

252 kV 断路器分合闸线圈在环境因素下的劣化规律研究

褚飞航¹, 黄 虎¹, 彭在兴², 刘定新³

(1. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510000;
3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 高压断路器分合闸线圈在长期运行条件下, 会受到温度、湿度、盐雾等环境因素的影响, 其性能也会发生相应的劣化。采用湿热试验考察温度、湿度对252 kV断路器分合闸线圈的影响, 采用交变盐雾试验考察温湿度及盐雾对252 kV断路器分合闸线圈的综合影响, 研究了分合闸线圈在相应试验条件下的劣化情况以及分合闸线圈电流的变化情况。研究表明, 在湿热环境下, 252 kV断路器的分合闸线圈性能的劣化是一个突变过程, 无法通过分合闸线圈电流进行反映; 在盐雾环境下, 252 kV断路器的分合闸线圈性能的劣化是一个非线性的加速过程。

关键词: 高压断路器; 分合闸线圈; 运行可靠性; 湿热试验; 交变盐雾试验

中图分类号: TM 561

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202011029

0 引言

高压断路器是电力系统的关键设备, 其动作的可靠性对于电力系统的安全稳定运行意义重大^[1-5]。高压断路器的工作性质决定了其不可能频繁地动作而是长时间处于静止状态, 但是当电力系统发生短路故障时, 要求断路器能够可靠地动作, 并在100~160 ms之内切断线路^[6]。近年来, 随着电网投运的断路器数量及运行年限的增加, 断路器机构故障发生的次数呈现逐年上升的趋势。

严重的断路器机构故障会导致断路器拒动, 其中断路器拒分故障往往会造成严重的电力系统事故。断路器发生拒动的原因有很多, 但是根据数据统计, 分合闸线圈及其控制回路发生故障是造成断路器拒动的主要原因。南方电网2010—2014年共发生高压断路器拒动故障20起, 其中分合闸线圈故障最为严重, 占45%; 其他造成分合闸失败的因素中, 继电器故障占5%, 二次线缆故障占5%, 整个分合闸线圈及控制回路造成的拒动故障占总数的55%。因此加强对分合闸线圈劣化规律的研究是很有必要的。

分合闸线圈在长期运行过程中, 受环境中温度、湿度、盐雾因素的影响, 性能会逐渐地劣化。例如, 分合闸线圈的铁芯会逐渐锈蚀, 可能会导致分合闸线圈动铁芯卡涩; 分合闸线圈回路电连接处老化, 可能造成回路接触不良。针对断路器分合闸线圈环境因素(温度、湿度、盐雾)下的劣化, 目前还没有相关的研究工作可以参考。国内外针对线圈劣化的研究, 主要是对变压器、发电机、电动机等设备的线圈劣化规律进行研究, 而且研究重点多是线圈的电老化规律^[7-13]。因此, 有必要对断路器分合闸线圈在环

境因素下的劣化规律开展研究。本文利用湿热试验研究了在温度、湿度的作用下, 分合闸线圈电流曲线的变化规律和分合闸线圈性能的劣化规律; 利用交变盐雾试验研究了在盐雾条件下, 分合闸线圈锈蚀和卡涩的情况, 分析了在盐雾试验后分合闸线圈电流曲线及特征参数的变化规律。

1 分合闸线圈电流曲线

研究分合闸线圈电流曲线的变化是研究分合闸线圈劣化规律最基本的方法, 分合闸线圈的基本电压平衡方程如式(1)所示。

$$u = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

其中, u 为分合闸线圈电源电压; R 为线圈电阻; i 为线圈电流; x 为铁芯间隙; $L(x)$ 为线圈电感, 其随着磁铁动静铁芯间隙的变化而变化; $L(x) \frac{di}{dt}$ 为线圈自感电压, 对线圈电流的变化起到阻碍的作用; $i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}$ 为动铁芯运动过程中产生的电压, 其中 $\frac{dx}{dt}$ 为动铁芯的运动速度。对分合闸线圈电流起到决定作用的是电源电压 u 和动铁芯运动过程中产生的反电压 $i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}$, 如果 $u > i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}$, 则线圈电流呈增大趋势; 否则, 线圈电流呈减小趋势。

图1是典型的分合闸线圈电流曲线。图中, t_0 为分合闸指令下达时刻; t_1 时刻 $u = i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}$, 此时电流为 I_1 ; t_1 时刻后, 线圈动铁芯速度加快, 分合闸线圈电流减小, 直至 t_2 时刻分合闸线圈动铁芯撞击静铁芯, 线圈动作过程结束, 此时电流曲线达到局部最小值 I_2 ; t_2 时刻后, 静铁芯与动铁芯处于吸合的状态, 直

