

对于高压真空断路器机械特性测试的探讨

魏本记

(南京供电局, 江苏 南京 210009)

Discussion on the Measurement of Mechanical Characteristics for High Voltage Vacuum Circuit Breaker

WEI Ben-ji

(Nanjing Power Supply Bureau, Nanjing 210009, China)

摘要: 论述了高压真空断路器机械行程特性测试方法的发展过程, 讨论了测试仪器的选择原则, 在具有高电场干扰情况下如何进行测试工作, 以及高压真空断路器平均分、合闸速度的计算方法。

关键词: 真空断路器; 机械行程特性; 平均速度; 传感器
中图分类号: TM561.2 **文献标识码:** B

Abstract: Based on the practical experience, the paper reviews the measurement method of mechanical travel characteristics for high voltage vacuum circuit breaker, discusses the selection considerations for measuring instrument, and how to perform the test under severe electromagnetic interference as well as the calculation method of parameters.

Key words: vacuum circuit breaker; mechanical travel characteristic; average speed; sensor

1 前言

GB1984-2003的6.101.1.1条规定^[1]: 高压断路器在型式试验前, 制造厂应提供断路器的参考机械行程特性曲线。试品在进行型式试验后测得的机械行程特性曲线与参考机械行程特性进行比较, 以便鉴定断路器的机械动作稳定性是否达到标准规定的要求。标准中还对记录行程的传感器安装方式提出了具体要求, 以便能够直接或间接地测出断路器的最佳机械行程特性曲线。并且指出, 断路器的机械行程特性曲线可以连续地或者离散地记录, 但在采用离散记录时, 对于完整的行程至少应该给出20个离散数据。

GB1984-2003作出上述规定, 是为了进一步提高国产高压断路器机械动作的可靠性。长期以来, 国产油断路器和SF₆断路器在型式试验前, 制造厂虽未给出参考的机械行程特性曲线, 但在产品开发研制时制造厂都已采用常规的测试手段(如电磁振荡

器, 转鼓测速仪等)测出了断路器的机械行程特性, 只是在型式试验时未进行这个项目的考核鉴定。相比之下, 高压真空断路器由于行程短, 采用常规的测试仪器很难准确地测得断路器在分、合闸动态过程中的特性参数。

为了认真贯彻执行GB1984-2003中6.101.1.1条的规定, 笔者总结了近几年来在高压真空断路器机械行程特性测试方面的经验和教训, 对高压真空断路器的机械行程特性测试工作提出几点看法。

2 高压真空断路器机械特性测试方法的发展

由于高压真空断路器触头行程(开距)很短, 12 kV真空断路器为10 mm左右, 40.5 kV真空断路器也只有20 mm左右, 采用常规的测试装置难以测准真空断路器的机械特性参数。在真空断路器问世初期采用附加接点方法测量动触头的分、合闸速度。20世纪90年代, 采用光栅传感器和有接点的滑动电阻传感器来测量真空断路器的速度, 但最初光栅尺的间距在2 mm及以上, 只能粗略地测出真空断路器的机械行程特性。近几年来传感器技术发展很快, 光栅尺的间距已从2 mm发展到0.1 mm, 已经可以较准确地测得高压真空断路器在分、合闸过程中动态的机械行程特性曲线。与此同时, 从国外购进的高精密度滑动电阻传感器也已用来测量真空断路器的机械行程特性曲线。

目前配用高精密度传感器, 具有微机接收和处理功能、屏幕显示、打印输出综合功能的高压断路器机械特性测试仪已很普及, 各地发供电部门基本上都已普遍使用这种特性测试仪。但据笔者所知, 反而还有不少开关制造厂仍在使用附加接点测速方法。

笔者认为, 高压开关制造厂应尽快使用高精密度传感器的特性测试仪来测量高压真空断路器的机械特性参数。

3 断路器机械特性测试仪的选择

目前国内生产高压断路器机械特性仪的厂家很多,型号也不少,性能方面各有特点。笔者根据多年来使用各种测试仪的经验,在选用测试仪时应注意下列几点。

(1) 光栅传感器与滑动电阻传感器的比较

光栅传感器的特点是:光栅尺可以直接测得断路器的行程及行程变化过程(当光栅尺与动触头直接连动),还可以直接测得动触头行程(纵坐标)与动触头运动时间(横坐标)的特性曲线,以及以动触头行程(横坐标)与动触头运动速度(纵坐标)的特性(注:可称为行程与时间和速度与行程特性)。

