

高压断路器机械故障诊断技术

杨景刚¹, 刘媛¹, 高山¹, 陈曦²

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103; 江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏南京 210008)

摘要: 高压断路器安全可靠运行具有十分重要的工程意义。文中在调研高压断路器常见机械故障类型的基础上, 探讨了不同故障产生的原因。评述了目前国内外高压断路器机械故障诊断技术, 从机械故障特征量的提取以及故障识别的角度, 对其进行了深入的分析。最后综合高压断路器机械故障诊断技术发展现状, 指出了目前机械故障诊断急需解决的问题及其发展方向。

关键词: 断路器; 机械特性; 故障诊断; 特征量提取; 故障识别

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)02-0001-06

高压断路器指额定电压等级在 12 kV 及以上的断路器。在电力系统中一般指 110 kV 以上的输配电断路器, 是电力系统中关键设备之一。作为灭弧和开断线路的装置, 高压断路器肩负着控制和保护双重任务, 其电气动作也最为频繁^[1]。因此, 保证其安全可靠运行具有十分重要的工程意义^[2]。目前最常见的是真空断路器和 SF₆ 断路器^[3]。根据国际大电网会议(CIGRE)关于高压断路器可靠性三次世界范围内调查的结果, 机械故障占断路器故障总数 48% 左右^[4-6]。与变压器、发电机等其他电力设备相比, 断路器的机械故障诊断起步较晚, 因此加强机械故障诊断和机械状态监测研究, 尽量提前发现潜在故障, 对提高高压断路器的可靠性, 增强电力系统的安全性、可靠性和经济性, 建设坚强智能电网意义重大^[7,8]。常见的断路器机械故障类型有拒分、拒合、误分、误合等, 在操动机构和传动机构上具体表现为机构卡涩, 部件变形, 位移或损坏, 分合松动, 卡涩, 轴销松断, 脱扣失灵等。高压断路器动作过程中的动触头的行程—时间信号、线圈电流信号以及机械振动信号蕴含着许多重要的状态信息。工程实际中可通过监测断路器动作过程中的各种信号, 来识别其机械故障及机械状态。近年来, 国内外学者对动触头行程—时间特性曲线、线圈电流曲线以及机械振动信号曲线的状态分析进行了大量研究, 并取得了很多有价值的成果。西安交通大学的宋政湘^[9]设计开发了一套基于振动的断路器状态检测系统, 利用 VC++ 和 LabVIEW 开发了数据采集、截取与分析软件, 计算振动信号的信息熵向量作为故障诊断特征向量, 利用支持向量机实现故障诊断。浙江大学的安涛^[10]建立了断路器操动机构的动力学模型, 以仿真和实验手段建立了故障原因与特征量之间的对应关系。重庆大学的邓帮飞^[11]综合利用断路器的行程—时间特性和分合闸振动信号进行

监测, 从多角度实现高压断路器的故障模式识别。但是不可否认, 现有诊断方法的诊断效率与准确率普遍较低, 还没有能在工程实际中广泛应用的成功案例。在我国建设坚强智能电网的大背景下, 设备智能化水平亟待提高, 如何综合利用各种诊断方法很好地解决高压断路器机械故障诊断与机械状态监测问题更加凸显。

1 断路器机械故障及其产生原因

高压断路器机械状态十分复杂, 某一种故障对应了机构的多种状态特征; 同时, 机构的某一状态特征发生变化对应的故障原因或故障点也不可能是惟一的。从传动机构到操作机构故障, 从部件松动到润滑失效均会导致机械故障。常见的操动机构有电磁操动机构、弹簧操动机构以及液压操动机构。不同操作机构失效现象大致可分为拒动和误动两大类, 根据实际操作经验和理论分析结果, 将电磁操动机构、弹簧操动机构以及液压操动机构断路器故障类型分类详述。

1.1 电磁操动机构断路器故障分类

电磁操动机构断路器异常现象可分为拒合和拒分两类, 误动包括合后即分和无信号自分 2 类。

1.1.1 拒动

(1) 拒合。① 铁心不启动。二次回路连接松动; 辅助开关未切换或者接触不良; 直流接触器接点被灭弧罩卡住或者接触器吸铁被异物卡住; 熔丝熔断; 直流接触器电磁线圈断线或烧损; 合闸线圈引线断线或线圈烧损; 2 个线圈极性接反; 合闸铁心卡住均导致铁心不启动。② 铁心不启动, 连扳机构不动作。合闸线圈通流时端子电压太低; 辅助开关调整不当过早切断电源; 合闸维持支架复归间隙太小或未复位; 合闸脱扣机构未复归锁住; 滚轮轴合闸后扣入支架深度少或端面磨损变形扣不牢; 合闸铁心空行程小, 冲力不够; 合闸线圈有层间短路; 开关本体传动机构卡涩等故障均导致铁心不启动, 连扳机构不动作。