至 t_3 时刻分合闸线圈回路被切断(此时的电流为 I_3)。

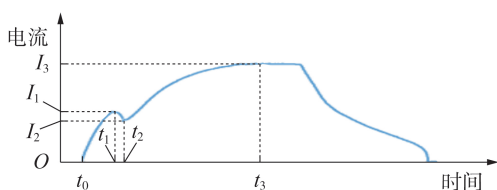


图1 典型的分合闸线圈电流曲线

Fig.1 Typical opening/closing coil current curve

断路器分合闸电流波形可以对断路器2个方面的状态进行反映:一是断路器分合闸线圈回路的状态,可以反映电源电压、线圈回路的电连接情况;二是断路器分合闸机构的状态,可以反映动铁芯运动过程受到的阻力是否过大,或者有异物卡涩等。

2 分合闸线圈湿热试验

湿热试验通过高温高湿的试验环境研究实验样品在湿热环境下的劣化规律。1921年,西门子公司对其产品进行了人工模拟湿热试验并首次提出了湿热试验标准。越南战争期间,热带丛林地区的湿热环境导致美军37%的电子设备失灵,造成重大的损失^[14]。由此,美国军方开始大力推进武器装备的环境试验。经过数十年的发展完善,湿热试验已经有了相对完善的标准。根据我国的湿热试验标准,湿热试验主要分为恒定湿热试验和交变湿热试验,其中恒定湿热试验主要是研究样品在高湿度条件下使用、贮存和运输的适应性^[15];交变湿热试验主要是研究样品在交替变化的温湿度条件下使用、贮存和运输的适应性^[16]。

2.1 湿热试验加速因子

加速寿命试验的基本思想是在超过正常环境应力的加速环境下进行试验,通过合理的加速模型,将在加速环境下获得的寿命信息转换到正常环境下^[17],该试验的优势在于缩短试验时间,提高试验效率,降低试验成本^[17-18]。加速模型即为加速寿命试验中试件寿命与应力水平的对应关系模型,例如以温度为加速应力的阿伦尼乌斯(Arrhenius)模型,以湿度为加速应力的Peck模型,以电应力(电压、电流、功率等)为加速应力的逆幂律模型等。加速寿命试验加速因子则是通过加速模型计算加速试验条件与正常环境条件的时间的转换关系,即1h试验相当于多少时间的自然环境。本文试验采用高温高湿的加速试验条件,因此在加速因子的计算中主要采用Arrhenius模型和Peck模型。

(1)采用Arrhenius模型计算温度加速因子 A_T ,如式(2)所示。

$$A_T = \frac{L_{\text{normal}}}{L_{\text{stress}}} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{normal}}} - \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right) \right] \quad (2)$$

其中, L_{normal} 为正常环境温度下的寿命; L_{stress} 为试验环境温度下的寿命; E_a 为化学反应活化能; k 为玻尔兹曼常数, $k=8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; T_{normal} 为正常环境温度; T_{stress} 为试验环境温度。

目前尚无针对分合闸线圈的加速寿命试验的标准,因此本文采用电工电子产品恒定湿热试验标准GB/T 2423.50—2012《环境试验 第2部分:试验方法 试验Cy:恒定湿热主要用于元件的加速试验》,将试验温度设置为85℃、湿度设置为85%。因为目前对于分合闸线圈的研究,并未明确其失效的机理,因此对于分合闸线圈没有明确的 E_a 可以参考。因此,本文参考了电子产品失效的经验值,将 E_a 设置为0.6 eV。