滑动电阻传感器的特点是:通过测量电阻的电流或者电阻两端电压变化来反映出断路器的动触头运动速度,即以动触头运动行程为横坐标,以电流或电压变化值为纵坐标的特性曲线,曲线斜率愈大,反映速度愈快。必须间接地对电流或电压曲线取若干个段,并按 $v=st$ 计算出它们的速度值,再描出行程与速度特性曲线。由于滑动电阻没有行程标尺,它不能直接测得断路器的行程数值,只能间接地采用定标方法获得行程值(因为电阻值是随着行程呈线性变化的)。

因此笔者认为,只要光栅传感器测量行程的准确度能够满足真空断路器行程测量的误差要求(准确度能达到 0.5 mm),则以选择光栅传感器为好。只有在光栅传感器不能满足断路器测量要求,如测量某些型号 SF₆ 断路器外露的传动拐臂转动来表示处在封闭状态的动触头运动速度时,采用旋转滑动电阻传感器就比较理想。

(2) 光栅传感器的光栅间距并不一定愈小愈好

从真空断路器行程测量方面考虑,希望光栅尺间距愈小愈好,当光栅间距为 0.1 mm 时,行程测量准确度就可在 0.1 mm。但当光栅尺间距愈小时,要求测试仪的时间检测准确度就愈高。使用 0.1 mm 间距光栅尺,在断路器的速度为 2 m/s,光栅尺运动 0.1 mm 间距(行程)的总时间只有 0.05 ms,如果测时准确度只能达到 0.01 ms,则计算出的速度误差就较大。如果相同仪器,使用 1 mm 间距光栅尺,光栅运动 1 mm 行程的总时间为 0.5 ms,则计算出的速度误差就较小。

采用 1 mm 和 0.1 mm 两种间距光栅尺对同一台断路器(40.5 kV 真空断路器)的机械行程特性对比测出的结果为:当断路器触头开距调整在 20.5 mm(标准为 21±1 mm),用 1 mm 光栅尺测得的行程在 20~21 mm 之间,用 0.1 mm 光栅尺测得的行程为 20.4~20.6 mm 间变化,虽然 0.1 mm 光栅尺测得的行程准确度高一些,但 1 mm 光栅尺测得的行程也在允许公差范围内,是可以接受的。

速度测量结果表明,由于 0.1 mm 间距光栅尺在 20.4~20.6 mm 行程内能够测得 203~205 个速度值,输出的速度特性曲线比较紧密,而 1 mm 间距光栅尺在 20~21 mm 行程内只能测得 19~20 个速度值,输出的速度特性曲线比较疏散。

由于目前实用型电子测时仪器测时准确度都在 0.01 ms(10 μs),很难达到 0.001 ms(即 1 μs),当使用 0.1 mm 间距光栅尺时,测得的速度曲线并不一定理想,见图 1。在分、合闸过程中速度变化反而不稳定,出现突然增大和突然变小现象,反而没有使用 1 mm 间距光栅尺测得的曲线稳定,见图 2。另外,在图 1(a)中还可明显地看到:当 $v \geq 2$ m/s 时,在速度曲线上方和下方出现多个离散的速度值点,说明仪器在测量过程中存在对一些 0.1 mm 行程段内的速度测得不准的问题。因此笔者认为:当断路器在分、合闸过程中最大速度值在 2 m/s 以上时不宜使用 0.1 mm 间距光栅尺,宜采用 0.5 mm 间距光栅尺,它既可以使行程测量准确度达到 0.5 mm(因为真空断路器的行程测量准确度 ≤ 0.5 mm 比较理想),而且又能够比较准确地测得断路器的速度。当断路器最大速度不大于 1.5 m/s 时,使用 0.1 mm 间距光栅尺是可行的;对于 SF₆ 和油断路器,使用 1 mm 间距光栅尺比较理想;当断路器最大速度达到 10 m/s 及以上时,则使用 2 mm 间距光栅尺为好。