(2) 拒分。① 铁心不启动。二次回路连接松动或接触不良;辅助开关未切换或接触不良;熔丝熔断;铁心卡住;线圈断线或烧损;2个线圈极性接反等均能够导致铁心不启动。② 铁心启动,脱扣板未动。铁心行程不足;脱扣板扣入深度太深;线路内部有层间短路等均能导致铁心启动,脱扣板不动。③ 脱扣板已启动。机构或本体传动机构卡涩。

1.1.2 误动

(1) 合后即分。合闸维持支架复位太慢或断面变形;滚轮轴扣入支架深度太少;分闸脱扣板未复归,机构空合;脱扣板扣入深度太少,未扣牢;二次回路有混线,合闸时分闸回路有电;合闸限位止钉无间隙或合闸弹簧缓冲器无缓冲间隙。

(2) 无信号自分。分闸回路绝缘有损坏造成直流两点接地;扣入深度小,扣合面磨损变形;分闸电磁铁最低动作电压太低;继电器接点因振动误闭合等会导致电磁操动机构误动,无信号自分。

1.2 弹簧操动机构断路器故障分类

弹簧操动机构断路器异常现象可分为拒合和拒分2类,误动包括储能后自动合闸、无信号自分、合后即分3类。

1.2.1 拒动

(1) 拒合。① 铁心不启动。二次回路接触不良,连接螺丝松动;熔丝熔断;辅助开关接触不良或未切断;线圈断线或烧损;铁心卡住等故障均能导致铁心不启动,弹簧操动机构拒合。② 铁心已启动,四连杆不动作。线圈端子电压太低;铁心运动受阻;铁心撞杆变形,受力过“死点”距离太大;合闸锁扣扣入牵引杆深度太大;扣合面硬度不够变形,摩擦力大以至于“咬死”等故障均能导致铁心启动,四连杆不动作,弹簧操动机构拒合。③ 四连杆动作,牵引杆不释放。牵引杆过“死点”距离太小或未出“死区”;机构或本体有严重机械卡涩;四连杆中间轴过“死点”距离太小;四连杆受扭变形等均会导致拒合。

(2) 拒分。① 铁心不启动。熔丝熔断;二次回路连接松动,接点接触不良;线圈烧坏或断线,尤其引线容易折断;铁心卡住等均能导致铁心不启动,操动机构拒分。② 铁心已启动,锁钩或分闸四连杆未释放。线圈端子电压太低;铁心空程小,冲力不足或铁心运动受阻会导致铁心启动,锁钩或分闸四连杆不释放,以至于操动机构拒分。③ 锁钩或四连杆动作,但机构连板系统不动。机构或本体严重机械卡涩会导致锁钩或四连杆动作,但机构连板系统不动以至于操动机构拒分。

1.2.2 误动

(1) 储能后自动合闸。合闸四连杆受力过“死点”

距离太小;四连杆未复位,可能复归弹簧变形或整劲;扣入深度少或扣合面变形;锁扣支架支撑螺栓未拧紧或松动;L形锁扣变形锁不住;马达电源未及时切换;牵引杆越过“死点”距离太大撞击力太大等会导致储能后自动合闸以至于操动机构误动。

(2) 无信号自分。二次回路有混线,分闸回路两点接地;分闸锁钩扣入深度太少,或分闸四连杆中间轴过“死点”距离太小,或锁钩端部变形扣不牢;分闸电磁铁最低动作电压太低;继电器接点闭合等故障会导致无信号自分以至于操动机构误动。

(3) 合后即分。二次回路有混线,合闸时分闸回路有电;分闸锁钩扣入深度太少,或分闸四连杆中间轴过“死点”距离太小,或锁钩端部变形,扣合不稳定;分闸锁钩不受力时复归间隙太大;分闸锁钩或分闸四连杆未复位等故障会导致合后即分以至于操动机构误动。

2 断路器机械故障检测方法

高压断路器的操作过程伴随着一系列的机械、电气、振动、声音等信号,这些信号信息包含了整个断路器的运行状态。通过分析不同状态的机械、振动、声音和电气信号可以判断断路器的运行状况,对断路器的运行状态进行诊断。根据国家有关标准,高压断路器设备机械特性参数包括:分闸时间、合闸时间、分闸同期性、合闸同期性、开距、超程、刚分(合)速度、平均速度和最大速度等。高压断路器机械特性在线检测研究方法主要有行程—时间检测法、分合闸线圈电流检测法、振动信号检测法。最近一些研究将几种检测方法结合,综合对高压断路器进行故障诊断并取得了比较理想的效果,如华北电力大学李建鹏等利用振声联合诊断方法并结合支持向量机法对高压断路器故障诊断进行了初步探索^[12]。

