



文章编号:1671-251X(2016)12-0019-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.12.005

赵洋. 高压真空断路器机械特性在线监测技术研究现状与展望[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 19-24.

高压真空断路器机械特性在线 监测技术研究现状与展望

赵洋

(东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要:介绍了高压真空断路器机械特性在线监测技术的基本内容,阐述了现有各种在线监测的具体方法,详细分析了各种振动信号分析方法及其适用范围,展望了高压真空断路器机械特性在线监测技术的发展趋势。

关键词:高压真空断路器;机械特性;在线监测;信号分析

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2016-12-01 09:57

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20161201.0957.004.html>

Research status and expectation of on-line monitoring technologies of mechanical characteristics of high-voltage vacuum circuit breaker

ZHAO Yang

(College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: Basic contents of on-line monitoring technologies of mechanical characteristics of high-voltage vacuum circuit breaker were introduced, and various kinds of methods of on-line monitoring were reviewed. Various analysis methods and application ranges of vibration signal were analyzed in details. The development tendency of on-line monitoring technologies of mechanical characteristics of high-voltage vacuum circuit breaker was expected.

Key words: high-voltage vacuum circuit breaker; mechanical characteristics; on-line monitoring; signal analysis

0 引言

高压断路器是指应用于电力系统中 3 kV 及以上的断路器,是电力线路中重要的控制和保护电器。在系统正常运行时,可开断、关合及承载运行线路的正常电流;当设备或线路发生故障时,能在规定时间内快速切除过载或短路电流,保证无故障部分正常运行^[1]。高压断路器运行的可靠性直接关系到整个电力系统的安全运行^[2-3]。

高压断路器按照灭弧原理进行分类,有油断路器、压缩空气断路器、SF₆ 断路器、真空断路器、磁吹断路器等。目前应用最多的为真空断路器和 SF₆ 断路器^[1]。

高压真空断路器的硬件主要包括真空灭弧室、操动机构、支架等。其中操动机构是保证高压真空断路器长期动作可靠性的重要部件。据 CIGRE(国际大电网会议)先后多次对高压断路器故障类型的调查显示,80%故障属机械故障^[3-4]。因而,对高压

收稿日期:2016-06-27;修回日期:2016-09-12;责任编辑:张强。

作者简介:赵洋(1981—),男,山西太原人,副教授,博士,研究方向为储能系统建模与仿真、新能源发电技术及应用等,E-mail:simonzhaoyang@163.com。

真空断路器机械特性进行在线监测,对监测数据进行深入分析并对可能发生的故障进行预判,进而为实现高压真空断路器的状态检修提供数据支撑,具有重要的研究意义和应用价值。

高压真空断路器机械特性在线监测是指实时动态地监测断路器在实际带电运行过程中的机械性能参数的变化信息,并对信息进行记录的一种技术手段。为实现对断路器的状态检修,还需要采取合理的方法对实时监测的数据进行分析,从而对断路器当前工作状态做出准确判断^[5]。基于此背景,本文对高压真空断路器在线监测技术的实现进行了综述,特别对基于振动信号的信号分析方法进行了详细讨论,最后对相关技术的发展方向进行了展望。

1 高压真空断路器机械特性在线监测的基本内容

高压真空断路器是依靠其机械部件的正确动作来完成控制和保护功能的,因而保障每个机械组成部件的可靠性是保证断路器整体工作可靠性的关键。为实现这一目的,一方面可以从系统构成的角度选择可靠性高、机械寿命长的组件;另一方面可以采用先进的在线监测和故障诊断技术实现对系统可靠性的准确判断,并基于判断结果对系统进行合理的状态检修^[6]。从实际应用的角度而言,后者具有更重要的工程价值。

高压真空断路器在线监测技术是实现设备状态检修的基础。在线监测的功能主要包括原始信号采集和信号特征提取。在此基础上可以采用故障分类和估计算法进行故障诊断。因此,在线监测是故障诊断的基础,故障诊断是在线监测的目的。

