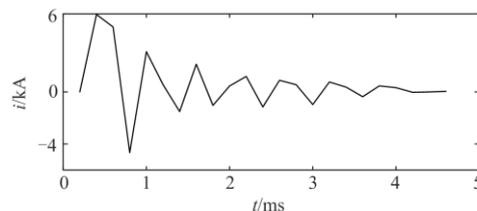


图 3 高频电弧电流

Fig. 3 High frequency arc current

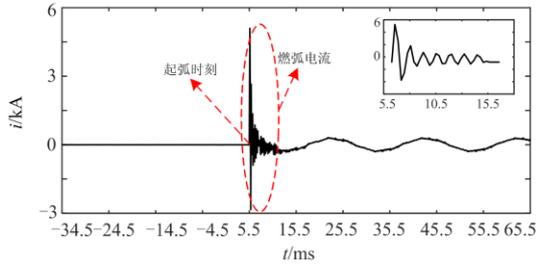


图 4 实际燃弧故障录波数据

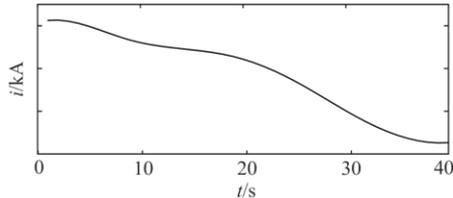
Fig. 4 Recorded data of actual arc fault

本文基于“控制论”电弧模型^[23-24], 利用不同弧长模拟弧隙散热不再恒定的工况, 仿真不同工况下过零时电弧电阻值的不同。记高频电弧电流第一次过零后峰值为 i_p , 对应过零时电弧阻值为 R_p 。由表 1 可见, 随着弧隙长度的增加, 电弧阻值增大会加快电弧电流的衰减。

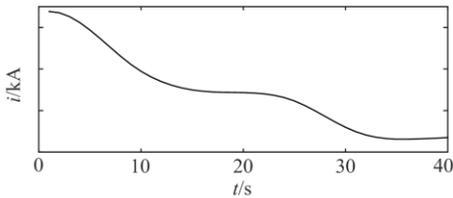
表 1 不同弧长下 R_p 、 i_p Table 1 R_p , i_p for different arc lengths

| l/cm | $R_p/k\Omega$ | i_p/kA |
|--------|---------------|----------|
| 15 | 0.52 | 1.65 |
| 25 | 0.59 | 1.18 |
| 55 | 0.71 | 0.91 |

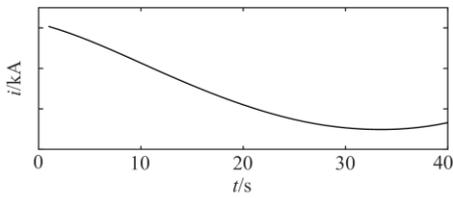
综上, 电弧电流衰减趋势项可以描述灭弧室熄弧能力, 根据熄弧阻值的不同变化, 归一化后电弧电流衰减趋势项的形态一般有 3 种, 如图 5 所示。灭弧



(a) 灭弧能力严重缺陷



(b) 灭弧能力劣化状态



(c) 灭弧能力正常状态

图 5 不同状态下电弧电流趋势项形态

Fig. 5 Trend term of arc current in different states

室性能正常时如图 5(c)所示, 而随着熄弧阻值的减小, 电弧电流衰减趋势项将逐渐向图 5(b)、5(a)劣化转变。因此, 在原有采样数据基础上, 有效甄别出电弧电流衰减趋势状态是后续判断灭弧室灭弧性能是否优良的关键。

2 检测方法

2.1 趋势项提取

首先是对于电弧电流趋势项的提取, 本文采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)实现, EMD 可以根据信号的局部尺度特征自适应地将其逐一分解为本征项和趋势项, EMD 具体分解实现过程详见文献[25], 原始信号经 EMD 分解后可表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + r_n(t) \quad (10)$$