2.1 行程—时间检测法

行程—时间特性曲线是表征高压断路器机械特性的重要参数,典型合闸行程—时间特性曲线如图1所示。根据动触头的行程—时间特性曲线再结合其他参数,可以获得其他机械动作的参数,如动触头合、分闸操作的运动时间、动触头行程、动触头的刚分速度和刚合速度及动触头运动的平均速度和最大速度以及速度—时间曲线等。

动触头是记录断路器分合闸操作最为直接的手段。目前工程中通常采用直线式光电编行程—时间特性曲线编码器或者增量式旋转光电编码器。将直线式光电编码器安装在断路器做直线运动的机械传动机构连杆上,旋转式光电编码器安装在断路器机械操动机构的转动轴上,采集传感器测量数据,分析得到行

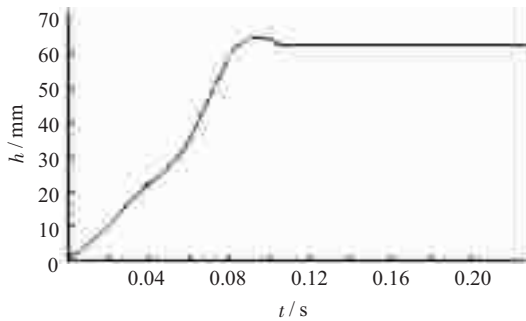


图1 典型合闸行程—时间特性曲线

程—时间特性曲线。对比2种光电编码器特点,旋转式光电编码器质量轻,力矩小,可靠性较高,因此应用范围更广^[13]。行程—时间检测法利用断路器机构的运动轨迹,比较理想地完成了高压断路器机械特性的检测任务。但该方法利用信息较少,并且检测结果准确性受现场安装情况影响较大。

2.2 分合闸线圈电流检测法

当分合闸线圈中通过电流时,电磁铁产生磁通,在电磁力作用下完成断路器的分合闸操作。线圈中的电流波形能够反映电磁铁本身和其控制的锁门或阀门以及连锁触头在操动过程中的工作情况,通过监测分合闸线圈中电流随时间的连续变化,可获得二次操作回路的状态。典型开关分(合)闸线圈电流波形如图2所示。根据分合闸线圈电流特性波形和铁心运动过程的对应关系,能够判断断路器操动机构的运行状态如:分合闸时间、分合闸速度、三相不同期性等一系列机械状态特性参数^[14]。

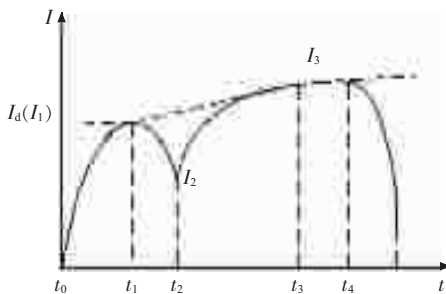


图2 典型开关分(合)闸线圈电流波形

分合闸线圈电流检测法原理简单,较好地实现了机械状态的在线监测。但也存在相应不足:首先,电流信号采集环节受放电、磁场等影响较大,该方法实现在线监测必须要有效果非常好的屏蔽装置。其次,反映故障类型有限。主要反映集中在铁心上的机械故障,不能反映其他的机械故障问题。

2.3 振动信号检测法

高压断路器分合闸时,机械操作机构发出的机械振动信号中包含着大量状态信息,通过合适的振动传感器和先进的信号处理方法能够分析出整个分合闸过程以及断路器的运行状态^[15]。相比分合闸线圈电流检

测法,振动信号检测法测量不涉及电气量,不受电磁场干扰。传感器安装于断路器外部,对断路器无任何影响,并且振动传感器尺寸小,工作可靠,价格低廉,灵敏度高。断路器操作是瞬时性动作,动作时间短暂且无周期性,同时不同振动信号之间也具有很大随机性,因此要求监测过程采样频率很高。由于信号处理分析过程较为复杂困难,目前学术界尚无较为完善的分析处理方法很好地解决断路器机械特性的精确在线测量和诊断问题。振动信号在线监测法的研究,国内外均处于积累数据和探索分析阶段,尚无成熟产品问世。振动信号检测法充分利用整个分合闸过程的信息,前景巨大,将成为高压断路器机械状态监测和诊断最有前途的方法之一。

