

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.024

断路器分合闸线圈电流波形的差异机制研究

张 帅¹, 彭在兴¹, 李锐海¹, 陈 曦², 王 颂¹, 刘 凯¹,
易 林¹, 苏 毅³, 谢植飏³

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510000; 2. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510000; 3. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530023)

摘要: 高压断路器是电网重要的保护和控制设备, 断路器操动机构的缺陷与故障严重影响电力系统的安全稳定运行。分合闸线圈作为断路器操动机构的关键部件, 线圈电流包含大量机构运行状态的信息。为深入探索造成分合闸线圈电流波形差异的原因, 文中通过在实际断路器上的缺陷与故障模拟研究, 对影响断路器分合闸线圈电流的因素进行了深入分析, 区分出由于断路器本体特征和环境特征不同, 造成的断路器个体之间的分合闸线圈电流的指纹特征差异。同时重点分析4种不同机构缺陷情况下线圈电流的变化特征, 据此提出了基于分合闸电流波形的断路器机构状态评估关键点, 为断路器智能化状态评估的实际应用奠定了基础。

关键词: 断路器; 分合闸线圈电流; 指纹特征; 状态评估

Research on the Difference Mechanism of Current Waveform of Circuit Breaker Opening/Closing Coil

ZHANG Shuai¹, PENG Zaixing¹, LI Ruihai¹, CHEN Xi², WANG Song¹, LIU Kai¹, YI Lin¹,
SU Yi³, XIE Zhibiao³

(1. Electrical Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510000, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

Abstract: High voltage circuit breakers are important protection and control equipment for the power grid. The defects and faults of the circuit breaker seriously affect the safety and stability of the power system. As the key component of the operating mechanism of the circuit breaker, the opening/closing coils contain a large amount of information about the operating status of the mechanism. In order to investigate the cause of the difference in the current waveforms, this paper analyzes the factors affecting the circuit breaker opening/closing coil current through the simulation of the defect and fault in the actual circuit breaker, and distinguishes the fingerprint characteristics difference of the opening/closing current caused by the environmental difference and structural difference. At the same time, the characteristics of coil current changes under four different types of mechanism defects are analyzed. The key points of status evaluation of circuit breaker mechanism base on opening/closing current waveform are proposed, which lays a foundation for the practical application of intelligent status evaluation of circuit breaker.

Key words: high voltage circuit breaker; opening/closing coil current; fingerprint feature; state evaluation

收稿日期:2020-01-15; 修回日期:2020-03-25

基金项目:南方电网公司科技项目(110 kV及以上高压开关模块化、智能化、标准化机构关键技术研究(1期:220 kV AIS用机构))。

Project Supported by Research on Key Technologies of Modular, Intelligent and Standardization Operation Device of 110 kV and above High Voltage Switches (Phase 1: Operation Device for 220 kV AIS).

0 引言

断路器作为电力系统中最重要电力设备之一,既起着带电切合正常的负荷电流的控制作用,也起着在规定的时间内承载、开断和关合异常电流的保护作用,其可靠性不仅影响其自身的安全运行,同时也影响系统中其他重要电力设备的安全运行^[1],因此,对于断路器的故障研究一直是电网运行单位重点关注的领域之一。南方电网长期的运行数据表明,断路器的机构故障一直是影响断路器可靠性的重要原因之一,特别是断路器的拒动故障,不仅会造成严重的经济损失,更会产生巨大的安全风险。因此,近年来,针对断路器机构进行了大量研究,研究表明断路器运行过程中一些机构故障信息会反映在分合闸线圈电流曲线的一些特性中^[2-6],通过对分合闸线圈电流的监测与分析对于发现断路器早期缺陷,防止故障产生具有重要意义。

国内对断路器分合闸线圈电流的研究主要集中在以下几个方面。一是探究分合闸线圈电流与断路器机构机械特性之间的关系。包括研究操作机构分合闸线圈电压、分合闸线圈回路电阻等参数变化对操作机构机械性能的影响^[7];研究基于分合闸线圈电流的机构机械状态在线监测方法^[8];研究断路器分合闸线圈电流波形与机械缺陷的关系,提取线圈电流波形中的关键特征量,建立与断路器常见典型机械缺陷的诊断判据^[9]等。二是通过分合闸线圈电流进行断路器故障研究。包括提取高压断路器分合闸线圈电流信号特征值,据此对断路器的故障判别方法进行研究^[10];利用分合闸线圈电流波形,对实际故障进行研究分析,据此发现高压断路器存在的相关隐患^[11];研究不同故障下,分合闸线圈电流参数的变化情况^[12]等。三是研究分合闸线圈电流的数据处理方法。包括采用支持向量机(SVM)算法对分合闸线圈故障进行诊断,通过采用主成分分析法提取电流波形的特征参数作为诊断依据,实现了对故障的有效识别^[13-14];采用K-means与SOM神经网络相结合的混合算法,对断路器操作机构进行状态评估,提高了算法的计算速度和聚类准确率^[15];利用随机森林算法对分合闸线圈进行故障识别,使得算法过拟合风险大大降低,提高了模型的泛化能力^[16];通过小波包能量代替原始波形中的特征值,消除因提取特征值不准确而带来的诊断误差^[17]等。四是研究分合闸线圈电流的测试及模拟方法。包括分合闸线圈电流测试系统研究^[18];分合闸线圈电流测量装置研究^[19];分合闸线圈电流在线诊断装置研