在原始信号采集方面,目前国内外研究人员主要注意力集中于以下几种类型的信号采集^[7]:

(1) 采集监测高压真空断路器分、合闸线圈电流的波形。

(2) 采集监测高压真空断路器分、合闸操作时动触头的行程-时间特性曲线。

(3) 采集监测高压真空断路器分、合闸操作时产生的振动信号。

在信号特征提取方面,由于所采集的断路器原始信号本质上都是时域内的时间序列,因此,针对时间信号的处理方法大多可以应用到断路器信号特征提取方面。比如,对原始时间信号进行时域、频域分析,可以提取出具有明确物理意义的时间信息、频率信息及时间与频率的综合信息等特征参量。实际应用中还通常将不同的数据分析方法相结合做出综合

分析结果^[8]。

2 高压真空断路器机械特性在线监测的具体方法

2.1 分、合闸线圈电流监测

高压真空断路器一般都以电磁铁作为操作的第1级控制元件,操动机构中使用的绝大部分是直流电磁铁。当线圈中通过电流时,动铁芯受磁力吸引,使断路器分闸或合闸。分、合闸线圈的电流波形可以描述断路器的分、合闸时间、铁芯行程和铁芯卡滞等状态信息,并作为诊断机械故障的依据之一^[9]。电流信号监测通常选用霍尔电流传感器。霍尔电流传感器精度高,线性度好,动态性能和电气性能也较好,而且体积小,易于现场安装,不会对断路器主系统的正常运行造成影响。

2.2 动触头行程-时间特性曲线监测

高压真空断路器分、合闸动作时动触头的行程-时间特性是计算分、合闸速度的依据,也是表征其机械特性和分断电路能力的重要参数。

为保证计算结果的准确性,对动触头行程-时间特性的测量,最重要的是动触头在各个时刻运动位置的检测。其测量的基本要求是在不改断路器主体结构及带电运行的条件下,既不能影响操动机构原有的机械特性和绝缘特性,又要真实地反映动触头行程随时间的变化趋势。此外,传感器还要便于安装,能适用于多种操动机构,即适应性要强。这就对检测装置的体积和质量均提出了要求,并且传感器还要求具备较高的灵敏度和线性度。

目前,监测高压真空断路器行程-时间特性所采用的传感器主要有以下几种:

(1) 光电传感器。常用的光电传感器主要有增量式和绝对式光电编码器、直线光栅尺等,并通过与测量电路相配合来实现测量。其原理主要是通过光电转换将输出轴上的机械位移量转换成脉冲或数字量。其中,旋转光电编码器是由光栅盘和光电检测装置组成,适合监测旋转角度;光栅尺与光电编码器检测原理相似,主要应用于直线位移测量。

光电传感器具有体积小、精度高、可靠性强等优点,但是与之相配的测量电路较为复杂,该方案整体的成本也较高。

(2) 差动变压器式位移传感器。差动变压器式位移传感器是一种应用广泛的感应式位移传感器,其原边有一个绕组,副边由2个按差动方式联接的绕组构成一个开口变压器。变压器开口处有一个可以在轴向自由移动的活动铁芯,该铁芯产生位移时

改变了空间的磁场分布,从而改变了变压器原边和副边之间的互感量,当供给原边绕组一定频率的交变电压时,副边绕组就产生相应的感应电动势,随着铁芯运动位置的不同,副边绕组产生的感应电动势也不同,即将铁芯的位移量转化成电压信号输出。其电压值与铁芯位移量在一定范围内呈线性关系。

实际使用时,把差动变压器的壳体与断路器的静止部件固定在一起,把和动铁芯连接的测量杆与集断路器的动触头为一体的绝缘拉杆相连接。当断路器进行分、合闸操作时,通过绝缘拉杆的运动带动传感器的铁芯相对于线圈进行运动,这样就可以测得动触头的相对位移量。

差动变压器式位移传感器具有线性度好、测量精度高、抗干扰能力强等优点,但是其体积相对较大,对于内部空间结构比较紧凑的断路器而言,此种类型的传感器的安装会有一定困难。