3 机械故障特征量

在行程—时间检测法和分合闸线圈电流检测法中,根据行程—时间特性曲线和分合闸线圈电流特性波形对应操作时刻,还原断路器运行过程,进行故障诊断。在振动信号检测法中,对振动信号进行进一步数学处理,提取出具有明确物理意义特征参量,参考阈值范围进行诊断。

3.1 速度—行程特征参数

在行程—时间特性曲线中,需要首先确定操作动作在行程—时间特性曲线中的位置,进而得到时间参数,根据位移参数和时间参数计算得到所有机械特性参数。动触头刚合、刚分的换位点信号是机械特性测试过程中的重要信号之一,也是计算机特性其他参数的前提条件。通常忽略预击穿时间,合闸的换位点取主回路最后一相电流出现的时刻,分闸换位点的确定根据合闸时测得的超行程来修正。

3.2 不同阶段线圈电流特征

在分合闸线圈电流检测法中,合分闸电流曲线分为5个阶段,如图2所示。第一阶段 $t_0 \sim t_1$ 电流呈指数上升,铁心静止。此阶段时间与控制电源电压及线圈电阻有关,电流可以反映线圈的状态。第二阶段 $t_1 \sim t_2$ 铁心运动,电流下降。可以反映铁心运动结构有无卡涩,脱扣等机械负载变动的情况。从第二阶段结束点开始是整个动触头运动过程。第三阶段 $t_2 \sim t_3$ 铁心停止运动,电流又呈指数上升。第四阶段 $t_3 \sim t_4$ 电流达到近似的稳态。第五阶段 $t_4 \sim t_5$ 在辅助开关触头间产生电弧并被拉长,电弧电压快速升高,迫使电流迅速减小,直到熄灭。5个阶段电流变化反映整个机械操作系统的运行情况。分析可得操动机构的启动时间、线圈通电时间^[16]。对比断路器自身参数范围,判断操动机构是否已有铁心空行程、弹簧卡涩等故障。

3.3 振动信号特征

振动信号检测法测得的振动信号通过时域法、频域法、时频法以及数据序列法等处理之后,可以提取出具有明确物理意义特征参量,如时间信息、频率信息,也可以得到分形维数、信息熵等表征数据序列本质特征的其他指标。

(1) 时域法。时域法从时域振动信号中获取振动发生时刻、振动幅值及其他表示时域波形变化的指标作为特征参数^[17,18]。时域法中常用包络分析(Envelope Analysis)和短时能量法(Short Time Energy)对振动信号进行处理。包络分析可以获得线圈动作、触头接触、缓冲动作等振动的时刻和振动剧烈程度,并可与谱分析、小波分析等方法结合使用,从时间分辨率较好分量的包络谱中提取时间信息,通过与标准值比较来判断断路器的机械状态。短时能量法对时域信号序列的平方变换进行窗函数滤波,得到能量函数序列再进行后续分析。短时能量法相较于中值滤波法、包络分析等传统方法,具有更高的信噪比,可获得较高精度的振动事件起始时刻信息。通过测量各相断路器的振动信号,选择合适的窗函数,采用短时能量法可获得断路器的合闸同期性与合闸时刻等状态参数,且该方法受承载电流的影响很小。

(2) 频域法。频域法通过时频转换将时域振动信号转换成频域信号,通过频域信号的分布和变化判定机械故障的类型和程度。频域法通常包括包络谱分析(Envelope Spectrum)、细化频谱分析(Zoom Spectrum Analysis)和模态分析(Modal Analysis)等方法。细化频谱分析能提高常规傅里叶变换频率分辨率。对快速傅里叶变换进行细化或线性调频 Z 变换,进而将线性调频 Z 变换应用到断路器振动信号分析中,有助于提高断路器振动信号频域分辨率。固有频率、阻尼比以及振型等模态量表征机械结构的固有振动特性,将模态变量和线圈电流、接触电阻、触头行程等变量信息结合,对机械故障进行诊断,可以收到较好效果。

(3) 时频法。时频法同时提取时域振动信号的时间和频率信息,并依据其时频分布等特性进行故障诊断,特别适合于对非平稳信号的分析。包括短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform,)、小波分析(Wavelet Transform)、小波包分析(Wavelet Packet Decomposition)、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition)、希尔伯特变换(Hilbert Transform)、振荡子波分解等方法。