式中: c_k 为本征项, 为平稳信号, 分别包含不同频段及不同时间尺度内的信号成分; r_n 为残余分量, 表示信号趋势。

对某支路断路器分闸时的电弧电流数据进行 EMD 分解, 即可得到原始电流信号的趋势项, 结果如图 6 所示。图 6 中, signal 为原始信号, imf 为各本征项, res. 为电弧电流趋势项。

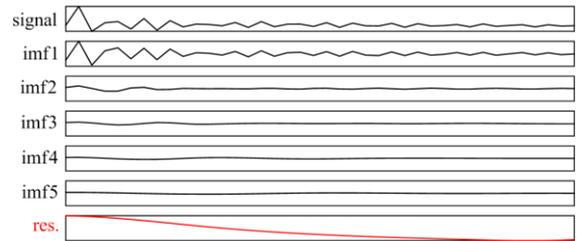


图 6 EMD 分解

Fig. 6 Empirical mode decomposition

2.2 检测原理及流程

得到电流趋势项后, 本文采用均值偏移聚类算法实现对电流趋势项的检测分析。K-means 聚类算法原理为: 将数据集中的个体通过不断迭代直到满足相应距离函数或迭代要求后归类到不同聚类中心。本文为减小计算量, 将单条趋势项用一个积分值表示, 简化聚类过程, 最终通过聚类后点群个数大于 1 时认为出现异常。

采用 EMD 分解得到电弧电流趋势项后, 确定趋势项采样点个数, 计算趋势项采样点积分值, 这里引入一阶累加算法代替积分值计算。将若干计算后的积分值进行最短距离迭代计算后实现聚类, 具体实现过程见文献[26]。

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - C_{ij})^2} \quad (11)$$

式中： x_i 为积分值； C_{ij} 为聚类中心点值，其值在聚类过程中不断更新； m 为维度，本文取 1。当聚类过程结束后，当出现明显一个以上聚类中心，则认为灭弧室性能出现异常，需要停电检修。

具体检测过程如图 7 所示。

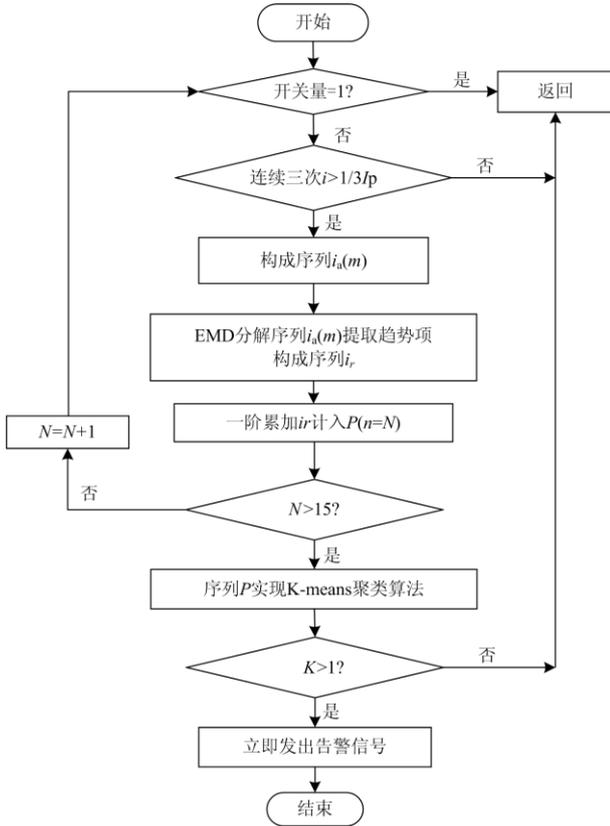


图 7 灭弧能力检测流程图

Fig. 7 Flow chart of arc extinguishing capability detection

步骤 1：以合闸过程为例，合闸过程中，触头未完全闭合，此时断路器所在支路开关量记为 0，触头完全闭合，开关量记为 1，额定负荷电流记为 I_p 。实时监测支路开关量为 1 前电流瞬时值 i ，当连续三个 i 采样值均大于 kI_p 时，初步检测到电弧电流，进入步骤 2，否则继续实时监测电流瞬时值。其中 k 取值小于 1，为了保证灵敏性，建议取值 $k=1/3$ 。