究^[20];利用断路器机构模拟样机,搭建分合闸线圈电流采集试验平台,进行故障的模拟研究^[21]等。

作者在现有研究的基础上,通过在实际断路器上的故障模拟研究,进一步的对动作电流波形特性进行了研究,探究了影响断路器分合闸线圈电流的因素,并对不同故障状态的分合闸线圈电流特征进行了比对分析,建立了故障与电流波形特征的关系,为通过线圈电流进行更精细的断路器状态评估奠定基础。

1 分合闸线圈电流波形特性研究

1.1 断路器分合闸线圈动作原理

断路器分合闸线圈结构见图1^[22],当回路通电,线圈1产生电磁力驱动动铁心3运动,直到动铁心3碰撞脱扣杆4,从而触发一次分/合闸操作。分合闸线圈回路是一个典型的电感性电路,其基本电压平衡方程为

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + iv \frac{dL}{dx} \quad (1)$$

式(1)中: u 、 i 、 R 、 L 分别为线圈的电压、电流、电阻和电感; $iv \frac{dL}{dx}$ 代表铁心运动引起的反电动势。

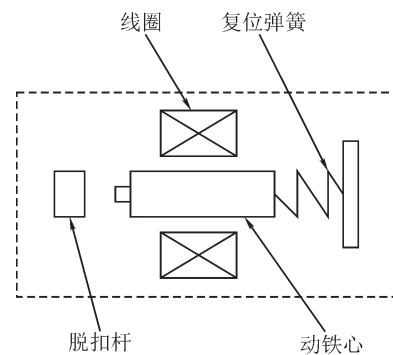


图1 断路器分合闸线圈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circuit breaker's opening/closing electromagnet

典型的分合闸线圈电流波形^[22]见图2。 t_0 为分合闸指令到达回路接通时刻; t_1 是线圈中电流上升到反电动势占主导时刻; t_2 是铁心运动到最大行程时刻; t_3 是时间继电器断开时刻; I_1 ~ I_3 分别是 t_1 ~ t_3 时刻对应的电流值。在 t_0 ~ t_1 ,由于在线圈通电以前磁路不饱和,开始阶段电流按照指数规律增长,当电磁吸力大于反作用力时,铁心开始运动,此时线圈中会产生阻碍电流增大的运动反电动势 $iv \frac{dL}{dx}$,随着铁心速度的不断增大,运动反电动势也不断增大,电流增长速度变慢,当速度增长到一定的时刻 t_1 ,反电动势占主导电流便开始减小,以维持电压的平衡。在 t_1 ~ t_2 ,铁心速度继续增大,电流明显减小,直

至铁心运动到最大行程位置, 此时电流达到极小值 I_2 。电流减小的速率和幅度由铁心运动的速度和线圈本身的参数所决定。在 t_2-t_3 , 铁心停止运动, 线圈电流增大并达到最大值 I_3 , 直到回路切断。

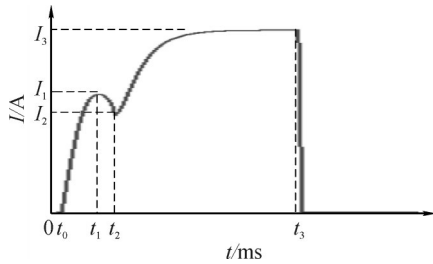


图2 分合闸线圈的典型电流波形

Fig. 2 A typical current waveform of the opening/closing coil

1.2 分合闸线圈电流影响因素分析

由 1.1 分析可知, 电流波形 i 是线圈电压 u , 线圈电感 L , 线圈电阻 R 、铁心运动速度 v 以及铁心行程 x 的函数, 即 $i=f(u, L, R, v, x)$, 因此线圈电流波形存在差异即线圈电压、线圈电感、线圈电阻、铁心运动速度、铁心行程的存在差异。线圈电压与线圈电感和线圈电阻相关, 同时还与控制回路的电压、电阻相关; 线圈电感与线圈的线径、匝数、动静铁心间隙、动铁心几何尺寸及材料性能、静铁心几何尺寸及材料性能、线圈绕组的几何尺寸及材料性能相关; 线圈电阻与线圈材料、匝数, 温度等相关; 铁心运动速度和行程与铁心的受力特性相关, 影响因素包括复位弹簧的劲度系数、复位弹簧的预压力、铁心的脱扣反作用力、动铁心质量、超程以及动静铁心之间的摩擦力。