短时傅里叶变换通常将信号的短时谱、短时功率谱等作为特征向量。小波变换(Wavelet Transform)在机械振动在线检测的早期应用研究中,将小波变换的模极大值及其时间作为特征量^[19]。后来相关学者利用

振动信号小波分解各尺度上的奇异性来获得其包络的奇异性指数,将奇异性指数作为特征参数来进行故障的识别^[20]。小波包分析相比小波分析在全频段上都能保持高分辨率,其应用更广,且一般选定节点的系数幅值的分布^[21]、组合节点的系数幅值^[22]、选定频带的能量分布^[23,24]、对数能量分布^[25]、各频带的能量熵^[26]或其包络的能量熵^[27]、信号的多维熵带^[28]作为特征向量。经验模态分解法抽取或重构振动信号,再通过包络谱分析^[29]、希尔伯特谱的能量熵^[30]或固有模态分量的能量熵^[31]等参数构造断路器振动诊断的特征量。断路器振动信号的希尔伯特谱很好地表征了其时频分布特性,也可作为故障诊断的依据。

(4) 数据序列法。数据序列法一般采取积分参数法、分形方法、信息熵和相空间重构等手段从数据序列提取出表征数据本质特征的数学模型或数值。积分参数法利用合适的函数拟合积分曲线,将积分曲线参数化,得到的积分参数可以作为区分断路器状态的特征向量^[32]。文献[33]和文献[34]应用分形方法,基于小波变换方法求取振动信号的局部分形维数曲线,作为高压断路器机械机构状态特征量,在故障诊断中具有很好的辨识度;文献[35,36]利用相空间重构方法,以振动信号的关联维数作为特征量对高压断路器进行状态诊断,收到了较为可观的效果。信息熵对数据序列进行处理,得到表征数据复杂程度的数值量。如文献[26]中计算小波包分解各频带的信息熵,文献[30]中的希尔伯特谱图和文献[31]经验模态分解各频带的信息熵等,还可以进一步由奇异值谱熵、功率谱熵、小波状态空间特征熵、小波能量谱熵共同构成谱熵带^[37]。相空间重构理论认为系统的一个观察量可以重构系统的等价相空间^[38]。通常采取 Takens 延迟嵌入方法,通过自相关函数法确定步长;不断调整嵌入维数以至关联维数趋于稳定。多次试验表明,不同机械状态下的相空间关联维数基本趋于相应的固定值,可作为特征量^[39]。

4 故障识别方法

故障识别针对机械故障特征量对系统状态进行判断。有基于规则、基于模型和基于案例3种思路^[41]。基于规则的方法需要根据实际经验积累进行判断,由于目前高压断路器振动诊断研究尚处于初级阶段,因此使用较少。基于模型的方法从故障机理出发进行诊断,由于高压断路器涉及多学科交叉知识,应用较为有限。基于案例的方法通过对比待诊断系统的特征与已有典型案例特征进行状态分类,从而达到分类或故障诊断的目的,目前应用最多,一般分为传统的基于统计的方法和人工智能算法2类。

传统的基于统计的方法有分辨率系数法(Resolution

Ratio)、协方差法(Covariance)、偏差校验法(Variation of Chi Square Test)、动态时间规整法(Dynamic Time Warping)等^[42]。分辨系数法中,待检向量与基准向量距离、参考向量与基准向量距离之比为辨识系数,辨识系数越大则待检状态偏离参考状态越远。需参考多次实验结果,来确定合适的阈值^[42,43]。协方差法中,当选定频带能量作为特征向量时,不同合闸周期性状态的特征向量在特征平面的分布具有明显界限^[44,45]。以振动信号的方差和协方差为坐标,不同状态下坐标各自归类到不同区域,可用于故障识别。利用标准偏差信号对待检验信号与标准信号的;进行归一化即偏差检测,用以判别待检验信号与标准信号的吻合度。一般首先对信号就行包络分析,对断路器振动信号的离散包络统计、短时功率谱进行包络处理,分别计算其检验值,通过阈值范围进行状态诊断^[15]。动态时间规整法利用动态规整函数对比2个数据序列之间相似性。一般以正常状态下振动信号作基准,待检验信号与基准之间通过动态时间规整进行比较,通过其幅值、时间、谱和频率等参量偏离标基准的程度估计断路器状态^[46,47]。

