

基于精密录波技术的超大断路器性能测试系统研制

分断电流和分断时间是超大直流电流断路器的重要分断性能参数。介绍了精密录波技术在超大电流断路器开断性能测试设备中的设计和应用，包括与超大电流发生器的同步控制，对录波信号的降噪滤波和由录波数据查找动作点以计算断路器开断动作电流及动作时间。系统由直流分流器进行录波信号拾取，再由单片机控制对经过信号无源、有源相结合的滤波双电源放大电路降噪放大后的信号进行逼近式高速A-D转换并存于高速静态RAM中，再将存于RAM中裸数进行快速数字滤波后上传至计算机，完成一次完整录波并分析计算分断电流和分断时间，通过试验验证系统的有效性。

肖双江/湖南长沙轨道交通有限公司 邓玉斌/长沙地铁运营公司
林树胜/珠海伊托科技有限公司

0 引言

目前我国的城市轨道交通体系均采用直流系统供电。快速分断的高压大电流直流专用断路器是轨道交通中的重要元器件，也是地铁供电系统安全保障环节重要的一环。为提高地铁系统送变电网络的稳定性和应急故障保障能力，防止断路器在正常情况下发生异常断路或在系统故障状态不能正常脱扣，研制出更加符合断路器性能的测试装置，并在断路器上架和使用过程中定期检测。

断路器的开断性能测试包含分断时的动作电流测试、动作时间测试及在特定电流上升率 di/dt 下的动作时间测试三个主要方面。断路器的断开过程是在毫秒的时间内完成的，要在断开瞬间精准地捕捉到断开的电流值和时间，降噪精密录波是唯一选择。本文介绍了如何在超大电流断路器开断性能测试设备中进行设计和应用，包括与超大电流发生器

的同步控制、录波信号的降噪滤波和通过录波数据查找动作点以计算断路器开断动作电流及动作时间。

1 动作电流与动作时间的定义

按GB/T 25890和IEC 61992的定义，分断电流（动作电流）是指使断路器开始分断动作最大的分断电流值；分断时间（动作时间）是指主电路中分闸操作开始时刻到全部触头分离时刻止的时间间隔。

分断电流和分断时间都是直流断路器的重要分断性能参数。在运维中，这两项参数的测量准确性直接影响到断路器性能，误判断可能导致系统灾难性的后果。

分断电流和分断时间的曲线如图1所示。图中， I_d 为设定的断开动作电流，测试按照GB/T 25890和IEC 61992的规定，不超出200 A/ms的电流上升率，由98% I_d 开始至104% I_d 结束，探测实际的开断电流； t_i 为断路器动作时间，也称脱扣时间，指从断路器的电流达到设定动作电流 I_d 的时刻开始一直到断路器开始动作的时间。

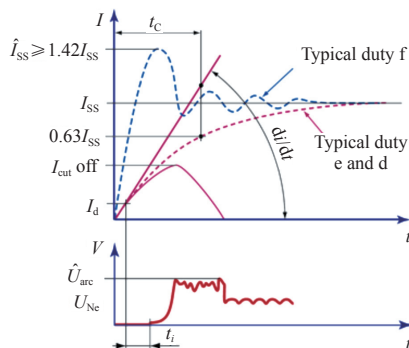


图1 分断电流和分断时间曲线

肖双江/高级工程师

关键词/Keywords

直流断路器 ·
分断性能 ·
分断电流 ·
分断时间 ·
录波 ·

不同的电流上升率 (di/dt) 对应不同的动作时间, 图2为Secheron_UR36-0断路器动作时间与 di/dt 的关系曲线。由图可见, 动作时间的范围为2~20 ms。在如此短时间的动作过程中, 只有通过测试设备内部的精密录波才能诠释整个动作过程特性。

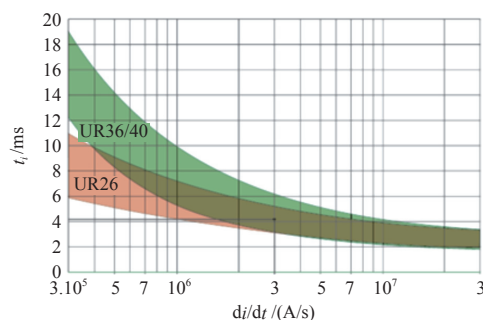


图2 动作时间与 di/dt 的关系曲线

2 录波功能的系统设计和实现

2.1 测试源及敏感器

断路器的开断性能测试需要有大功率直流源为整个测试提供测试电流。为避开AC-DC或DC-DC的直流电源带来的波纹干扰, 电流源直接采用能短时间提供超大电流(10 000 A或以上)的超级电容, 超级电容以时间换功率的形式工作, 既能提供短时间(10~30 s)的超大测试电流(10 000 A或以上), 又能以无纹波的纯直流方式提供电流, 为测试提供一个纯净的源。