(3) 测试仪防高电场干扰性能的选择

对于开关制造厂在车间内使用的测试仪,由于现场基本上没有高电场干扰,只需考虑高频、短波等信号干扰,仪器的外壳屏蔽接地,并使用屏蔽引线就可以了。对于安装在变电站中的断路器,当被试断路器周围具有高电压带电体时,通常在极短时间内(从将

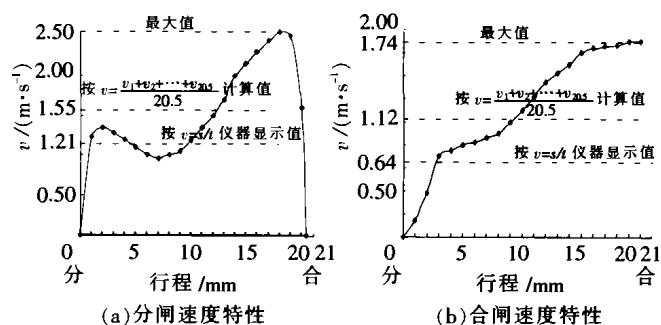


图 1 使用 0.1 mm 光栅传感器测得的分、合闸速度特性曲线

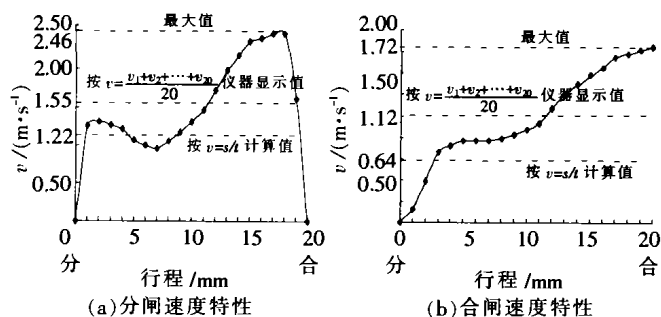


图 2 使用 1 mm 光栅传感器测试仪测得的分、合闸速度特性曲线

保护接地线拆除至正式测试几秒钟内), 断路器上可能具有较高的感应电势。较高的感应电势不仅能使仪器失去正常测试功能, 而且还可通过引线反击到测试仪上使其烧坏。如何提高断路器机械特性测试仪防高电场干扰能力是当务之急, 目前国内生产的测试仪大多数不具备这种性能, 在选择测试仪时应特别注意。据笔者所知, 目前已经有一些仪器的内部增设了光隔离装置(如 KZY-III 测试仪), 只有测试回路信号能够通过光隔离装置, 被试品上的高电场感应电势不能通过光隔离装置进入测试仪内部。根据在现场使用该型仪器的情况说明: 在 110 kV 变电站内不管被试断路器上带有多么高的感应电势, 它都能够准确地测得所需要的数据; 在 220 kV 变电站, 必须拆除被试断路器上的两侧引线(因为引线愈长, 感应电势愈高)再进行测试, 否则就会致使测试数据不准, 甚至烧坏仪器; 在 500 kV 变电站内, 更应该考虑防高电场干扰, 即使使用带光隔离装置的测试仪, 也应该使被试断路器上的感应电势降得愈低愈好。

4 高压真空断路器平均速度的计算

目前已经定型的国产高压真空断路器的平均合、分闸速度, 都是根据使用附加接点测速方法, 按 $v=s/t$ 计算出来的全开距(或者全开距内某一行程内)平均速度, 如当接点开距整定在 8 mm, 可动触头运动 8 mm 行程的时间为 8 ms, 则平均速度为 1 m/s。当使用传感器测速仪, 不仅可以按 $v=s/t$ 计算出平均速度, 而且还可以按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算平均速度。上述两种计算方法只有当全开距范围内为匀速、匀加速和匀减速运动 3 种特殊条件下, 计算出的平均速度才会相等。断路器的分、合闸运动特性绝对不可能是上述 3 种情况, 全开距内运动速度肯定是一条曲线, 而且曲线没有规律性, 所以按上述两种方法计算出的全开距平均速度不一样, 通常按后一种方法计算出的速度要比前一种计算方法得出的速度大 20%~30%(没有恒定比值)。

据笔者所知, 目前国产的配用光栅传感器的机械特性测试仪, 绝大多数都是按 $v=s/t$ 计算平均速度, 但也有部分特性测试仪是按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算平均速度。