人工智能算法包括人工神经网络(Artificial Neural Network)、支持向量机(Support Vector Machine)、人工免疫网络(Artificial Immune Network)等^[42]。神经网络具有较好的容错能力和泛化性能,但存在局部收敛问题。可选用的网络类型有自组织映射网络(Self Organizing Map)^[48]、误差反向传播网络(Error Back Propagation)^[30]、径向基函数网络(Radial Basis Function)^[49]等。首先对网络进行训练,得到分类器,或者将径向基函数网络预测结果与实测信号的偏差来做诊断^[50]。支持向量机是一种基于统计学习理论的分类算法,具有较小的经验风险和置信范围,适合小样本分类问题。选取合适的核函数,将样本通过核函数映射到高维特征空间,在特征空间中寻找最优分类超平面对样本进行分类。如将小波包分解的组合节点系数幅值^[22]、各频带包络的能量熵^[51,52]等特征向量输入支持向量机,采用“一对其余”策略进行多状态分类,能得到较为满意的识别效果。人工免疫网络模拟生物免疫系统行为,具有较强的学习能力和鲁棒性。文献^[53]将人工免疫网络记忆分类器(Artificial Immune Network Memory Classifier)引入断路器机械状态的估计,为断路器振动诊断的研究提供了一种新思路。文献^[54]构造了在线自学习的免疫分类网络C-aiNet,能辨识未知的断路器故障类别。

5 结束语

目前高压断路器机械状态在线诊断的研究先后经历了行程—时间检测法和分合闸线圈电流检测法以及

目前研究较多的振动信号检测法。已经取得了一定突破性进展,然而目前对断路器机械状态在线监测及故障诊断技术大多基于某种单一特征量的监测结果,很少对比分析不同种类状态信号的特征并作综合评判。因此目前的在线检测技术存在以下问题:

(1) 传感器对高压断路器安装适应性问题。不同电压等级和不同操动机构的断路器所选择的传感器类型不一样,亟待规范传感器的类型以适应高压断路器的实际运行。

(2) 故障类型的具体化问题。以往在线监测装置对机械运动的过程关心不多,目前一些在线监测模块也可测量合、分闸时动触头的行程特性曲线。但只能对机构状态做出好或坏判断,不能具体判断故障位置。

(3) 数据处理的问题。尤其体现在振动信号检测法中,由于振动信号的特殊性,目前信号处理技术已经成为制约振动信号检测法发展的关键技术。

(4) 在线监测装置模块寿命过短,安装维护困难,价格过高而精度较低。

基于以上分析,从机械信号在线监测装置的实际应用情况看,应从以下角度继续高压断路器的在线检测技术的探索。首先,根据实际运行的高压断路器类型,规范传感器的规格参数,也可降低成本,进一步提高高压断路器在线检测系统的性价比。其次,从高压断路器操作原理出发,进一步明确断路器故障模式,综合多种检测方法,将故障类型具体化,在线检测设备智能化。最后,加强数据处理方法的探索,进一步完善振动信号检测法在高压断路器在线检测中的应用。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节荣,钱家骊,等. 高压断路器原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000:372-374.
- [2] REASON J. Circuit Breakers With On-line Condition Monitoring [J]. Electrical World, 1995, 10(2): 134-138.
- [3] (日)中西帮雄. 现代高压电力断路器[M]. 张义民,译. 北京:电力工业出版社,1982:347-353.
- [4] 宋 泉,崔景春,袁大陆. 2004 年高压开关设备运行统计分析 [J]. 电力设备,2006,07(2):10-14.
- [5] GLINKOWSKI M T, SCHMIDT L, VEVERKA E F. Bibliography of Switchgear Literature [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 03(1): 135-156.
- [6] 吉亚明,周志成,马 勇,等. 真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析[J]. 江苏电机工程,2014,33(2):12-14.
- [7] 常 广,王 毅. 高压断路器机械状态在线监测装置的研究[J]. 高压电器,2003,39(2):44-46.
- [8] 薛 峰,童勤毅,谢夏寅,等. 断路器跳闸脉冲监测系统的研制与应用[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):58-62.
- [9] 潘 徽,宋政湘,牛 博. 基于振动的断路器状态检测系统的设计与开发[J]. 高压电器,2012,12(50):83-88.
- [10] 安 涛. VS1 断路器在线监测与故障诊断系统的研究[M]. 杭

