

[断路器]

高压断路器速度特性对短路电流开断能力的影响

文/辽宁高压电器产品质量检测有限公司 汪 洋 张 松 张忠华

通过对断路器机械特性的测量，以及断路器分闸速度和电弧能量之间关系的分析，阐述触头运动速度对开断短路电流能力的影响，为断路器的设计以及调试提供理论依据。

近年来，随着电网电压等级和系统容量的不断增加，对断路器开断短路电流的性能要求越来越高，在快速有效的开断短路电流并且保证断路器使用寿命的基础上，断路器触头运动速度等机械特性，对断路器的开断能力起着非常重要的作用。结合空载试验和短路试验的波形图，可以很直观地看出触头运动速度对断路器开断性能的影响。

断路器分合闸速度的测量

断路器分合闸速度，可以通过测量断路器的分合闸时间，然后用断路器触头运动的总行程，求出断路器的平均分合闸速度。但这不能反映出触头的运动轨迹和每一时刻的瞬时速度，如果引入行程对时间的变化曲线，就可以通过该曲线看出触头整个运动轨迹，从而很方便地计算出触头的瞬时速度等瞬时特性。

分合闸速度的测量方法有很多种，国内大多数采用的是滑动电阻传感器对断路器的行程进行测量，在此以直滑式电阻传感器为例介绍此方法。

如图1所示，将电阻传感器安装在传动位置，该位置应该能反映出断路器触头的运动过程，传感器的滑动连杆与该位置固定连接，测量电阻传感器移动位置与电池一端的电压，该电压变化就可以反映出断路器触头运动情况，通过数据采集系统记录每一时刻电压，计算机就可以根据所记录信息绘制出所需行程曲线。

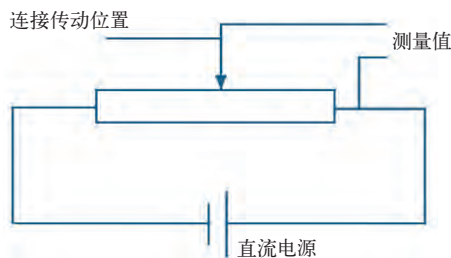


图1 直滑式接线图

如图2所示，行程曲线以时间为横坐标，代表触头行程的电压为纵坐标，曲线的斜率越大断路器的分合闸速度越快。通过行程曲线不仅可以分析断路器触头的运动状态，还能推导出断路器的刚合速度和刚分速度，该速度对断路器的开断能力和机械寿命影响极大，是能否开断短路故障的重要判据。

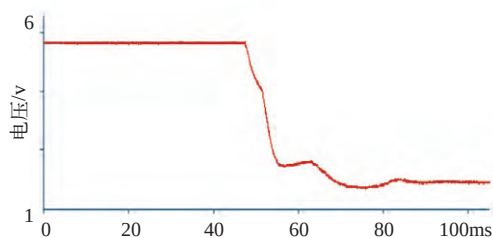


图2 断路器分闸行程曲线

定性分析断路器分合闸速度对断路器开断能力影响

刚合速度是指断路器在合闸过程中，动触头和静触头刚接触瞬间的瞬时速度。如果刚合速度过

慢, 闭合可能不到底, 合闸过程中, 动触头接近静触头时就会延长预击穿时间, 过长的预击穿时间会导致触头熔焊。如果刚合速度过快, 合闸过程中, 随之产生的冲量和机械惯量就越大, 就会加大机构的负担, 从而损坏机械部件, 降低断路器的机械寿命, 另外, 速度过快还容易引起触头的弹跳。

刚分速度是指断路器在分闸过程中, 动触头和静触头分离瞬间的速度。刚分速度作为开断瞬间的速度, 显得尤为重要, 如果刚分速度过慢, 势必造成电流过零后触头行程无法满足介质恢复强度高于暂态恢复电压强度的灭弧条件, 容易造成开断失败。如果刚分速度过快, 在开断小电流时容易发生电流突然截断, 提前过零, 由于负载电感中储存很大的电磁能量, 容易在线路上产生高频振荡, 出现过电压, 甚至可能导致断口重击穿。

在开断交流电路时, 电弧能量 A , 燃弧时间 t_a 都是衡量断路器开断性能的重要参数, 而触头运动速度 v 又直接影响了这两个参数。

交流断路器开断电路时, 断口间产生电弧, 能否使电路开断, 主要是看电弧电流过零之后, 能否阻止断口间的电弧重燃。如果弧后断口间的介质恢复强度始终高于断口间的暂态恢复电压强度, 则电弧熄灭, 否则就会造成重燃, 使开断失败。