(3) 电阻式位移传感器。电阻式位移传感器的基本测量原理是通过测量流过电阻的电流或电阻两端电压的变化来判断断路器动触头的运动过程。电阻传感器又有直线位移传感器和角位移传感器2种。其中,直线型位移传感器属直接测量,但其体积相对较大,有时会受到安装空间和安装位置的限制。角位移传感器体积较小,安装使用都较为方便。但是其测量属于间接方式,需要测量主轴的角位移曲线,然后利用动触头的行程与主轴转动角度之间的对应关系来间接获得动触头的直线位移曲线^[10]。

有文献针对同时使用直线位移传感器和角位移传感器的测量结果进行对比发现,主轴角位移和动触头直线位移具有很好的对应关系,因此利用角位移传感器也能获得较高的测量精度^[10]。电阻式位移传感器具有精度高、寿命长和线性度好等优点。特别对于角位移型传感器,其体积较小,可有效克服安装空间的限制。此外,与此种传感器相配合的测量电路也较为简单,方案综合实现成本也较低。因此该测量方式具有更好的实用性。

2.3 振动信号的监测

高压真空断路器的振动信号是一个信息非常丰富的载体,它蕴含大量的设备状态信息。对振动信号时域和频域的响应曲线进行分析,可揭示振动过程中的每个振动事件与断路器主要机械构成部件间运动冲击的对应关系。断路器在正常分、合闸操作过程中,其各个振动事件出现的顺序是不变的。因此,可以通过对振动信号进行特征提取,识别振动事件,从而为故障诊断提供数据支持。

振动信号一般通过加速度传感器进行采集。常用的加速度传感器主要有压电式加速度传感器和磁阻式加速度传感器。

压电式加速度传感器的基本工作原理是利用压电晶体的正压电效应,即某些晶体(如人工极化陶瓷、压电石英晶体等)在一定方向的外力作用下或承受变形时,它的晶体面或极化面上将有电荷产生。这种加速度传感器在实际应用中受环境温度和安装场合的影响较大,故在断路器振动信号检测的应用中受到限制。

与压电式加速度传感器相比,磁阻式加速度传感器的分辨率和灵敏度更高,频率响应更宽,并且对环境的要求更低。磁阻式加速度传感器的基本工作原理是当振动体在传感器敏感的测量方向上振动时,传感器的敏感元件产生相应的强制振动。振动产生的振动信号使磁敏元件产生电阻变化,导致输出电压产生相应的变化。经采样电路进行测量放大处理后,输出与振动运动相似的(频率和幅度大小)电压变化信号。

3 振动信号的分析方法

由于断路器在分、合闸操作过程中,其内部激励源的多样性,振动信号的表现形式也相当复杂。因此,采用合理有效的技术手段对振动信号进行深入分析是一项重要的研究内容。

有文献指出,断路器的振动信号主要具有以下特点^[11]:

(1) 断路器的分、合闸操作属非周期性的一次动作,相应产生的振动过程持续时间很短,即振动加速度幅值很大,比较容易检测到振动信号。

(2) 振动信号是一种非平稳瞬变信号,采用何种方法并获得可行的分析结果具有较大难度。

(3) 断路器的振动是由其构件之间的碰撞冲击或运动状态突变引起的,在断路器一次正常的分、合闸操作过程中,有一系列保持固定时序的运动构件的启动、制动和撞击来形成一个个冲击。因此,正常状态下断路器的振动响应曲线是相似的。