影响线圈电流的因素可分为 3 类: 第 1 类为环境参量, 如环境温度等; 第 2 类为工况参量, 如控制电压、回路电阻等; 第 3 类为机构和线圈本身的结构参量, 如材料、几何尺寸、反作用力等。

2 断路器分合闸线圈正常情况下电流波形影响因素分析

2.1 环境温度对分合闸线圈电流的影响

为探究环境温度对分合闸线圈电流的影响, 将 5 个 A 型号线圈放到恒温恒湿试验箱中, 在 0~80 °C 调节试验箱温度, 每次调节 5°。用热电偶测量线圈温度, 待线圈温度稳定后, 分别测量 5 个线圈电阻并求其平均值。实验与拟合结果见图 3。

线圈电阻随温度线性变化, 为进一步验证温度对分合闸线圈电流的影响, 在不同的环境温度下对 A 厂家 220 kV 断路器的 A 型号线圈电流进行了测量, 结果见图 4。测量结果证实了环境温度对分合

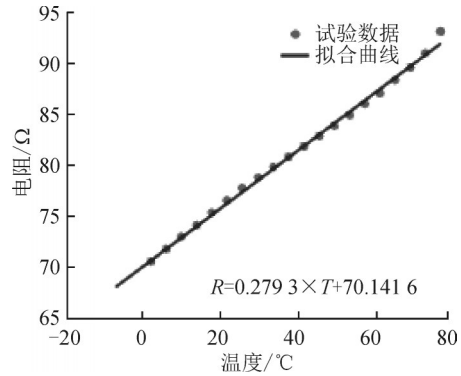


图3 线圈电阻随温度变化规律

Fig. 3 Variation of coil resistance with temperature

闸线圈电流有较大的影响: 环境温度越高, 分合闸线圈电流的稳定值 I_3 越小, 相应的 I_1 和 I_2 也有不同程度的降低。

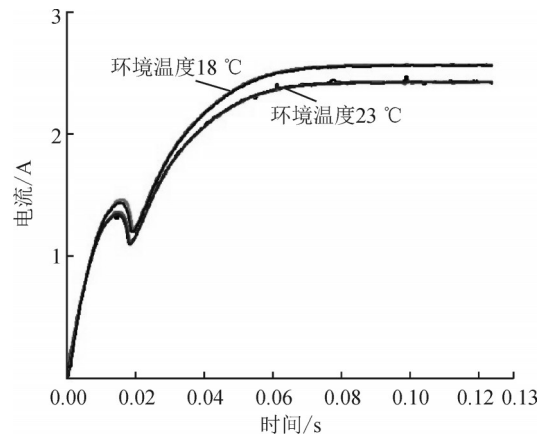


图4 不同环境温度下的线圈电流

Fig. 4 Coil current at different ambient temperatures

2.2 控制电压对分合闸线圈电流的影响

分合闸线圈控制电压变化是一种常见的运行工况。国标要求分闸线圈控制电压在额定电压的 65%~115%(143~253 V) 之间可靠动作。通过调整单相调压器, 从而使得控制电压在额定电压 220 V 的 65%~115%(143~253 V) 之间进行变化, 采集在不同电压下 A 厂家 220 kV 断路器 A 型号分合闸线圈电流波形, 电流曲线见图 5。

分合闸线圈控制电压对线圈电流波形的影响很大, 电压越高, 线圈电流在第一阶段的上升速度越快, 电流 I_1 、 I_2 和 I_3 均出现不同程度的增加。当电压过低时, 线圈电流在第二阶段 t_1-t_2 的时间明显变长, 甚至出现电流波形畸变。