- 州:浙江大学,2010:65-67.
- [11] 邓帮飞. 高压断路器机械特性监测及故障模式识别方法研究[M]. 重庆:重庆大学,2008:133-136.
- [12] 李建鹏. 基于振—声联合分析的高压断路器机械故障诊断研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.
- [13] 王晓波. 基于振动信号的高压真空断路器故障诊断[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [14] 袁金丽,李奎,郭志涛,等. 基于SVM与合分闸线圈电流参数的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2011,47(3):26-30.
- [15] POLYCARPOU A A, SOOM A, SWARNAKER V, et al. Event Timing and Shape Analysis of Vibration Bursts from Power Circuit Breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):848-857.
- [16] 朱鹏,田竞,路灿,等. SF₆断路器在线监测仪的研制[J]. 高压电器,2003,39(3):24-26.
- [17] 沈力,黄瑜琰,钱家骊. 高压断路器机械状态监测的研究[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):113-117.
- [18] 黄瑜琰,钱家骊. 高压断路器机械状态的监测[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(4):79-81.
- [19] 张伟政,杨兰均,张文元. 小波分析在真空断路器机械振动信号分析中的应用[J]. 高压电器,1997(6):19-22.
- [20] 胡晓光,戴景民,纪延超,等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2001,21(5):67-70.
- [21] LEE D S S, LITHGOW B J, MORRISON R E. New Fault Diagnosis of Circuit Breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2):454-459.
- [22] 孙来军,胡晓光,纪延超. 一种基于振动信号的高压断路器故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):157-161.
- [23] HU X G, WANG F, ZHAO H L, et al. The Mechanical Fault Diagnosis for HV Breakers on the Wavelet Packet Analysis[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vail, USA, 2003:415-419.
- [24] 赵海龙,王芳,胡晓光. 小波包—能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2004,28(6):46-48.
- [25] 田涛,陈昊,张建忠,等. 基于智能理论的高压断路器机械故障诊断[J]. 江苏电机工程,2011,33(6):12-15.
- [26] 陈伟根,邓帮飞. 小波包能谱熵与神经网络在断路器故障诊断中的应用[J]. 重庆大学学报,2008,31(7):744-748.
- [27] 孙来军,胡晓光,纪延超,等. 小波包—特征熵在高压断路器故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):62-65.
- [28] LIU M L, SUN L J, ZHEN J J, et al. Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker Based on Multiple Entropy Strips Method[C]. 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Beijing, China, 2011:504-508.
- [29] 张国钢,王宏伟,汤翔,等. 基于EMD方法的高压断路器液压机构振动信号分析[J]. 高压电器,2008,44(3):193-196.
- [30] LU C, HU X G. A New Method of Fault Diagnosis for High-voltage Circuit-breakers Based on Hilbert-Huang Transform[C]. Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Application, Harbin, China, 2007:2697-2701.
- [31] 陈伟根,邓帮飞,杨彬. 基于振动信号经验模态分解及能量熵的高压断路器故障识别[J]. 高压电器,2009,45(2):90-96.
- [32] 杨武,荣命哲,陈德桂,等. 高压断路器操作振动信号处理的一种新方法[J]. 电工电能新技术,2002,21(3):57-61.
- [33] WU Z S, WANG W, YANG X C, et al. A New Processing Method of Mechanical Vibration Signals from High-voltage Circuit Breakers' Monitoring[C]. 8th International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, 2005.
- [34] 吴振升,王玮,杨学昌,等. 基于分形理论的高压断路器机械振动信号处理[J]. 高电压技术,2005,31(6):19-21.
- [35] 孟永鹏,贾申利,成永红. 基于分形的高压断路器机械状态检测[C]. 2006全国电工测试技术学术交流会,哈尔滨,2006:40-46.
- [36] 吴振升,王玮,黄梅,等. 基于相空间重构的高压断路器振动信号特征分析[J]. 现代电力,2006,23(1):10-14.
- [37] LIU M L, SUN L J, ZHEN J, et al. Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker Based on Multiple Entropy Strips Method[C]. 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Beijing, China, 2011:504-508.
- [38] TAKENS F. Detecting Strange Attractors in Turbulence[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1981(898):366-383.
- [39] 吴振升,王玮,黄梅,等. 基于相空间重构的高压断路器振动信号特征分析[J]. 现代电力,2006,23(1):10-14.
- [40] STANEK M, MORARI M, FROHLICH K. Model-aided Diagnosis: an Inexpensive Combination of Model-based and Case-based Condition Assessment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews,2001,31(2):137-145.
- [41] 关永刚,黄瑜琰,钱家骊,等. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高电压技术,2000,26(3):66-68.
- [42] 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.
- [43] 宋锦刚. 基于振动信号小波包提取和相似性原则的高压开关设备振动监测[J]. 电网技术,2010,34(4):189-193.
- [44] 孟永鹏,贾申利,荣命哲. 小波包频带能量分解在断路器机械状态监测中的应用[J]. 西安交通大学学报,2004,38(10):1013-1017.
- [45] 朴吉兴,朱鹏,徐国政,等. 高压断路器电磁铁动作特性的实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(10):1669-1672.
- [46] RUNDE M, OTTESEN GE, SKYBERG B, et al. Vibration Analysis for Diagnostic Testing of Circuit-breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4):1816-1823.
- [47] HOIDALEN HK, RUNDE M. Continuous Monitoring of Circuit Breakers Using Vibration Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4):2458-2465.
- [48] KANG P J, BIRTHWHISTLE D, KHOUZAM K. Transient Signal Analysis and Classification for Condition Monitoring of Power Switching Equipment Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks[J]. Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia, 1998:73-79.