步骤 2：检测到 i 大于 kI_p 瞬间对应采样点为电弧电流采样初值，在之后时窗内取 m 个采样点构成电弧电流序列 $i_a(m)$ ， m 建议取值大于 30(整个燃弧时长约为 3~5 ms)，进入步骤 3。

步骤 3：基于式(11)对序列 $i_a(m)$ 进行 EMD 分解，提取分解得到的 res_i 记为电弧电流趋势项序列 i_r ，将 i_r 序列进行一阶累加计算，计算结果的最终数值存

入序列 $P(n=N)$ 中，记为 $P(1)$ ，随后实时等待监测下次断路器合闸过程，循环步骤 1—4，直至 $n=N$ 结束，构成检测对象 P 序列。为了尽量减小步骤 5 中检测算法因小样本对聚类效果的影响，建议 $N>15$ ，进入步骤 4。

步骤 4：基于式(12)对序列 P 进行 K-means 聚类，聚类过程结束后，聚类中心 K 明显存在两个或以上时，则需要立即发出严重告警信号。

3 算法验证

3.1 现场数据验证

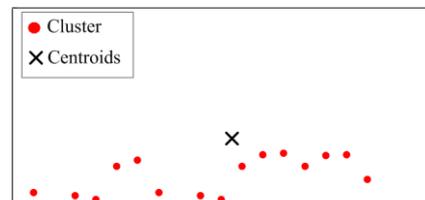
本文算法验证基于现场实测数据，某换流站在进行升功率操作过程中，3631 交流滤波器在投入过程中零序电流保护动作跳闸，3631 交流滤波器未正常投入，后台相继报出“AFP31A/B 保护动作”、“FBP3A/B 失灵动作”、“3631 开关出口跳闸”等报文，双极直流功率调整未受影响。现场检查发现 A、C 相正常，B 相发生一次过电压击穿事故，灭弧室未及时快速熄弧，导致拐臂断裂、瓷套爆炸。根据本文检测算法，首先将提取事故前每次分合闸的电弧电流趋势项，并进行积分值计算，结果如表 2 所示。

表 2 A、B 相断路器电弧电流趋势项积分值部分数据

Table 2 Part of the integral value of arc current trend term of A and B phase circuit breaker

| A 相电弧电流积分值 | B 相电弧电流积分值 |
|------------|------------|
| 2.10 | 9.08 |
| 2.00 | 9.05 |
| 2.08 | 9.30 |
| 2.05 | 9.35 |
| 2.35 | 9.39 |
| 2.10 | 9.60 |
| 2.08 | 9.20 |
| 2.05 | 9.10 |
| 2.30 | 9.90 |
| 2.39 | 13.3 |
| 2.40 | 13.9 |
| 2.38 | 13.5 |

再分别将 A、B 相数据进行聚类计算处理，其中横轴为数据个数，纵轴为积分值，结果如图 8。



(a) A 相聚类结果示意图

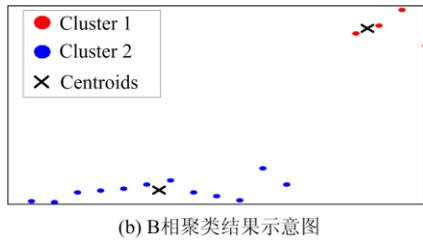


图 8 检测算法聚类结果

Fig. 8 Detection algorithm clustering results

由图 8 可见, B 相聚类结果存在两个聚类中心 K , 满足本文所设故障检测阈值要求 $K > 1$, 因此判断该断路器灭弧室灭弧性能存在严重缺陷, 现场检测发现断路器 B 相击穿, 验证了本文所提检测方法的有效性。