2.3 断路器机构对分合闸线圈电流的影响

对不同厂家相同型号的断路器分合闸线圈电流在同一环境温度条件下, 在额定控制电压下随机对不同断路器的合闸电流波形进行测试, 不同厂家的测试结果见图 6-8。

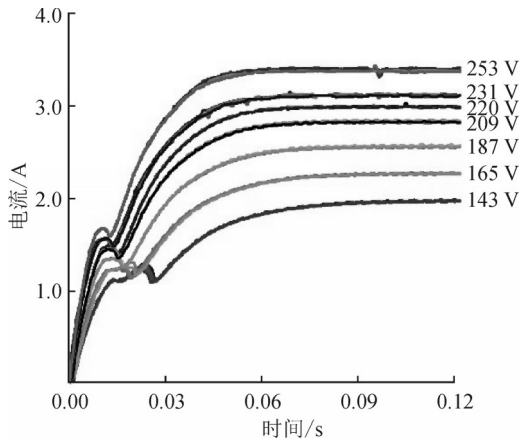


图5 不同控制电压下的线圈电流

Fig. 5 Coil current at different voltages

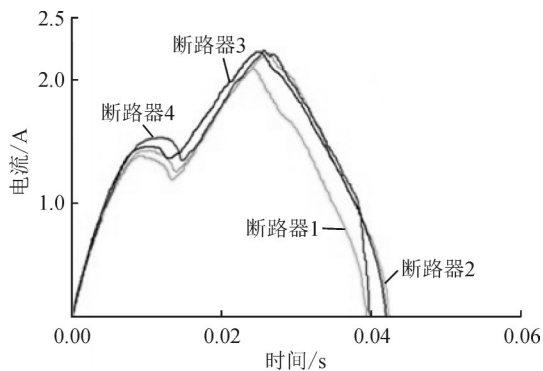


图6 正常情况下同型号的A厂家220 kV断路器分闸电流曲线对比

Fig. 6 Comparison of opening current curves of 220 kV A circuit breakers of the same type under normal conditions

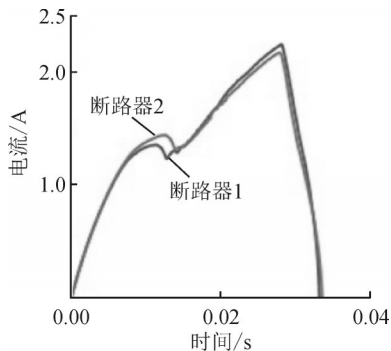


图7 正常情况下同型号的B厂家110 kV断路器分闸电流曲线对比

Fig. 7 Comparison of opening current curves of 110 kV B circuit breakers of the same type under normal conditions

从测试结果可以看出,在相同外部条件下,同一厂家、同一型号的断路器的不同个体的分合闸线圈电流波形存在较大差异,主要原因是因为断路器本体以及机构结构由于制造分散性所造成的差异。

2.4 分合闸线圈差异对电流的影响

选取四种不同型号的线圈,分别为A、B、C、D型。对相同型号的不同线圈个体在同一机构上进行合闸电流测试,控制电压为额定电压,环境温度相同,

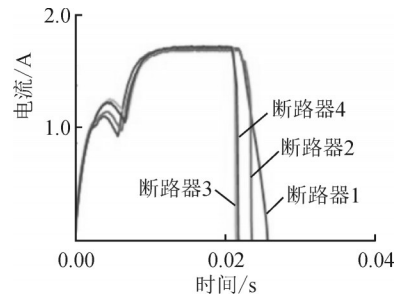


图8 正常情况下同型号的C厂家500 kV断路器分闸电流曲线对比

Fig. 8 Comparison of opening current curves of 500 kV C circuit breakers of the same type under normal conditions

典型电流波形的见图9。可以看出,同型号线圈的不同个体存在差异,不同型号线圈之间差异巨大。不同型号线圈的差异主要由于不同的线圈结构和线圈材料造成,同型号线圈的差异主要由线圈制造的分散性造成。

上述实验分析结果表明,每台断路器的分合闸电流波形受断路器本体特征的影响具有明显的指纹特性,因此利用分合闸线圈电流对断路器进行状态评估需要在消除断路器个体差异的基础上进行。不同工况环境引起的线圈电流波形差异通过不同工况环境下的电流波形修正来消除差异;不同断路器和不同线圈结构参量引起的电流波形差异通过基于断路器个体的电流波形指纹特性的方法来消除差异;而对于不同缺陷或故障造成断路器结构参量变异引起的电流波形差异正是评估运行断路器机构状态的依据。

3 断路器分合闸线圈故障情况下电流波形影响因素分析

为探究断路器缺陷对分合闸线圈电流的影响,文[14]采用了故障模拟平台对断路器各种缺陷状态进行模拟,文中对A厂家220 kV断路器进行了现场试验,采集了断路器在分合闸线圈回路接触不良、铁心间隙变短、铁心卡涩和分合闸线圈短路情况下的线圈电流曲线,现场试验平台见图10。

3.1 分合闸线圈回路接触不良

分合闸线圈回路接触不良故障表现为回路电阻变大,在实验中,通过串联电阻的方式模拟实际接触不良的情况。实际断路器样机上合闸线圈内阻为(94±5)Ω,在合闸线圈回路中分别串入10、20、30、40、50、60、70Ω的电阻,测量动作时的线圈电流,结果见图11。