笔者分别使用配 0.1 mm 与 1 mm 光栅传感器的仪器在同一台配用双稳态永磁操动机构的 40.5 kV 真空断路器上进行对比测试, 测得的分、合闸速度特性见图 1, 图 2。

图 1(a)速度特性曲线按 $v=s/t$ 计算出的平均速度为 1.2 m/s; 图 2(a)按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算出的平均速度为 1.55 m/s, 如果按 $v=s/t$ 计算, 则为 1.22 m/s, 与图 1(a)速度特性曲线计算出的平均速度基本相等。

图 1(b)速度特性曲线按 $v=s/t$ 计算出的平均速

度为 0.64 m/s; 图 2(b)按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算出的平均速度为 1.12 m/s, 如果按 $v=s/t$ 计算, 为 0.64 m/s, 与图 1(b)速度特性曲线计算出的全开距平均速度基本相等。

为了证实上述对比测试是否具有普遍性, 笔者又使用上述两种特性测试仪在配用弹簧操动机构的 40.5 kV 真空断路器上进行了对比测试, 其结果也是如此。

较长时间以来, 使用 KZY-III 测试仪对 ZN28-12, ZN12-12 等多种型号真空断路器进行特性测试, 测得的分、合闸速度总是比产品安装使用说明书上规定的分、合闸速度大的多。如 ZN28-12 型真空断路器规定的全开距平均分闸速度为 (1.2 ± 0.2) m/s, 而实际测得的全开距平均分闸速度约为 1.5 m/s(如果使用附加接点测, 约为 1.1 m/s); ZN28-12 型真空断路器规定的全开距平均合闸速度是在 (0.6 ± 0.2) m/s, 而实际测, 则为 0.8 m/s(如果使用附加接点测, 则为 0.5 m/s)。

通过反复对比测试已可得出: 0.1 mm 和 1 mm 的光栅传感器的测速计时系统以及仪器对光栅尺每个间距内的速度信号采集和运算结果都是正确的, 输出打印的速度特性曲线真实地反映了真空断路器动触头运动过程中的变化情况。只是由于两种仪器对全开距内平均速度计算方法不同, 而得出了两种不同的结果。如果将 0.1 mm 光栅的测试仪增加 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算程序, 或者将 1 mm 光栅的测试仪增加 $v=s/t$ 计算程序, 则两者所测得的速度值将完全相同。

那么高压真空断路器的全开距平均分、合闸速度是按 $v=s/t$, 还是按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算呢? 从物理概念上分析, 在机械运动中, 对于匀速运动 $s=v\cdot t$; 而对于变速运动 $s=\int_0^t v dt=v_p\cdot t$, 其物理概念为一个变速运动的物体在时间 t 内所走的路程(即断路器动触头在时间 t 内所运动的全开距)可以用一个不变的平均速度在相同时间内所走的路程来表示, 即 $v_p=s/t$ 。而 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 只是一个测量速度的算术平均值, 其物理概念不太明确。

因此, 对于高压真空断路器全开距内的平均速度应采用 $v=s/t$ 计算方法, 采用 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算方法是错误的。

从图 1 和图 2 速度曲线可明显地看出, 按 $v=s/t$ 计算方法得出的全开距平均速度要比速度曲线上各速度值之和的平均值小得多, 而按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算方法得出的全开距平均速度似乎反映了速度曲线上各速度值之和的平均值。笔者认为, 这能解释为采用理论计算公式与实际操作采用的计算方法两者结果之差别。引起两者计算方法误差的原因是多方面的, 最主要的有断路器动触头在运动起始阶段的速度是由零“慢慢”加速, 在起始阶段较短的行程中

耗时较长;动触头在运动停止阶段的速度是由大“慢慢”地降到零,在停止阶段较短的行程中耗时也较长,当采用 $v=s/t$ 计算时,必然是将起始和停止两个阶段的时间(估计约几 ms)计算在内,而当采用 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算时,就没有将起始和停止两个阶段的时间全部计算在内。