基于断路器振动信号的上述特点,目前对断路器振动信号的分析主要是从时域和频域2个方面来提取特征量。

3.1 振动信号的时域分析

振动信号时域分析是指在时间域内提取振动信号的特征量。时域分析主要是对振动信号的时域波形特征进行提取,主要包括基本数字特征和概率分

布特征两方面。具体特征值主要有峰值、峰峰值、均值、均方值和方差等。

在实际应用中,由于时域信号特征量的分散度较大,且重复性也较差,故时域指标仅作为一种辅助的分析指标。

3.2 振动信号的频域分析

振动信号的频域分析主要是基于傅里叶变换将原始信号分解为有限或无限个频谱分量来对振动信号的频谱特性进行分析。但是傅里叶变化属于一种全局的变换方法,它虽然能将信号的时域和频域的特征联系起来,但只能分别从时域和频域进行观察,而不能将两者有机结合起来,这使得傅里叶分析方法主要适用于平稳信号的分析,而对于非平稳信号则不能充分描述。由于断路器的机械振动信号属典型带有噪声的非平稳信号,所以,傅里叶分析的缺陷也限制了它在断路器振动信号分析中的应用。

3.3 振动信号的时频分析

由以上分析可知,单纯使用时域或频域分析方法都不能很好地提取振动信号的特征,故目前普遍采用时频分析的方法来对振动信号进行分析。

3.3.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是一种用于分析非平稳信号的时频分析方法,也被称为加窗傅里叶分析,其基本原理是把信号划分成许多小的时间间隔,并假定在短的时间窗内的非平稳信号是平稳(伪平稳)的,然后再对窗内信号进行傅里叶变换。通过分析每一个时间窗内存在的频率,并将所有时间窗的分析结果进行汇总,即可获知频率在总体时间上的变化情况。因此,该分析方法同时提供了振动信号在时域和频域的局部信息。

虽然短时傅里叶变换相对于傅里叶变换而言具有一定的局部分析能力,但是短时傅里叶变换使用的是一个固定的短时窗函数,而实际中振动信号的高频信号一般持续时间很短,低频信号持续时间较长。因此,采用短时傅里叶变换分析高压真空断路器振动信号的结果准确性较差。

3.3.2 小波分析

小波分析以不同的分辨率来观察信号,将信号分解到不同的频带中,既可以看到信号的全貌,又可以分析信号的细节。它具有多分辨分析能力,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,而在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率^[8],这使得它能有效地区分振动信号中的突变部分和噪声。

以上优点使得小波分析(包括由小波分析延伸出来的小波包分析^[12])成为现今在断路器振动信号分析领域中最常被采用的分析方法。但是小波分析的难点在于如何选择母小波。采用不同的母小波分析出来的结果会有差异。如果母小波选择不当,分析效果也会受到影响。实际应用中,需要综合比较不同母小波对断路器振动信号的分析结果来选定母小波的形式。

除以上几种振动信号的分析方法外,还有学者提出功率谱分析方法^[13]、信号能量包络分析^[12]、希尔伯特-黄变换等^[14-15]方法,但目前多为理论研究,实际应用仍需进一步的深入研究和实践检验。

4 高压真空断路器机械特性在线监测系统实现

除前述传感器选型和信号分析技术之外,高压真空断路器机械特性在线监测系统的具体实现还需要其他硬件和软件技术的支持。

4.1 基于嵌入式的下位机系统

如何实时准确地获取断路器在分、合闸操作过程中的电流、行程和振动信号是保证特征提取和故障分析结果准确性的前提和关键。目前,多采用基于嵌入式系统的解决方案实现原始数据的采集,主要包括 DSP(数字信号处理器)和 ARM 等^[7, 16-17]。其中,DSP 除可完成数据采集功能外,还具备强大的信号分析处理能力,因此,可以将特征提取和故障诊断算法移植到下位机实现,这是目前比较受欢迎的一种解决方案。

4.2 虚拟仪器技术

虚拟仪器技术是现代测量技术、电子仪器技术及计算机技术相结合而产生的一种新的仪器形式,它通过应用程序将计算机与仪器硬件结合起来。与传统仪器相比,虚拟仪器在智能化程度、分析处理能力、性价比及更新速度等方面都具有不可比拟的优势。基于虚拟仪器技术实现断路器机械特性的在线监测也是一种比较流行的解决方案。