实验结果表明随着接触电阻变大,分合闸线圈中电流按以下规律变化:第一个电流峰值 I_1 和谷值

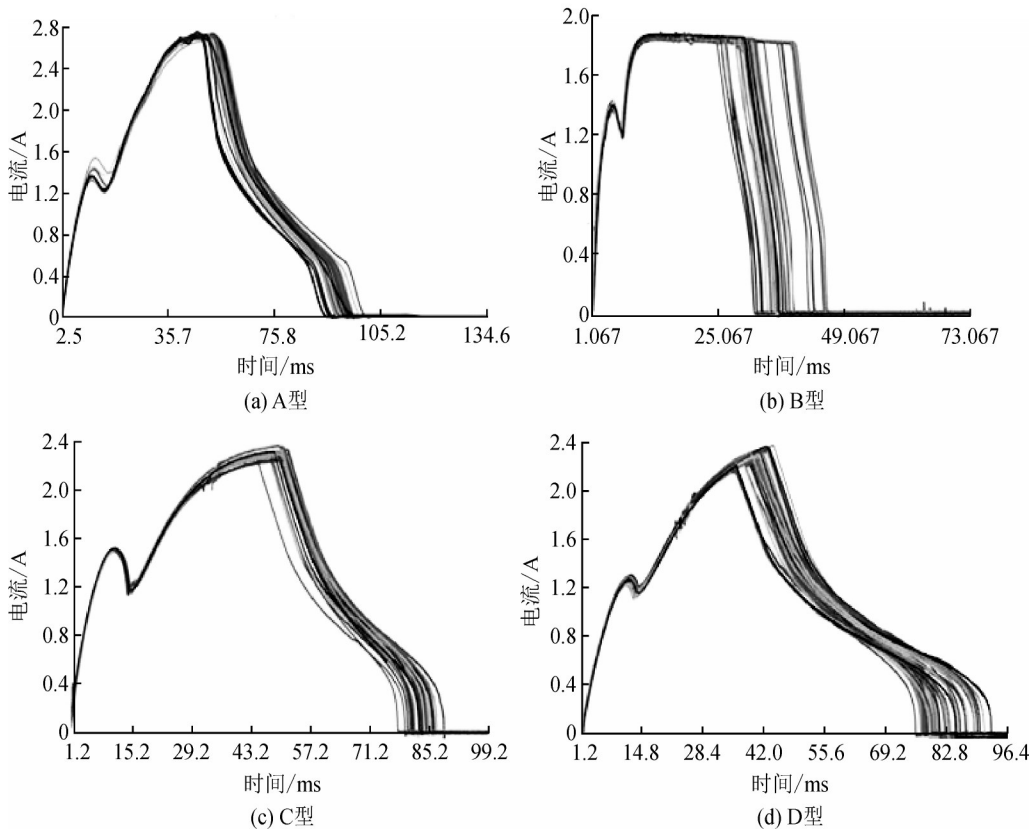


图9 不同分合闸线圈个体在相同工况下的电流波形图

Fig. 9 Current waveforms of different switching coils under the same operating conditions



图10 现场试验平台

Fig. 10 Test platform

I_2 均减小, 稳定电流值 I_3 减小, 峰值时间 t_1 和谷值时间 t_2 有不同程度的变大。同时也应注意到, 对于实验中的分闸线圈, 当串联电阻增大到一定值后, 在达到峰值 I_1 前会出现一段电流波动, 电阻越大波动越明显, 这与电流减小铁心的运动情况相关, 在根据分合闸线圈电流评价机构状态的算法中要考虑到这种情况以免产生误判。

3.2 铁心间隙变短

在断路器的实际运行中, 铁心的间隙变化多是

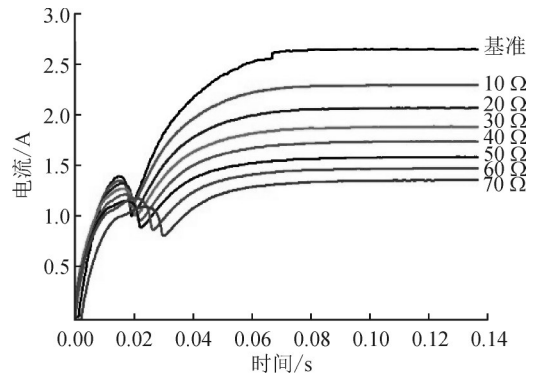


图11 分合闸线圈回路接触不良时线圈电流波形

Fig. 11 Coil current waveforms when opening and closing coil circuit is in loose contact

由于生锈等使得铁心运动距离变短, 因此采用在断路器铁心间隙处加垫铜片来模拟间隙变化。对于实验断路器, 合闸正常间隙为 4 mm, 通过垫铜片改变间隙距离分别为 3.5、3、2.5 mm (到 2.5 mm 无法合闸), 进行合闸操作, 实验结果见图 12。