3.2 仿真验证

基于 PSCAD 仿真软件, 搭建交流滤波器用断路器三段式电弧模型, 拓扑结构如图 9 所示。

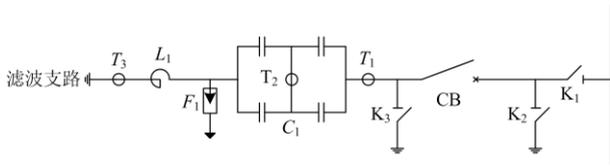


图 9 换流站滤波器支路仿真拓扑结构

Fig. 9 Simulation topology of capacitive filter branch in HVDC converter station

其中, K_1 、 K_2 、 K_3 为隔离或接地开关, CB 表示断路器, T_1 、 T_2 、 T_3 为电流互感器, F_1 表示对地间隙, C_1 表示滤波器组, 其等效电容值为 $5.8 \mu\text{f}$, L_1 为电抗器, 其等效电感值为 0.004 H 。其余模型相关参数可参考文献[27], 仿真结果如图 10 所示。

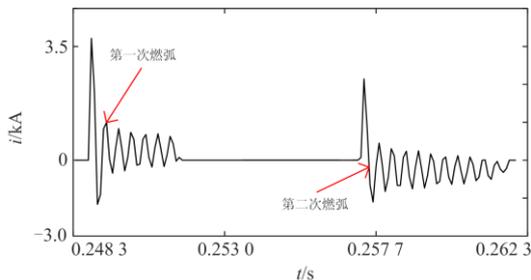


图 10 电弧重燃过程

Fig. 10 Process of arc re-striking

以第一次燃弧故障为例, 根据灭弧能力检测流程图, 采样第一次燃弧电流 i_a 进行 EMD 分解提取其趋势项 res. , 并对 res. 进一步做一阶累加处理, 将最后的数值结果存入 $p(n)$ 中, 作为 $p(n)$ 中的一个元素。

累加过程如图 11 所示。其中, N 为 res. 样本个数。

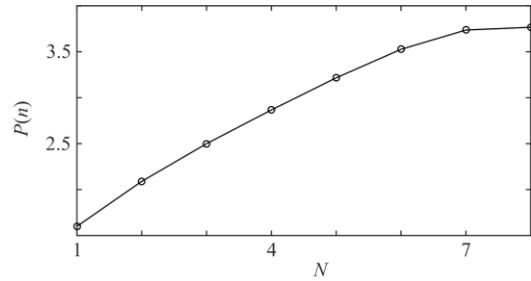
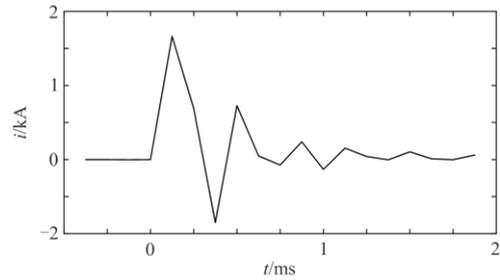


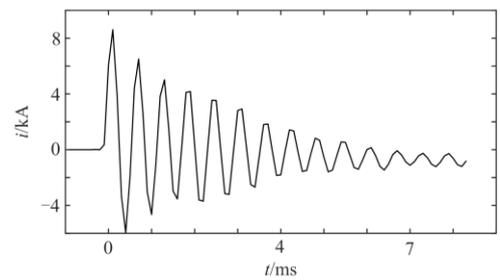
图 11 一阶累加过程

Fig. 11 The first-order accumulative

上述为完成一次 $p(n)$ 元素的计算过程, 改变电弧长度实现电弧阻值的变化, 重复进行 15 次燃弧仿真计算, 最终经聚类计算后得到序列 $p(n)$ 存在两个聚类中心, 检测判断该序列满足本文检测故障阈值要求 $K > 1$ 。其中, 初始设定电弧长度 20 cm (取极端情况, 触头合闸过程一般以 20 cm ^[28] 开始合闸), 每次仿真电弧长度减小 10 mm , 初次与最后一次仿真结果如图 12 所示。