西安地区年平均温度为13℃,因此按照式(2)可计算得到 $A_T=133.58$ 。

(2)采用Peck模型计算湿度加速因子 A_H ,如式(3)所示。

$$A_H = \left(\frac{H_{\text{stress}}}{H_{\text{normal}}} \right)^n \quad (3)$$

其中, H_{stress} 为试验环境下的相对湿度; H_{normal} 为正常环境下的相对湿度; n 为湿度的加速率常数,一般取值为2~3。

西安地区年平均湿度为70%,按照式(3)可计算得到 $A_H=1.47$ 。

综上所述,在温度为85℃、湿度为85%的试验标准下,西安地区环境的加速因子 $A=A_T A_H \approx 196.3$ 。

2.2 湿热试验结果分析

本文湿热试验采用1号和2号2个分合闸线圈;采用恒温恒湿试验箱,温度在-20~100℃范围内可调,温度大于0时相对湿度在0~100%范围内可调。

将线圈放入恒温恒湿试验箱中,每48h取出分合闸线圈,观察线圈老化情况,并测量分合闸动作时的电流曲线。

1号线圈的正常电流波形经480h和768h湿热试验后的电流波形如图2所示。由图可见1号线圈经过768h的试验后,电流波形没有明显的趋势性变化。

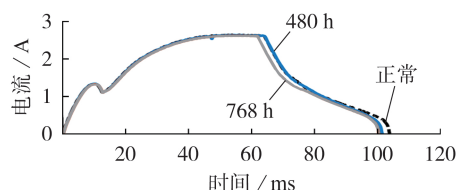


图2 1号线圈的电流波形

Fig.2 Current waveforms of Coil No.1

2号线圈经过384h湿热试验后并未发现电流曲线出现异常,见图3。但是又经过48h的湿热试

验后(即湿热试验总时长为432 h),发现动铁芯无法运动。经过检查后,发现线圈接线端脱落,见附录A图A1。

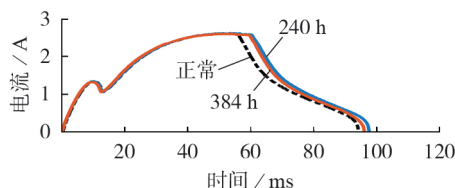


图3 2号线圈电流波形

Fig.3 Current waveforms of Coil No.2

文献[19]统计了电子产品的失效原因,其中主要原因温度、湿度、振动、灰尘占比分别为55%、19%、20%和6%。由此可见,温度、湿度(湿热环境)是造成焊点失效的最重要原因。

湿热环境造成焊点失效的机理是改变了焊点的显微组织,导致界面裂纹的形成^[20]。界面裂纹形成后,焊点变得脆弱,可靠性降低。断路器进行分合闸操作时伴随着强烈的振动,该振动会对已经产生裂纹的焊点产生更加严重的破坏作用,直至焊点松动,引出线脱落。

综上所述,可得到如下结论。

(1)温度、湿度主要是通过侵蚀分合闸线圈电连接处对分合闸线圈性能产生影响,本文中是对焊点的侵蚀。

(2)焊点的劣化过程是一个具有突变性的变化过程,通过采集分合闸线圈电流曲线很难监测到。焊点在劣化初期,接触电阻没有明显的变化,因此电流曲线也不会有明显变化。但是一旦由于各种因素(特别是断路器分合闸过程中的剧烈振动)造成焊点裂纹产生以后,分合闸线圈性能会发生急剧劣化,此时接触电阻会急剧增大,随着裂纹增大,焊点最终脱落。

3 分合闸线圈盐雾试验

在沿海地区以及盐碱地区运行的断路器易受到盐雾腐蚀的作用,断路器分合闸线圈受到盐雾腐蚀后,如果动铁芯锈蚀或者卡涩,往往会造成断路器拒动事故。为了模拟盐雾环境对分合闸线圈的影响,本文进行了交变盐雾试验。交变盐雾试验的优势在于通过盐雾环境和湿热环境的交替变化,能更好地模拟自然环境下盐雾腐蚀。

3.1 分合闸线圈交变盐雾试验设计

参照GB/T 2423.18—2012《环境试验 第2部分:试验方法 试验Kb:盐雾,交变(氯化钠)》中的交变盐雾试验标准,本文设计了针对分合闸线圈的交变盐雾试验。试验线圈及条件见表1。

表1 试验线圈及条件

Table 1 Test coils and conditions

线圈	是否喷盐雾	每周试验条件	动作间隔周期数
1号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	4
2号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	4
3号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	4
4号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	4
5号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	1
6号	是	2 h喷盐雾+7 d湿热存贮	1
7号	否	7 d湿热存贮	4
8号	否	7 d湿热存贮	4

本文的交变盐雾试验共采用8只分合闸线圈,分别为1—8号线圈。为了检验盐雾条件对分合闸线圈劣化性能的影响,1—6号线圈喷盐雾,作为试验组;7、8号线圈不喷盐雾,作为对照组。为了研究不同时间间隔动作对线圈劣化性能的影响,设置1—4号线圈每4个试验周期(即1个月)后动作,采集其电流;5、6号线圈每1个试验周期(即1周)后动作,采集其电流。每个试验周期包括2 h喷盐雾和7 d的湿热(温度为40℃,湿度为95%)存贮。按照国家标准要求,喷雾使用5%的氯化钠溶液。