随着铁心间隙变短, 分合闸线圈电流波形变化规律如下: 第一个电流峰值 I_1 和峰值时间 t_1 和稳定电流值 I_3 基本不变, 电流谷值 I_2 变大峰值时间 t_2 变小, 即 I_1-I_2 和 t_2-t_1 变小。当在无法合闸的情况下 (间隙 2.5 mm), 电流曲线接近于一条直线。在铁心间隙变小的缺陷情况下, 在初期铁心运动的状态相同,

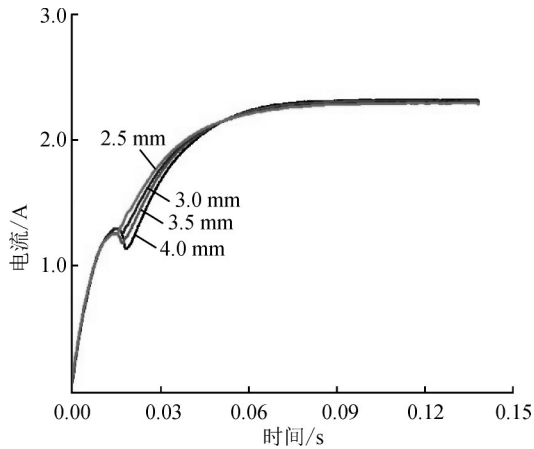


图 12 铁心间隙变短时线圈电流波形

Fig. 12 Coil current waveforms when the core gap decreases

所以 I_1 和 t_1 基本不变;但由于铁心运动加速的距离变短,碰到顶杆的时间变短,因此造成电流谷值 I_2 变大峰值时间 t_2 变小,稳定电流值 I_3 只与回路电阻相关而保持不变。

3.3 铁心卡涩

通过改变不同力值的弹簧来模拟铁心卡涩故障。实验用断路器正常情况下铁心弹簧的力值 30 N,实验中分别更换为 60、90、120、150 N 的弹簧,进行合闸操作并测量电流,结果见图 13、14。

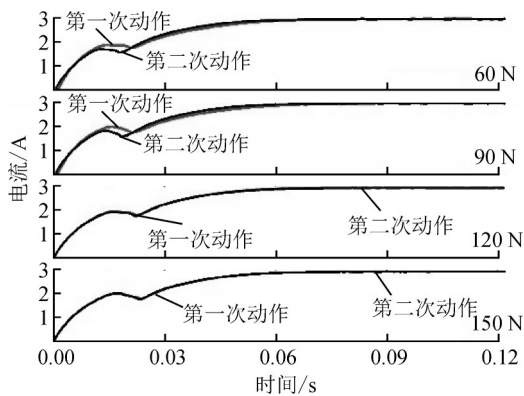


图 13 在不同弹簧压力下断路器第 1、2 次动作时的线圈电流波形

Fig. 13 Coil current waveforms during the first and second action under different pressures

从结果中可以看到,在弹簧压力为 60 N 和 90 N 的情况下,第一次动作的电流明显不同于后面几次的动作电流, I_1 和 t_1 更大,说明第一次动作的阻力更大,证明机构长时间不动后第一次动作更容易出现卡涩故障。当弹簧阻力增大到更大 120 N 和 150 N,第一次和后面几次动作电流差别不大。随着阻力增加,电流曲线第一次峰值和谷值均以及达到峰值和谷值的时间均变大,即 I_1 , I_2 , t_1 和 t_2 均增大,说明卡涩使铁心运动受阻。

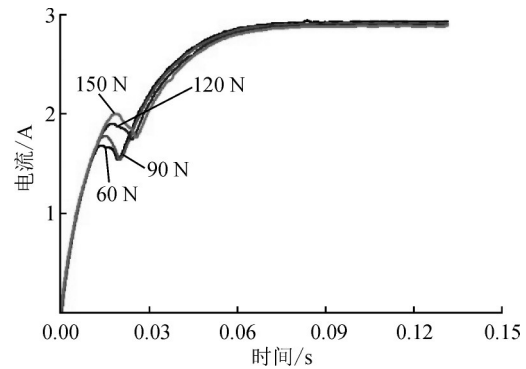


图 14 铁心卡涩时线圈电流波形

Fig. 14 Coil current waveforms when iron core blocks

3.4 线圈匝间短路

线圈匝间断路实验,通过采用不同匝数的线圈进行缺陷模拟,实验用断路器正常线圈 1 900 匝,分别采用 1 700、1 500、1 200、1 000 匝的线圈进行合闸操作,测量结果见图 15。