(a) 初次仿真结果



(b) 终次仿真结果

图 12 初次与终次仿真结果示意图

Fig. 12 First and last simulation results

由图 12 可以明显看出, 当电弧长度减小至 5 cm 时, 燃弧持续时间延长且燃弧峰值较大, 此时断路器熄弧能力较弱, 存在投切时不易分合的风险。

4 结论

本文分析了影响灭弧室内电弧散热性的影响因素, 并探寻可表征灭弧室灭弧能力的特征量, 利用

受电弧电阻值决定的电弧电流趋势项反映灭弧室灭弧性能,提出了一种仅基于电气量的断路器灭弧能力在线检测方法,并经仿真和实测数据验证了其有效性。

参考文献

- [1] 刘健, 张志华, 吴水兰, 等. 一二次配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WU Shuilan, et al. Fault processing with coordination of primary equipments and secondary devices[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 1-6.
- [2] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [3] 程梦竹, 张新慧, 徐铭铭, 等. 基于多目标加权灰靶决策的有源配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 124-132.
CHENG Mengzhu, ZHANG Xinhui, XU Mingming, et al. Location method of an active distribution network fault section based on multi-target weighted grey target decision[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 124-132.
- [4] KHAN W A, BI T, JIA K. A review of single phase adaptive auto-reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214.
- [5] 曾祥浩, 张海传, 廖敏夫, 等. 模块化串联多断口真空断路器有限异步开断策略研究[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 1-6.
ZENG Xianghao, ZHANG Haichuan, LIAO Minfu, et al. Restrictive asynchronous breaking strategy of multi-break VCB with fiber controlled module[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 1-6.
- [6] 张江. 基于 AVR 单片机的真空度在线检测系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
ZHANG Jiang. Research on vacuum degree online detection system based on AVR singlechip[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [7] 王季梅. 真空开关理论及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [8] MERCK W E H, DAMSTRA G C. Methods for estimation of the vacuum status in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 400-403.
- [9] 梅开锋. 真空灭弧室的真空度检验方法[J]. 农村电气化, 2001(11): 34-34.
MEI Kaifeng. Inspection method of vacuum degree of vacuum interrupter[J]. Rural Electrification, 2001(11): 34-34.
- [10] 金志明. 基于脉冲磁控放电法的真空寿命评估技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
JIN Zhiming. Technical research on vacuum life assessment based on the pulse magnetic discharge method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [11] 贾伯岩, 李播, 刘宏亮. 脉冲磁控放电法测量真空断路器真空度现场使用及分析[J]. 河北电力技术, 2005, 24(1): 36-38.
JIA Boyan, LI Bo, LIU Hongliang. On site application and analysis of impulse magnet controlled discharge method for vacuity measurement of vacuum circuit breakers[J]. Hebei Electric Power Technology, 2005, 24(1): 36-38.
- [12] 彭晶, 邓云坤, 赵现平, 等. 40.5 kV 无功投切用双断口真空断路器的研究与设计[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 39-45.
PENG Jing, DENG Yunkun, ZHAO Xianping, et al. Research and design of 40.5 kV double-break vacuum circuit breaker for reactive power switching[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 39-45.
- [13] 张阔, 李卫国, 孙熠. 灭弧室内真空度与局部放电关系的研究[J]. 现代电力, 2012, 29(4): 46-50.
ZHANG Kuo, LI Weiguo, SUN Yi. Study on the relationship between partial discharge and vacuum degree in arc extinguish chamber[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(4): 46-50.
- [14] 欧阳建光. 灭弧室真空度与屏蔽罩电位变化关系的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
OUYANG Jianguang. Research on the relationship between interrupter vacuum degree and shield electric potential[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [15] 毛书勤. 高压断路器真空度检测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
MAO Shuqin. Research on the detection method of HV breaker vacuum degree[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [16] 郭福柱, 刘晓明, 朱高嘉, 等. 12 kV 真空断路器永磁直线电机操动机构特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 37-43.