虚拟仪器由硬件和软件 2 个部分组成。硬件部分主要实现信号采集功能,软件部分是虚拟仪器的核心,用户根据自己的需求来开发相应的软件,主要完成数据分析和在线显示等功能。目前,最常见的解决方案是利用嵌入式解决方案开发下位机数据采集系统,然后通过虚拟仪器软件开发上位机信号分析系统。其中,最常用的上位机开发软件是 LabVIEW。LabVIEW 是一种图形化编程语言,具有强大的数据分析和处理功能,且人机交互能力强,

界面友好。此外,也可基于VB、VC等其他高级语言来进行开发。

4.3 网络通信技术

随着网络通信技术在电气控制领域中的不断渗透及工业控制网络的不断发展,断路器机械特性在线监测系统也需要具有网络通信功能。其中,基于现场总线技术、工业以太网技术^[16]和无线通信技术的断路器机械特性在线监测系统的通信技术是当前研究的热点。

现场总线是将现场控制单元和现场底层的数据采集单元互联的实时控制通信网络。现场总线标准较多,其中CAN总线因其具有成本低、总线利用率极高、数据传输距离长、实时性高和可靠性强的特点应用较多。一种应用于高压真空断路器在线监测的典型解决方案是下位机由嵌入式系统开发,完成数据采集功能,然后通过CAN总线和上位机进行通信,实时向上位机传输数据,上位机对原始数据进行分析处理,并通过人机界面将分析结果显示出来。随着工业以太网技术的发展,其传输可靠性和传输速率高的特点也受到研究人员的重视,并已将其应用到断路器在线监测系统的设计中^[16]。此外,无线通信技术也为断路器在线监测系统与其他设备的通信提供了一种解决方案。

4.4 电磁兼容技术

高压真空断路器在实际运行时,其附近的配电线会耦合进电力系统的电磁干扰。因此,高压真空断路器在线监测下位机系统工作的电磁环境较为恶劣,为了其工作的可靠性和稳定性,必须采用一些抗干扰措施,以具备较好的电磁兼容能力。目前,最常用的抗干扰措施主要有以下几种。

(1) 电源滤波。利用电感、电容等储能器件组成滤波器来对电源进行滤波,以抑制来自电源线的干扰。

(2) 接地。接地既是一种保护设备和人身安全的重要措施,即安全接地;也是一种抑制电磁干扰、提高设备工作可靠性的技术手段,即信号接地和屏蔽接地。其中,信号接地主要通过采用低阻抗的导线与基准导体相连,从而为各种电路提供具有共同参考电位的信号返回电路,使流经该地线的各电路信号电流互不影响;屏蔽接地主要是为电缆、变压器等屏蔽层提供接地,从而抑制电场和磁场的干扰。

(3) 屏蔽。屏蔽是利用屏蔽体(具有特定性能的各种导电、导磁材料),以切断通过空间的静电耦合、感应耦合或交变电磁场耦合形成的电磁噪声传

播途径,阻止或衰减电磁干扰能量的传输。

在实际应用中,一般要结合使用以上几种抗干扰技术,才能达到较好的效果。

5 结语

高压真空断路器作为一种控制和保护电器在电力系统中应用十分广泛。其机械特性是影响工作可靠性的关键因素,因此,采用在线监测技术对断路器的机械特性进行实时监测,并及时对潜在故障进行预判,对于实现断路器的状态检修和提高其安全性具有重要的意义。通过对现有高压真空断路器机械特性在线监测研究现状的分析可知,虽然在系统实现和信号分析领域已经存在一些积极有益的成果可借鉴,但仍有一些尚需深入研究的重点问题。

(1) 在线监测系统通用性和集成性的提高。当前高压真空断路器机械特性在线监测系统的开发均需与高压真空断路器具体的类型相匹配,而实际应用中,高压真空断路器的电压等级和工作原理差异较大,因而在系统实现时,如何使系统具有更好的通用性以适应不同类型断路器的需要是一个需重点解决的问题。此外,在线监测系统还需具备一定的可扩展能力和更高的集成性,以提升整个系统的性价比和技术优势。