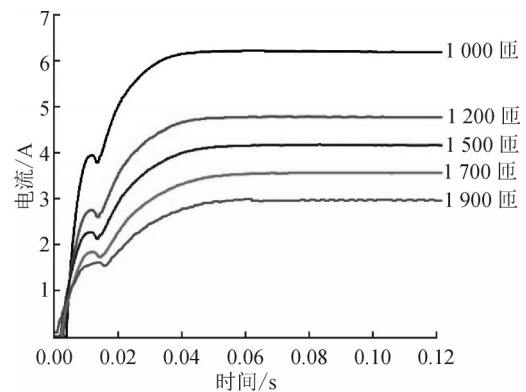


图 15 线圈匝间短路时线圈电流波形

Fig. 15 Coil current waveforms with inter-turn short circuit faults

虽然实际匝间短路不仅有匝数的变化,还有电感,电阻等的变化,直接更换匝数更少的线圈无法完全对应实际情况,但也能够反映匝间短路后,线圈电流的主要变化。实验结果表明随着线圈匝数减少, I_1 , I_2 和 I_3 均变大, t_1 和 t_2 略微减小,曲线的上升斜率明显增加。

通过在实际断路器上的缺陷和故障模拟,表明不同缺陷下分合闸线圈电流特征具有明显的差异,证明了利用线圈电流进行断路器缺陷故障定位的可行性。实验中得到,接触不良故障与欠压,匝间短路和过压,线圈电流区别很小,较难区分,而在实际工程应用中,回路欠压和过压状态均可以通过外部的监测手段直接判断,无需通过分合闸电流判断,因此可以排除欠压和过压故障,可以利用分合闸线圈电流定位上述实验中的 4 种故障:接触不良、匝间短路,铁心卡涩和间隙变化。

综上所述,基于分合闸电流波形的断路器机构

状态评估关键在于两点:

1) 获取断路器指纹特征, 排除非故障因素对于分合闸线圈电流的影响。主要手段是通过不同断路器结构参量下的仿真和试验模拟, 收集基于型号的断路器不同结构参量下的分合闸电流波形指纹数据。在型号指纹数据的基础上进行环境参量、工况参量和断路器自身结构参量的修正。

2) 获取断路器正常状态和典型故障状态的分闸线圈电流波形, 建立缺陷故障类型、严重程度与电流曲线变异率的关系, 依据型号评估数据的修正系数和特征参数变异率进行断路器状态判断与故障定位。

4 结语

分合闸线圈电流作为断路器机构状态评估的指标具有易于获取且包含信息丰富的特征, 文中在之前研究的基础上, 进一步分析了断路器分合闸线圈电流波形的差异机制, 选择主流厂商的典型断路器分合闸线圈进行研究。不同环境、工况和断路器结构均会对分合闸电流波形造成较大影响, 断路器的状态评估必须消除这些差异的影响。同时在实际断路器上进行了典型机构故障的模拟, 建立了故障与线圈电流特征变化的关系。据此提出了基于分合闸电流波形的断路器机构状态评估关键点, 对断路器智能化状态评估的实际应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [2] 常广, 张振乾, 王毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 85-90.
CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 85-90.
- [3] DE GRIJP M H B, BEDET J S, HOPKINS R A, et al. Condition monitoring of high voltage circuit breakers[C]//Proceedings of IEEE. AFRICON'96. Stellenbosch, South Africa, IEEE, 1996: 880-885.
- [4] RUNDE R H. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2005, 20(6): 2458-2465.
- [5] 周凯峰, 李海涛, 薛峰, 等. GIS分合闸线圈电流特征分析及故障诊断[J]. 电气自动化, 2017, 39(2): 95-97.
ZHOU Kaifeng, LI Haitao, XUE Feng, et al. Current characteristic analysis and fault diagnosis of breaking/closing coils in GIS[J]. Electrical Automation, 2017, 39(2): 95-97.
- [6] 张永奎, 赵智忠, 冯旭, 等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 37-42.
ZHANG Yongkui, ZHAO Zhizhong, FENG Xu, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 37-42.
- [7] ANDRUSCA M, ADAM M, PANTELIMON R, et al. About diagnosis of circuit breakers[C]//8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania: IEEE, 2013: 1-4.
- [8] 付荣荣, 赵莉华, 荣强, 等. 高压断路器操作机构机械特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 56-62.
FU Rongrong, ZHAO Lihua, RONG Qiang, et al. Study on mechanical characteristics of operating mechanism of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 56-62.
- [9] ZHAO Cheng. On-line monitoring of mechanical characteristics of high voltage circuit breaker[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2002: 23-26.
- [10] 汪洋. 断路器分合闸线圈状态检测及保护系统探究[J]. 电子测试, 2014(24): 27-29.
WANG Yang. The state detection and protection system of circuit breaker off-closing coil[J]. Electronic Test, 2014(24): 27-29.
- [11] 李劲彬, 全江涛, 陈隽. 基于分合闸线圈电流的某换流站开关故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 141-145.
LI Jinbin, QUAN Jiangtao, CHEN Jun. Fault analysis of circuit breaker in a converter station based on switching coil currents[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 141-145.
- [12] 李大卫, 徐党国, 孙云生. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及试验方法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 114-118.
LI Dawei, XU Dangguo, SUN Yunsheng. Mechanical defect diagnosis and testing method of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 114-118.
- [13] 郝爽, 仲林林, 王小华, 等. 基于支持向量机的高压断路器机械状态预测算法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 155-159.
HAO Shuang, ZHONG Linlin, WANG Xiaohua, et al. Mechanical life prognosis of high voltage circuit breaker based on support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 155-159.
- [14] 彭在兴, 王颂, 易林, 等. 基于SVM主成分分析的高压断路器分合闸线圈故障诊断研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 39-46.