3.2 线圈在盐雾条件下的劣化情况

在盐雾试验过程中,发现分合闸线圈会发生线圈引出线断裂、铁芯锈蚀卡涩等诸多故障,如附录A图A2、A3所示。图A2展示了分合闸线圈引出线断裂的情况。在分合闸线圈运输及安装过程中,绝缘皮往往会受到碰撞而造成挤压变形甚至是局部绝缘皮破损,在盐雾条件下,破损处迅速老化,破口处的铜线也会迅速被腐蚀,造成断线。建议断路器出厂时,加强对分合闸线圈引出线的检测。图A3是盐雾作用下的分合闸铁芯间隙劣化情况。在盐雾作用下,动铁芯表面会产生铁锈。铁锈对动铁芯的影响主要表现在两个方面:①阻塞动铁芯动作;②动静铁芯接触面上的铁锈减小了铁芯动作间隙。这种劣化对分合闸线圈以及断路器的影响较大,铁锈会导致动铁芯运动的卡涩,往往造成动铁芯运动不到位,或者更严重的情况,如果铁芯被铁锈卡住无法运动,断路器就会拒动。

3.3 每4个试验周期后的电流波形变化分析

断路器在经过长时间的静止状态后,它的首次动作具有重要的意义。如果断路器首次动作失败,则意味着断路器无法克服在长期静止状态下自身操动机构的劣化,拒动故障随之发生。因此,本文首先分析断路器分合闸线圈经过长期劣化后首次动作的电流曲线。

3.3.1 每4个试验周期后首次动作电流波形变化分析

1—4号线圈经过12个试验周期(3个月)后,每4个试验周期(1个月)采集分合闸线圈电流波形,电

流波形变化情况如图4所示。

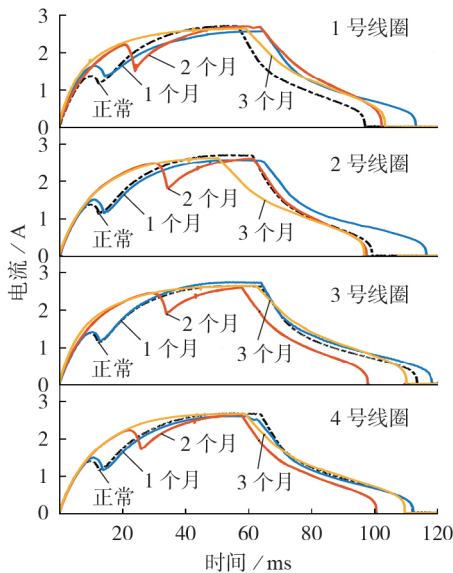


图4 1—4号线圈的电流波形

Fig.4 Current waveforms of Coil No.1-No.4

从图4可以看出,经过交变盐雾试验以后,首次分合闸操作的电流曲线的第一波峰值 I_1 明显变大,达到第一峰的时刻 t_1 明显变大,下文均以 I_1 表示电流曲线第一波峰值,以 t_1 表示达到电流曲线第一峰的时刻。

I_1 和 t_1 分别为分合闸线圈回路中电源电压和运动产生的反电压达到平衡时的电流和时刻。在本文的试验条件下, I_1 越大,则分合闸线圈的动铁芯在运动过程中所受到的阻力越大; t_1 越大,则分合闸线圈动铁芯开始运动的时间越晚。经过盐雾试验以后,由于铁锈的卡涩作用,动铁芯运动需要克服铁锈产生的阻力,因此 I_1 和 t_1 均会变大。经过3个月的盐雾试验后,分合闸电流曲线均不再有所下降阶段,则可知分合闸线圈动铁芯均不再动作,铁芯已经被完全卡死。

1—4号线圈分合闸电流曲线特征参数 I_1 和 t_1 随盐雾试验时间的增加而变化的情况分别如表2、3所示。

由表2、3可知,经过1个月(4个试验周期)的盐雾试验后,特征参数 I_1 平均增大1.1倍, t_1 平均增大1.15倍;经过2个月(8个试验周期)的盐雾试验后,特征参数 I_1 平均增大1.71倍, t_1 平均增大2.64倍;经

表2 分合闸电流曲线特征参数 I_1 的变化

Table 2 Change of characteristic parameter I_1

线圈	I_1 / A			
	正常情况	1个月	2个月	3个月
1号	1.36	1.62	2.21	—
2号	1.37	1.50	2.48	—
3号	1.36	1.40	2.44	—
4号	1.38	1.48	2.23	—

表3 分合闸电流曲线特征参数 t_1 的变化

Table3 Change of characteristic parameter t_1

线圈	t_1 / ms			
	正常情况	1个月	2个月	3个月
1号	9.7	11.8	20.9	—
2号	9.6	11.4	29.3	—
3号	9.6	10.7	29.6	—
4号	9.7	10.7	22.2	—

过3个月(12个试验周期)的盐雾试验后,分合闸电流曲线均不再有所下降阶段,铁芯被完全卡死,动铁芯无法动作。

未喷盐雾的7号线圈和8号线圈的电流波形如附录A图A4所示,由图可见随着试验时间的增加,分合闸线圈电流曲线未发生明显的变化。对比图4和图A4可知:

(1)盐雾是导致分合闸线圈铁芯锈蚀与卡涩的原因;

(2)盐雾环境下,分合闸线圈是逐步劣化的,分合闸线圈的电流曲线可以反映线圈劣化的过程;

(3)若分合闸线圈长期运行在盐雾条件下,最终将造成铁芯卡死,断路器拒动随之发生。

3.3.2 分合闸线圈动作次数与特征参数变化分析

试验中发现,分合闸线圈在盐雾试验以后首次动作时的卡涩情况较严重,但是首次动作以后,铁芯生锈造成的卡滞被打开,再次动作时,铁锈造成的卡涩情况就会大为减轻,线圈电流波形也趋于正常。进行4个周期和8个周期的盐雾试验后,1—4号线圈电流波形的特征参数 I_1 和 t_1 相比正常值的平均增大倍数与动作次数的关系如图5所示。

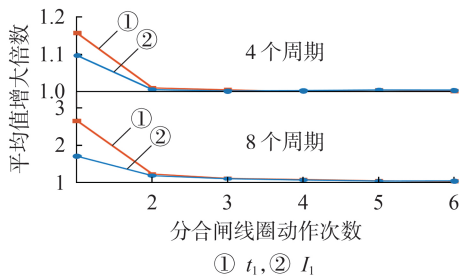


图5 4个和8个试验周期后特征参数的增大倍数随动作次数的变化情况

Fig.5 Curve of characteristic parameters vs. number of actions after four and eight cycles

由图5可见:经过4个周期的盐雾试验后,线圈首次动作的电流曲线特征参数 I_1 增大1.1倍, t_1 增大1.15倍,第2次动作时,电流曲线特征参数迅速减小,趋于正常;经过8个周期的盐雾试验后,首次动作的分合闸电流特征参数 I_1 增大1.71倍, t_1 增大2.64倍,第2次动作时, I_1 增大1.20倍, t_1 增大1.24倍,第6次动作后, I_1 和 t_1 趋于稳定,分别增大1.07倍和1.05倍。通过试验结果可以得出如下结论:

(1)在盐雾试验后,分合闸线圈首次动作受到的阻力最大、动作卡涩程度最严重,首次动作的难度也最大;

(2)分合闸线圈完成首次动作后,铁芯卡涩程度会大为减轻。

在断路器的实际运行过程中,可能会出现首次动作的电流曲线与首次动作后再次动作的电流曲线存在较大差异的情况。这种情况下,虽然分合闸线圈仍能动作,但实际上线圈性能已经出现较大程度的劣化。

3.4 每1个试验周期后首次动作的特征参数分析

为了进一步研究盐雾试验后分合闸线圈首次动作的电流曲线的变化规律,对5、6号线圈在每1个试验周期后的分合闸线圈电流曲线特征参数 I_1 、 t_1 的变化进行分析。

5、6号线圈每周动作电流曲线的特征参数 I_1 、 t_1 的变化分别如图6所示。从图6可知,随着盐雾试验时间的增加,7、8号线圈的电流曲线特征参数 I_1 和 t_1 均非线性增大,且增大的速度加快。

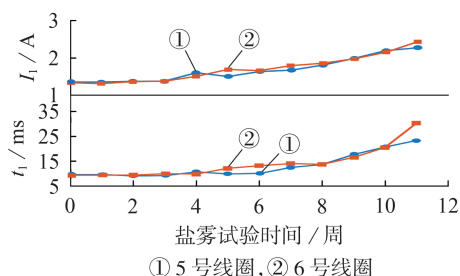


图6 特征参数 I_1 、 t_1 每周的变化

Fig.6 Weekly change of characteristic parameters I_1 and t_1

基于上述试验数据,本文对分合闸电流曲线特征参数 I_1 和 t_1 随时间的变化情况进行拟合。数据拟合所用的数据为5号线圈和6号线圈特征参数 I_1 和 t_1 的平均值。

分别使用指数拟合和多项式拟合对特征参数 I_1 的变化规律进行拟合。

I_1 的指数拟合的公式为:

$$I_1^{\text{fit}} = a_1 \exp(b_1 x) + c_1 \exp(d_1 x) \quad (4)$$

其中, I_1^{fit} 为 I_1 的拟合值; $a_1=1.184$; $b_1=0.005\ 884$; $c_1=0.1408$; $d_1=0.1858$ 。