(2) 故障诊断方法的深入研究。高压真空断路器是一个结构复杂的电气设备,其分、合闸过程中产生的振动信号包含着断路器内部丰富的状态信息,任何一个机械构件的状态变化都会改变振动信号的信息内容。当前国内外相关研究人员针对振动信号的特征提取研究多处于实验和仿真阶段,尚需大量的数据和实践进行验证。因此,基于振动信号的高压真空断路器故障诊断仍是未来研究的重点问题。此外,借助智能优化算法^[18]、神经网络^[19-20]、支持向量机^[21]、数据融合^[22]等技术实现高压真空断路器故障诊断的智能化也将是未来发展的重要方向。

(3) 在线监测系统产品化进程的加快。目前,高压真空断路器机械特性在线监测系统的下位机和上位机组合构成的综合管理系统的解决方案、上位机和下位机的功能分割和实现技术已基本成熟,但是相关研究的产品化进程相对滞后。因此,在进一步完善系统功能的同时,制定相关产品标准和加快技术成果转化对推广和促进高压真空断路器机械特性在线监测与故障诊断技术的发展具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 张卫正,李永丽,姚创. 基于最小二乘支持向量机的高压断路器故障诊断[J]. 高压电器,2015,51(12):79-83.
- [3] 徐建源,张彬,林莘,等. 能谱熵向量法及粒子群优化的 RBF 神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(6):1299-1306.
- [4] 杨景刚,刘媛,高山,等. 高压断路器机械故障诊断技术[J]. 江苏电机工程,2016,35(2):1-6.
- [5] SU S,LI K K,CHAN W L,et al. A practical circuit breaker monitoring system[C]//2005 IEEE Industry Applications Conference,Hong Kong,2005:867-872.
- [6] 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [7] 赵洋,刘汉宇,曾庆军. 高压真空断路器机械特性在线监测系统研制[J]. 高压电器,2009,45(6):91-95.
- [8] 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.
- [9] 孟永鹏,贾申利,荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器,2006,42(1):31-34.
- [10] 陈建平,胡占强,苏晓东. 智能化断路器机械特性在线监测关键技术设计[J]. 高压电器,2014,50(4):108-112.
- [11] RUNDE M,OTTESEN G E, SKYBERG B, et al. Vibration analysis for diagnostic testing of circuit breakers[J]. IEEE Power Engineering Review,1996,17(13):53-53.
- [12] 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(自然科学版),2008,31(7):744-748.
- [13] 赵洋,曾庆军,严金城. 采用功率谱估计法的真空断路器振动分析[J]. 电气应用,2009,28(9):62-65.
- [14] 赵洋,刘汉宇,曾庆军. 基于机械振动信号的高压真空断路器故障诊断研究[J]. 高压电器,2010,46(2):46-51.
- [15] 李建鹏,赵书涛,夏燕青. 基于双谱和希尔伯特-黄变换的断路器故障诊断方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):115-119.
- [16] 张思宇,梅军,郑建勇,等. 基于 FPGA 与 ARM 的高压断路器在线监测系统[J]. 电测与仪表,2013,50(7):85-89.
- [17] 罗勇强,郎宝华. 断路器性能参数在线监测装置的设计[J]. 科学技术与工程,2013,13(2):480-486.
- [18] 贾嵘,洪刚,薛建辉,等. 粒子群优化-最小二乘支持向量机算法在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2010,34(3):197-200.
- [19] 孙来军,胡晓光,纪延超. 改进的小波包-特征熵在高压断路器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(12):103-108.
- [20] 何澜,刘星,王丹丹. 10 kV 开关柜的真空断路器神经网络健康诊断策略的研究[J]. 工矿自动化,2011,37(12):43-47.
- [21] 黄新波,陶晨,刘斌. 智能断路器机械特性在线监测技术和状态评估[J]. 高压电器,2015,51(3):129-134.
- [22] 苗红霞,王宏华. 基于数据融合的高压断路器故障诊断方法研究[J]. 工矿自动化,2010,36(10):45-48.