- PENG Zaixing, WANG Song, YI Lin, et al. Research on fault diagnosis of high voltage circuit breaker opening/closing coils based on SVM principal component analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7):39-46.
- [15] 赵莉华, 赵茂林, 夏 炜, 等. 基于K-means和SOM混合算法的高压断路器操作机构状态评估[J]. 高压电器, 2020, 56(1):36-42.
- ZHAO Lihua, ZHAO Maolin, XIA Wei, et al. Status assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism based on K-means and SOM hybrid algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):36-42.
- [16] 刘 芹, 彭在兴, 王 颂, 等. 基于随机森林算法的断路器分合闸线圈故障电流曲线识别[J]. 高压电器, 2019, 55(7):93-100.
- LIU Qin, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Fault current curves identification of circuit breaker opening/closing coil based on random forest algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7):93-100.
- [17] RAO Peilei, HUANG Jian, HU Xiaoguang, et al. Testing of circuit breakers using coil current characteristics analysis [C]//IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009: 185-189.
- [18] 李富安. 闭环霍尔电流传感器的设计与测试[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- LI Fu'an. The design and test of closed loop hall current sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [19] 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.
- [20] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K, et al. Datamining of online diagnosed waveforms for probabilistic condition assessment of SF₆ circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3):1354-1362.
- [21] 彭在兴, 王 颂, 刘 芹, 等. 高压断路器分合闸线圈电流采集实验平台与故障模拟实验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7):248-253.
- PENG Zaixing, WANG Song, LIU Qin, et al. Experimental platform of high voltage circuit breaker's opening/closing coil current acquisition and fault simulation experiment research[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 248-253
- [22] 荣命哲, 贾申利, 王小华. 电器设备状态在线监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- RONG Mingzhe, JIA Shenli, WANG Xiaohua. Online monitoring of the states of electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- 张 帅(1992—), 男, 博士, 工程师, 主要从事变电设备状态评估及智能化技术研究。

(上接第164页)

- ure prognostic method based on nonlinear state estimate technique[J]. Computer Science and Application, 2011, 1(3): 103-107.
- [16] 尹 诗, 余忠源, 孟凯峰, 等. 基于非线性状态估计的风电机组变桨控制系统故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(s1):160-165.
- YIN Shi, YU Zhongyuan, MENG Kaifeng, et al. Fault identification of pitch control system of wind turbine based on nonlinear state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(s1): 160-165.
- [17] 常澍平, 郭江龙, 吕玉坤, 等. 非线性状态估计(NSET)建模方法在故障预警系统中的应用[J]. 软件, 2011, 32(7): 57-60.
- CHANG Shuping, GUO Jianglong, LYU Yukun, et al. The application of NSET modeling method in failure prognostic system[J]. Computer Engineering & Software, 2011, 32(7): 57-60.
- [18] 王志强, 王志华, 张秀云, 等. 非线性状态估计法在风电齿轮箱故障预警中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(8):2609-2611.
- WANG Zhiqiang, WANG Zhihua, ZHANG Xiuyun, et al. Fault prediction in gear box of wind turbines based on nonlinear state estimate technology[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(8): 2609-2611.
- [19] GUO P. Wind turbine generator bearing condition monitoring with NEST method[C]//Control and Decision Conference (CCDC). [S.l.]:IEEE, 2012:235-239.
- [20] 李大卫, 徐党国, 孙云生, 等. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及试验方法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8):114-118.
- LI Dawei, XU Dangguo, SUN Yunsheng, et al. Mechanical defect diagnosis and testing method of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 114-118.
- [21] 孙 鹏, 马少华. 电器学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- SUN Peng, MA Shaohua. Electrics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 陈本彬(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子与无线充电、电器智能化技术等。
- 史 昊(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为智能高压开关状态评估技术及故障诊断技术。