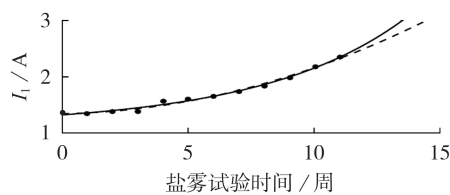
I_1 的多项式拟合采用二次函数,如式(5)所示。

$$I_1^{\text{fit}} = a_2 x^2 + b_2 x + c_2 \quad (5)$$

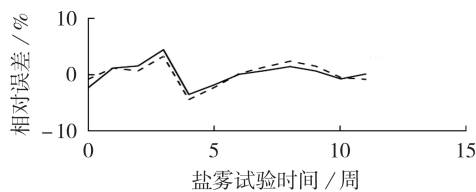
其中, $a_2=0.007\ 453$; $b_2=0.007\ 242$; $c_2=1.346$ 。

特征参数 I_1 的拟合结果如图7所示。由图7(b)可知:采用指数拟合的最大相对误差为4.35%,且随着盐雾试验时间的增加,相对误差呈现减小的趋势;采用多项式拟合的最大相对误差为-4.49%,经过5

周的盐雾试验后,多项式拟合的相对误差大于指数拟合的相对误差,因此对 I_1 采用指数拟合结果更为精确。



(a) 拟合曲线



(b) 相对误差

• 实际值, — 指数拟合, - - - 多项式拟合

图7 特征参数 I_1 的拟合结果

Fig.7 Fitting results of characteristic parameter I_1

分别采用指数拟合和多项式拟合对特征参数 t_1 的变化规律进行拟合。

t_1 的指数拟合的公式为:

$$t_1^{\text{fit}} = a_3 \exp(b_3 x) + c_3 \exp(d_3 x) \quad (6)$$

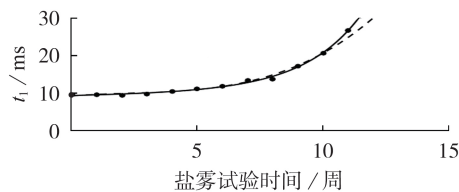
其中, t_1^{fit} 为 t_1 的拟合值; $a_3=9.353$; $b_3=0.011\ 89$; $c_3=0.1244$; $d_3=0.4415$ 。

t_1 的多项式拟合采用三次函数,如式(7)所示。

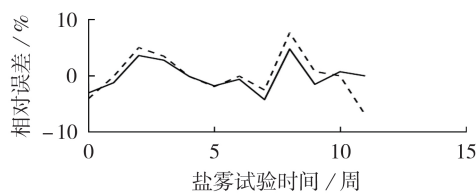
$$t_1^{\text{fit}} = a_4 x^3 + b_4 x^2 + c_4 x + d_4 \quad (7)$$

其中, $a_4=0.019\ 26$; $b_4=-0.129\ 6$; $c_4=0.499\ 3$; $d_4=9.378$ 。

t_1 的拟合结果如图8所示。由图8(b)可知,采用指数拟合的最大相对误差为5.11%;采用多项式拟合的最大相对误差为7.99%,且随着盐雾试验时间的增加,多项式拟合的相对误差呈现放大趋势。因此对 t_1 采用指数拟合更准确。



(a) 拟合曲线



(b) 相对误差

• 实际值, — 指数拟合, - - - 多项式拟合

图8 特征参数 t_1 的拟合结果

Fig.8 Fitting results of characteristic parameter t_1

综上所述,随着盐雾试验时间的增加,特征参数 I_1 和 t_1 的最佳拟合方式均是指数拟合。由于特征参数 I_1 和 t_1 反映了线圈在盐雾条件下劣化的程度,由此可知,252 kV断路器分合闸线圈在盐雾条件下的劣化是非线性的加速劣化过程。

4 结论

本文针对分合闸线圈的环境劣化,对分合闸线圈进行了湿热试验和交变盐雾试验,研究了在2种试验环境下分合闸线圈的劣化情况和分合闸线圈电流的变化规律,得到以下结论。

(1)在湿热环境下分合闸线圈性能劣化的主要因素是引出线焊点的断裂,这种劣化是具有突变性质的,分合闸线圈电流无法反映出这种具有突变性的劣化过程。

(2)在盐雾环境下,分合闸线圈性能劣化的主要因素是铁芯锈蚀、铁芯卡涩、引出线断线等。在盐雾试验后,由于铁芯卡涩,分合闸线圈首次动作电流曲线第一峰值 I_1 和达到峰值时刻 t_1 均会显著增大。首次动作时铁芯卡涩最严重,受到的阻力最大,首次动作后,铁芯卡涩程度会减轻。