通过上述分析已经可以得出:由于高压真空断路器在型式试验中是接 $v=s/t$ 得出的全开距内平均速度值,使用部门在产品安装使用中也应该按 $v=s/t$ 计算全开距内平均速度值,断路器机械特性测试仪在对真空断路器测试时也应统一按 $v=s/t$ 程序计算和输出全开距内平均速度数值。因此,采用 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算方法的断路器机械特性测试仪应改为 $v=s/t$ 计算方法。

但是笔者认为,由于按 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 计算出的平均速度值能够比较实际地反映出高压真空断路器在分、合闸过程中的速度曲线上各速度值之和的平均值(至少是全开距的 90%以上范围内),它对于分析判断真空断路器动作特性有实际意义。因此,当测试仪器已显示速度曲线的条件下,必要时可采用 $v=(v_1+v_2+\dots+v_n)/n$ 对全开距(或者某开距段)内的平均速度进行计算,测试仪器应该具有这样的计算程序。

5 高压真空断路器的分、合闸速度

目前已定型的高压真空断路器给出的分、合闸速度有下列两种方式:一是给出全开距内平均速度(如 ZN28-12 等);二是给出触头分离后 65%行程段(开距)内的平均速度和触头闭合前 30%行程(开距)段内的平均速度(如 ZN12-12 等)。

由于配用传感器的高压断路器机械特性测试仪都能够显示和打印出分、合闸速度特性曲线,因此可以考虑在给出真空断路器更为合理的分、合闸速度标准;对于分闸,除了保留全开距内平均速度外,增加触头分离后 30%行程(开距)段内的速度平均值(刚分速度);对于合闸,除了保留全开距内平均速度

值外,增加触头闭合前 20%开距段内的速度平均值(刚合速度)。增加刚分速度的目的是为了能够更好地保证断路器开断额定短路电流能力和开断其它电流的性能;增加刚合速度的目的是为了能够更好地保证断路器关合额定短路电流的能力。

6 结语

(1)GB1984-2003 中明确规定高压断路器在型式试验前,必须提供参考机械行程特性曲线,在型式试验中要对参考曲线进行复测考核鉴定,其目的是为了进一步提供高压断路器的机械动作稳定性。

(2)随着高精密度传感器技术的不断发展,应普及使用传感器测速方法,以便能够一次连续地测得高压真空断路器的分、合闸速度特性曲线,逐步淘汰附加接点测速方法。

(3)为了保证高压真空断路器的分、合闸速度测量准确性,应根据断路器速度的高低,选择合适间距的光栅尺。当速度 ≥ 2 m/s 时,由于受目前实用型电子仪器测试准确度的限制,选择 0.5 mm 间距光栅尺为好,不宜选择 0.1 mm 间距光栅尺。对于开距(行程)较大的油断路器和 SF₆ 断路器,宜选择 1~2 mm 间距光栅尺。

(4)高压真空断路器的全开距内平均分、合闸速度应按 $v=s/t$ 计算。

(5)高压真空断路器除了保留原来的全开距内平均速度值标准外,应考虑增加刚分速度和刚合速度值标准,以便更好地保证断路器的开断性能和关合性能。

参考文献:

- [1] GB1984-2003. 高压交流断路器[S].

作者简介:魏本记(1936-),男,江苏扬中人,工程师,长期从事高压开关检修与运行技术管理工作。

(上接第 220 页)

数具体表达的意义与线路长度相关。根据对以上线路工频参数的测量结果分析,可得如下结论:

(1)常规线路与紧凑型线路的线路工频参数差异较大。

(2)对于常规线路,实测线路的正序电阻比直流电阻大,但非常接近,500 kV 线路大约为 0.03 Ω /km。

(3)对于常规线路,500 kV 输电线路为 4 分裂时,正序电抗、正序电容、零序电抗、零序电容分别约为 0.28 Ω /km,0.014 μ F/km,0.8 Ω /km,0.009 μ F/km。

(4)常规输电线路的零序阻抗一般是正序阻抗

的 3 倍左右。

参考文献:

- [1] 吴希再. 电力工程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997.
 [2] 周学君. 输电线参数测量方法[J]. 广东电力,1999,12(6):16-18,31.
 [3] 舒印彪,赵丞华. 研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术,2002,26(4):49-51.

作者简介:卢明(1975-),男,工程师,从事架空线路、电力电缆及过电压的研究工作。