- GUO Fuzhu, LIU Xiaoming, ZHU Gaojia, et al. Characteristic analysis of permanent magnet linear motor operating mechanism for 12 kV vacuum circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 37-43.
- [17] 徐国顺, 庄劲武, 周煜韬, 等. 混合型快速直流开断的短时短间隙电弧现象[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 986-997.
- XU Guoxun, ZHUANG Jinwu, ZHOU Yutao, et al. The phenomenon of short time short gap arc in hybrid DC fast breaking process[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 986-997.
- [18] 丛浩熹, 李庆民, 行晋源, 等. 基于能量平衡的潜供电弧燃弧时间计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3450-3458.
- CONG Haoxi, LI Qingmin, XING Jinyuan, et al. Computation method of arcing time of the secondary arcs based on energy balance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3450-3458.
- [19] 王仲奕, 刘志远, 张炫, 等. 五种纵向磁场真空灭弧室触头磁场特性分析比较[J]. 电工电能新技术, 2006(1): 21-25, 67.
- WANG Zhongyi, LIU Zhiyuan, ZHANG Xuan, et al. Comparison of axial magnetic field characteristics of 5 axial magnetic field vacuum interrupter contacts[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006(1): 21-25, 67.
- [20] 王倩, 叶赞, 谭王景, 等. 精确击穿电弧模型仿真及分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 4-8, 15.
- WANG Qian, YE Zan, TAN Wangjing, et al. Simulation and analysis of accurate breakdown arc model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 4-8, 15.
- [21] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
- LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [22] 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(6): 1837-1845, 1921.
- 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(6): 1837-1845, 1921.
- [23] 马祖涛, 李淑蓉. 小电流接地故障电弧建模分析[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-6[2021-03-04]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000569>.
- MA Zutao, LI Shurong. Modeling analysis of arc grounding fault in non-solidly earthed network[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA: 1-6[2021-03-04]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000569>.
- [24] 范李平, 袁兆强, 张凯. 基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其PSCAD/EMTDC仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
- FAN Liping, YUAN Zhaoqiang, ZHANG Kai. Simulation oil arc model of single phase earth fault and PSCAD / EMTDC based on wavelet transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.
- [25] THIRUMALAISAMY M R, ANSELL P J. Fast and adaptive empirical mode decomposition for multidimensional, multivariate signals[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25: 1550-1554.
- [26] 黄震华, 向阳, 张波, 等. 一种进行K-means聚类的有效识别方法[J]. 模式识别与人工智能, 2010, 23(4): 517-521.
- HUANG Zhenhua, XIANG Yang, ZHANG Bo, et al. An efficient method for K-Means clustering[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 23(4): 517-521.
- [27] 孟涛, 林莘, 徐建源. 分段电弧模型下VFTO的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 69-73.
- MENG Tao, LIN Shen, XU Jianyuan. Calculation of very fast transient over-voltage on the condition of segmental arcing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 69-73.
- [28] 段雄英, 陈一豪, 张帆, 等. 选相抑制交流滤波器合闸涌流及过电压研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 14-20, 28.
- DUAN Xiongying, CHEN Yihao, ZHANG Fan, et al. Study on closing inrush current and overvoltage by phase selective suppression of AC filter[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 14-20, 28.

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-06-23

作者简介:

孙 华(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障检测; E-mail: qianyish308@163.com

王 宾(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统故障检测与继电保护。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)