(3)第一峰值 I_1 和达到峰值时刻 t_1 反映了线圈在盐雾条件下劣化的程度。通过对试验数据分析可知,随着盐雾时间增加, I_1 和 t_1 按照指数方式增大。因此,盐雾条件下,252 kV断路器分合闸线圈的性能劣化是一个非线性的加速过程。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李舒适,王丰华,耿俊秋,等. 基于优化VMD的高压断路器机械状态检测[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):148-154.
LI Shushi, WANG Fenghua, GENG Junqiu, et al. Mechanical state detection of high voltage circuit breaker based on optimized VMD algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 148-154.
- [2] 赵莉华,张浩,景伟,等. 基于线圈电流的高压断路器操作机构性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(5):146-152.
ZHAO Lihua, ZHANG Hao, JING Wei, et al. Research on operating mechanism performance of high voltage circuit breaker based on the coil current[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 146-152.
- [3] 孙银山,张文涛,张一茗,等. 高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究[J]. 高压电器,2015,51(9):134-139.
SUN Yinshan, ZHANG Wentao, ZHANG Yiming, et al. Research on feature value extraction and fault recognition of coil current signal in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 134-139.
- [4] 黄新波,胡潇文,朱永基,等. 基于卷积神经网络算法的高压断路器故障诊断[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):136-140.
HUANG Xinbo, HU Xiaowen, ZHU Yongji, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on convolution neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 136-140.
- [5] 荣命哲,贾申利,王小华. 电器设备状态检测[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1-3.
- [6] STRACHAN S M, MCARTHUR S D J, STEPHEN B, et al. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):178-186.
- [7] 史玉宣,李俊芳,张燕. 大型发电机定子线圈老化鉴定试验方法的研究[J]. 电子技术与软件工程,2014(12):182.
- [8] 孙光临. 高压电动机引出线故障原因分析及处理对策[J]. 机电信息,2014(21):38-39.
- [9] 魏新劳,李林鹭,聂洪岩,等. 500 kV电力变压器匝间绝缘模型线圈的电老化特性[J]. 电机与控制学报,2017,21(3):17-24.
WEI Xinlao, LI Lin'ao, NIE Hongyan, et al. Electrical aging characteristic of 500 kV power transformer turn-to-turn insulation model coils[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(3): 17-24.
- [10] 史进渊. 大型汽轮发电机定子线圈F级绝缘寿命预测方法的研究[J]. 动力工程学报,2013,33(7):507-516.
SHI Jinyuan. Study on life prediction of class F insulation for stator coils of large turbo-generators[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2013, 33(7): 507-516.
- [11] 乐波,张晓红,卢伟胜,等. 电机定子线圈绝缘多因子老化特征的研究[J]. 高电压技术,2000,26(2):3-7.
YUE Bo, ZHANG Xiaohong, LU Weisheng, et al. Study on multi-factor aging characteristics of motor stator windings[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 3-7.
- [12] LAMARRE L, DAVID E, NAVARRETE B, et al. Dissection of in service aged coils and bars and correlation with different diagnostic testing techniques[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France: IEEE, 2004: 763-766.
- [13] UL HAQ S, OMRANIPOUR R, TERAN L. Surge withstand capability of electrically and thermo-mechanically aged turn insulation of medium voltage form-wound AC stator coils[C]//2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2014: 78-81.
- [14] 张学渊. 湿热试验方法及其相关标准[J]. 环境技术,2018(增刊):201-205.
ZHANG Xueyuan. Hot-wet testing methods and related standards[J]. Environmental Technology, 2018(Supplement): 201-205.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电工电子产品环境试验第2部分:试验方法 试验Cab:恒定湿热试验:GB/T 2423.3—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电工电子产品环境试验第2部分:试验方法 试验Db:交变湿热:GB/T 2423.4—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [17] 孙丹峰,季幼章. 电子元器件加速寿命试验综述[J]. 电源世界,2018(11):21-26.
SUN Danfeng, JI Youzhang. Review of accelerated life test for electronic components[J]. The World of Power Supply, 2018(11): 21-26.
- [18] 李晓阳,姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(5):828-831.
LI Xiaoyang, JIANG Tongmin. Review of multiple-stress models in accelerated life testing[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 828-831.

- [19] 史建卫,徐波,袁和平. SMT焊点质量检测方法[J]. 电子工业专用设备,2005,34(9):26-33.
SHI Jianwei,XU Bo,YUAN Heping. Inspection method on solder joint quality in SMT[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing,2005,34(9):26-33.
- [20] 周祖锡. 湿热载荷下无铅焊点电阻应变研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
ZHOU Zuxi. Study on resistance strain of lead-free solder joints under humid and hot loads[D]. Changsha:Central South University,2010.