- [7] 王鹏飞,张英敏,李兴源,等.基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):74-78,85.
- [8] 赵森林,王永平,李林,等.青海—西藏±400 kV 直流联网工程的控制保护策略优化.电力系统自动化,2013,37(9):129-133.
- [9] 梁少华,夏尚学,霍超,等.青藏直流稳控与极控系统的接口及协调控制方法[J].电力系统自动化,2014,38(8):125-128.
- [10] 吴林平,张庆武,王俊生,等.高压直流工程中交直流系统协调控制接口方式[J].南方电网技术,2011,05(2):22-25.

作者简介:

- 李林(1980),男,安徽太和人,工程师,研究方向为高压直流输电控制技术;
- 赵文强(1985),男,湖北鄂州人,工程师,研究方向为高压直流输电控制技术;
- 刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定;
- 汪成根(1981),男,安徽桐城人,工程师,研究方向为电力系统安全稳定。

Design of Runback Strategy for HVDC System with Weak System at Sending end

LI Lin¹, ZHAO Wenqiang¹, LIU Jiankun², WANG Chenggen²

(1.Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: When the AC system connected with the sending end of HVDC power transmission system is a weak system, the modulation function of HVDC plays an important role. The HVDC system is an important means of modulation for stability control system. In the case of large power loss in the sending end, the stability control system needs to reduce the power HVDC delivered. Because of the minimum operating power limit of the HVDC system, when the power needed to reduce is greater than the maximum power which can be reduced, even if the power HVDC delivered runback to minimum operating power, it is still not enough and can lead to cutting off load in the sending system. In order to avoid cutting off load in the sending end, the modulation strategy for the condition that HVDC bipolar runback is not enough is proposed. The interface mode and information exchange between HVDC and stability control system are designed, and the HVDC control system program is developed. The proposed strategy and developed interface have been verified in RTDS. The simulation results show that the strategy is practical and effective. This research provides a reference for future similar projects.

Key words: HVDC; weak sending end; stability control system; runback; interface

(上接第6页)

- [49] 陈伟根,范海炉,王有元,等.基于小波能量与神经网络的断路器振动信号识别方法[J].电力自动化设备,2008,28(2):29-32.
- [50] 胡晓光,齐明,纪延超,等.基于径向基函数网络的高压断路器在线监测和故障诊断[J].电网技术,2001,25(8):41-44.
- [51] 孙来军,胡晓光,纪延超.基于支持向量机的高压断路器机械状态分类[J].电工技术学报,2006,21(8):53-58.
- [52] 黄建,胡晓光,巩玉楠.基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2011,31(12):108-113.
- [53] LU C, HU X G. Classification of Mechanical Conditions for HVCBs Based on Artificial Immune Network [C]. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapo-

re, 2008:2373-2377.

- [54] 吕超,于洪海,王立欣.基于人工免疫网络的断路器在线自主学习故障诊断[J].中国电机工程学报,2009,29(34):128-134.

作者简介:

- 杨景刚(1984),男,陕西咸阳人,高级工程师,从事全过程技术监督与开关类设备专业技术管理工作;
- 刘媛(1989),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作;
- 高山(1971),男,江苏盐城人,高级工程师,从事全过程技术监督与开关类设备专业技术管理工作;
- 陈曦(1988),男,辽宁锦州人,硕士研究生,从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作。

Review on Mechanical Fault Diagnosis of High-voltage Circuit Breakers

YANG Jinggang¹, LIU Yuan¹, GAO Shan¹, CHEN Xi²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: The safe and reliable operation of high-voltage circuit breaker is of great significance. In this paper, the survey of mechanical fault types and fault reasons of high-voltage circuit breaker is introduced. Then the mechanical fault diagnosis methods of high-voltage circuit breaker are discussed. Furthermore, the deep analyses are carried out on the mechanical fault characteristic quantity extraction and mechanical fault identification method. According to the development of high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis methods, the key problems and development tendency are pointed out.

Key words: circuit breaker; mechanical characteristics; fault diagnosis; characteristic quantity extraction; fault identification