若某断路器在开断某一电流时, 触头距离达到最小熄弧距离 $l_{\min}$, 电流恰恰经过零点, 满足熄弧条件, 电弧熄灭, 此时为最短燃弧时间 $t_{\min} = \frac{l_{\min}}{v}$ 。可见断路器在开断过程中, 触头的行程逐渐增加, 对于灭弧作用来说, 有一段临界距离 $l_{\min}$, 当断口间隙小于这段距离, 断口间介质恢复强度不够容易发生重燃; 电弧能量 $A = \int_0^{t_a} u i dt$ 。电弧电压 $u = \pm E l = \pm E v t$, 其中 E 为电弧电位梯度, 在大电流范围内可设为常数。电弧电流 $i = I \sin(\omega t + \varphi)$, φ 其中为电流开断相位。则电弧能量可表示为 $A = \int_0^{t_a} (\pm E l) I \sin(\omega t + \varphi) dt$ 。当用电流平均值 $\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I$ 代替时, 电弧能量为 $A = 0.45 E v l t_a^2$ 。当 $\varphi = 0$ 时得到电弧能量 A 随燃弧时间 t_a 变化的曲线, 如图3所示。

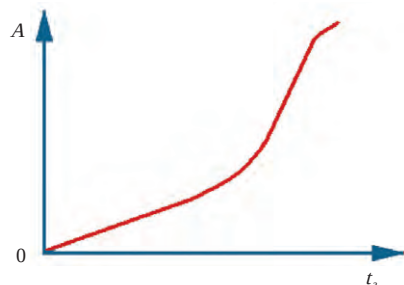
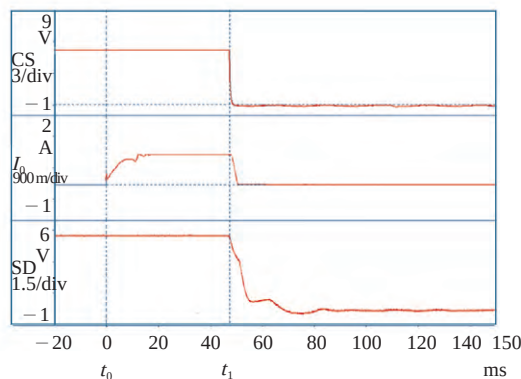


图3 电弧能量 A 与燃弧时间 t_a 的关系

在其他条件一定的前提下, 燃弧时间就成了影响电弧能量的主要因素, 电弧能量随着燃弧时间增加而显著提高, 研究断路器触头运动速度的根本目的就是设法缩短燃弧时间, 降低电弧能量, 从而提高开断能力。

以试验波形图为例分析分闸速度对断路器开断能力影响

某断路器单相合成试验波形图, 如图4、图5、图6所示。

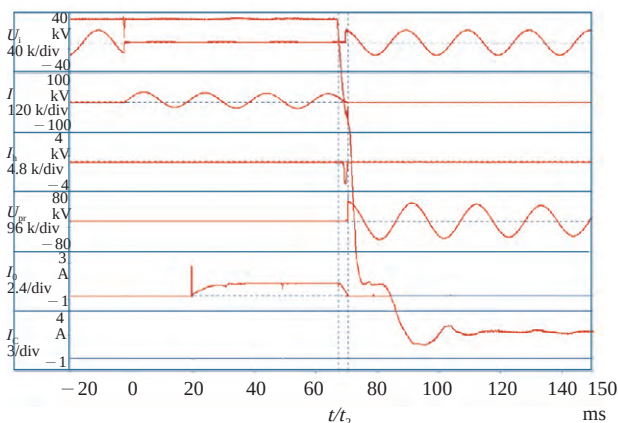


CS—断口电压信号 I_0 —为断路器机构线圈电流信号

SD—为触头行程曲线

图4 空载试验波形图

图4中 t_0 时刻断路器机构线圈受电, t_1 时刻断路器动静触头分离, 通过测量 t_1 时刻行程曲线上电压值所占总电压值的百分数比例, 可以确定断路器动静触头的刚分点, 从而可以较为准确地确定负载情况下的燃弧时间, 避免了短路情况下电磁场干扰带来的分合闸时间上的误差, 这也是空载试验中测量行程曲线的意义所在。



U_1 —电流源电压 I —合成电流

I_h —高频电流 U_{pr} —恢复电压

图5 负载试验波形图

(下转第77页)