作者简介:



褚飞航

褚飞航(1993—),男,山东淄博人,工程师,硕士,主要研究方向为电器设备状态检测(E-mail:894276620@qq.com);

黄 虎(1986—),男,湖北襄阳人,工程师,博士,主要研究方向为船舶电力系统(E-mail:ushh@163.com)。

(编辑 任思思)

Study on degradation of 252 kV circuit breaker's opening / closing coil under environmental factors

CHU Feihang¹,HUANG Hu¹,PENG Zaixing²,LIU Dingxin³

(1. China Ship Development and Design Center,Wuhan 430064,China;

2. Electrical Power Research Institute of CSG,Guangzhou 510000,China;

3. College of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: Under long-term operating conditions, the performance of opening / closing coil of high voltage circuit breakers degrades due to the environmental factors such as temperature, humidity and salt spray. The damp heat test is used to simulate the effects of temperature and humidity on the opening / closing coil of 252 kV circuit breaker, and the alternating salt spray test is used to simulate the combined effects of temperature, humidity and salt spray on the opening / closing coil of 252 kV circuit breaker. The degradation of the opening / closing coil under the corresponding conditions and the change of the opening / closing coil currents are studied. The study results show that the degradation of 252 kV circuit breaker's opening / closing coil under hot and humid environment is a process of rapid change, which cannot be reflected by the opening / closing coil currents, and the degradation of 252 kV circuit breaker's opening / closing coil under salt spray environment is a nonlinear acceleration process.

Key words: HV circuit breaker; opening / closing coil; operation reliability; damp heat test; alternating salt spray test

(上接第217页 continued from page 217)

larity-calculation-based learning template library in design and check of virtual circuit[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):205-212.

作者简介:

陈志刚(1983—),男,江苏如东人,高级工程师,通信作者,主要从事智能变电站过程层设备相关的研究工作(E-mail:chenzg@nrec.com);



陈志刚

熊慕文(1981—),男,江西南昌人,高级工程师,硕士,主要研究方向为变电站自动化(E-mail:xiongmw@nrec.com);

刘东超(1980—),男,河北唐山人,高级工程师,硕士,主要从事智能变电站过程层设备相关研究工作(E-mail:liude@nrec.com)。

(编辑 任思思)

Development and application of device integrating time synchronization and time synchronization monitoring in smart substations

CHEN Zhigang¹,XIONG Muwen¹,LIU Dongchao¹,ZHAO Xiaodong¹,XIAN Guangquan¹,ZHANG Daonong²

(1. NARI-Relays Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China;2. North China Power Engineering Co.,Ltd.,Beijing 100120,China)

Abstract: Aiming at the lack of on-line monitoring of the whole station time synchronization system and secondary equipment in the smart substations, a device integrating time synchronization and time synchronization monitoring is developed. The hardware and software algorithms, as well as the structure of the device model and the generation process of the device configuration file, are introduced in detail according to the function sub module of integrated devices. At the same time, the application of the smart substation time synchronous monitoring system composed of the integrated device and master station software system are studied. The integrated device has been applied in actual projects.

Key words: smart substation; time synchronization; monitoring; NTP; GOOSE

附录

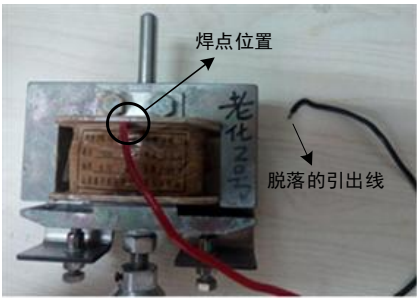


图 A1 2 号线圈接线端焊点脱落
Fig.A1 Fracture of solder joint of Coil No.2

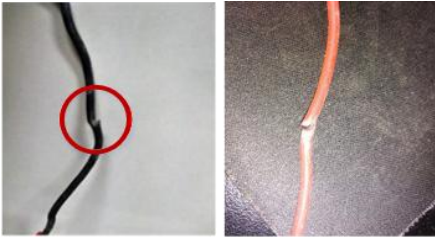
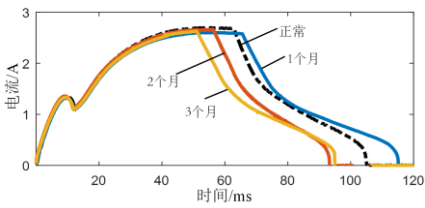


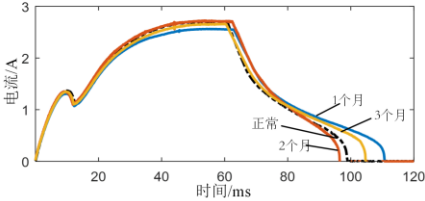
图 A2 分合闸线圈引出线断裂
Fig.A2 Crack of opening/closing coil pinout



图 A3 铁芯间隙劣化情况
Fig.A3 Deterioration of core gap



(a) 7 号线圈



(b) 8 号线圈

图 A4 7、8 号线圈的电流波形
Fig.A4 Current waveforms of Coil No.7 and Coil No.8