设定负序补偿度 $K_N=1$ ，无功补偿度 $K_C=1$ ，经式(22)计算，得 $S_4=8.3093\text{MV}\cdot\text{A}$ ， $S_5=4.38\text{MV}\cdot\text{A}$ ， $S_6=14.3093\text{MV}\cdot\text{A}$ ，即在A相并联8.3093Mvar的电容，B相并联4.38Mvar的电容，C相并联14.3093Mvar的电容。仿真得出补偿后一次侧三相电流和二次侧电压、电流曲线如图7、图8所示。

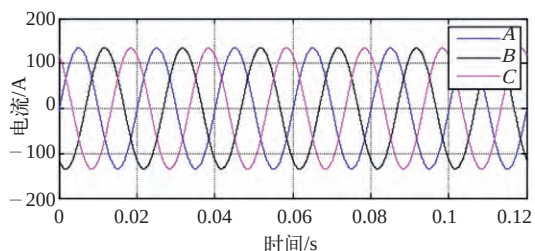


图7 补偿后YNd11变压器一次侧三相电流

可见，补偿装置投入后，一次侧三相电流平衡，负序为零；二次侧各相电压电流同相位，无功得到了完全补偿。进一步证明了方案的正确性。

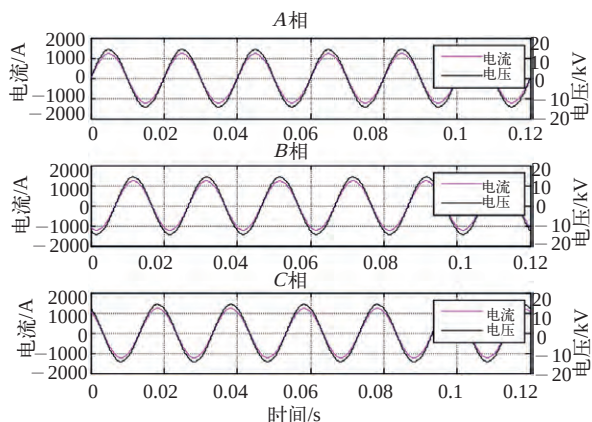


图8 补偿后YNd11变压器二次侧各相电压、电流

结束语

本文分析了基于YNd11变压器的无源补偿方案，建立了端口补偿容量匹配方程，对于各种类型负荷均能实现负序和无功的完备补偿，搭建了基于Matlab/simulink平台的仿真模型，仿真结果验证了方案的正确性。该方案为电力系统负序、无功补偿提供了理论依据。EA

(收稿日期：2015.03.01)

(编辑：白文亭)

(上接第73页)

图5中 t_1 时刻动静触头分离，断路器断口间产生电弧。 t_2 时刻电流停止流过被试断路器，电弧熄灭。电弧熄灭时刻正处于行程曲线斜率增大的起始点，也就是说触头分闸速度加快时刻电弧熄灭。然后通过改变脱扣脉冲的整定方法，进一步缩短燃弧时间，如图6所示。

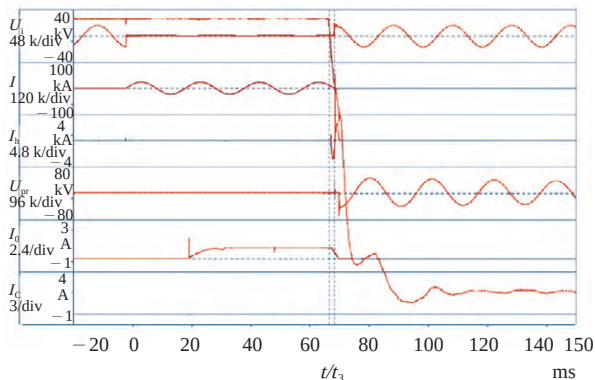


图6 负载试验重燃波形图

图6中 t_1 时刻动静触头分离，断路器断口间产生电弧。 t_3 时刻电流过零，而这时触头分闸速度仍处

于相对较低阶段，电弧重燃，直到下一个高频电流零点，电弧才熄灭，这是因为短路电流过零点和断路器的起弧点，在时间间隔上比较近，触头的运动速度不足以使触头间距离达到最小燃弧距离，无法满足灭弧条件，从而使电弧重燃。由以上重燃试验可知，图5中断路器的燃弧时间即为该断路器的最短燃弧时间。

结束语

由以上分析可知，断路器分合闸速度是决定燃弧时间基础，同时燃弧时间又受断路器合闸同期性、合闸时间、分闸同期性、分闸时间、灭弧介质以及灭弧方式的影响，各种因素相互作用、互相制约、互相影响，它们共同决定了断路器开断短路电流能力，在提高分合闸速度的同时，尽量减少其他因素的对开断性能的不良影响，是断路器结构设计中的应努力的方向。EA

(收稿日期：2015.03.01)

(编辑：白文亭)