要实现低噪声的录波, 敏感器的选择就显得非常重要。电流敏感器有霍尔互感器和分流器两种: 霍尔互感器是电-磁-电的两次转换过程, 容易引入干扰, 且准确度和线性度不高; 分流器直接将电流转化为压差, 无迟滞, 直接量, 不易引入干扰。所以对于精密录波, 分流器是最佳选择。

2.2 信号拾取及放大

如前文所述, 系统电流源采用储能、高输出功率直流系统, 敏感器采用分流器, 输入信号为直流瞬态信号。信号的拾取和放大的主要干扰有两种: 一是来自空间或系统工作电源的偶发性尖峰脉冲干扰; 另一种是来自于工作电源的纹波干扰。

为保证信号拾取不对信号源造成影响, 避免测量误差, 应采用高阻采集模式。信号滤波放大四级双地四电源, 两级无源滤波加两级有源滤波放大的方式, 使高频尖峰脉冲干扰和纹波得到高效抑制。图3为信号拾取、滤波放大示意电路。

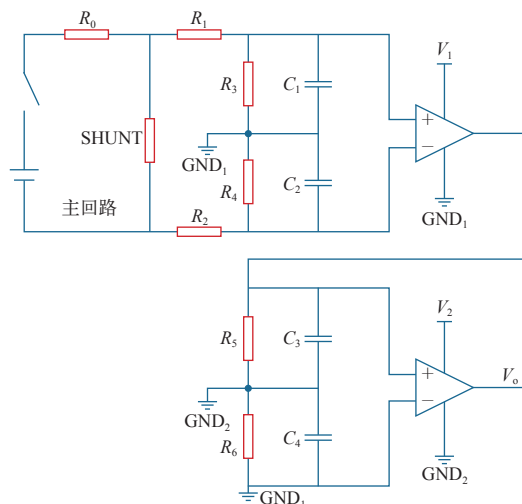


图3 信号拾取、滤波放大示意电路

分流器的电压信号经过高阻 R_1 、 R_2 计入到由 R_3 、 R_4 、 C_1 和 C_2 组成的低通及纹波无源滤波电路, 再进入到高输入阻抗、高共模抑制比(115 dB at $G=1\ 000$)、低偏移电压(50 μ V), 低温漂(0.25 μ V/ $^{\circ}$ C)和双电源的放大器IN114。信号再进入到与上述相同结构的无源、有源相结合的滤波双电源放大电路, 进一步抑制干扰和噪声, 从而获得比较纯净的录波信号。多重滤波是抑制噪声和提高信噪比的重要手段。

2.3 高速A-D转换

由于录波范围是2~20 ms, 录波的采样频率必须是5~20 kS/s级别。虽然积分式A-D转换能更加有效抑制纹波干扰, 但要能抑制50 Hz工频或其倍数的纹波, A-D积分转换时间一般要选用100 ms或其倍数的时间周期。

只有逐步逼近式的A-D转换才能提高这样的高速模数转换, 但逐步逼近式的A-D转换抗干扰能力较高, 对输入信号的信噪比要求高, 信号的前期滤波放大就起着关键性的作用。前文所述的信号拾取和滤波放大处理后, 使逼近式的A-D转

换也能达到积分式A-D的去纹波效果。

2.4 录波系统构成

系统以能短时间提供超大电流(10 000 A或以上)的超级电容作为直流电流源,直流分流器作为电流拾取敏感器,信号滤波放大四级双地四电源,采用两级无源滤波加两级有源滤波放大的方式,进入逼近式高速A-D转换,数据存于高速静态RAM中。整个系统的操作和协调由单片机CPU控制,并对储存于静态RAM中由A-D转换而来的数据进行数字滤波。单片机接收上位PC机控制,并将A-D转换数据经数字滤波后传送到PC机。系统的构成如图4所示。

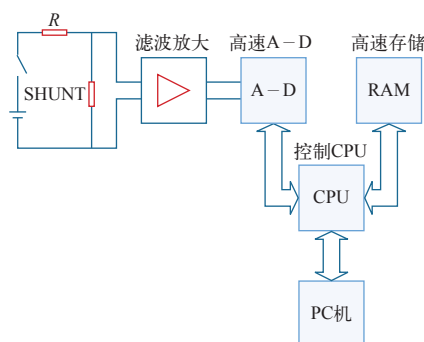


图4 录波系统构成示意图

为了配合高速A-D输出数据的存储,系统采用高速静态RAM与逼近式A-D转换相配合,使通过率达到50~200 kS/s范围内。本系统裸数采样频率控制在50~200 kS/s,数字滤波基本采用10:1的方式由裸数获得最终结果数据。由于有效信号是直流瞬态信号,已采用高效抑制尖峰和纹波干扰,进入A-D转换的信号比较纯净,因此数字滤波采用比较高效和简易的算法。即在10个裸数中,各去除最大和最小的两组数,将剩余的6个数取算术平均值作为最终A-D转换结果。

3 试验验证

为了验证本精密录波系统的有效性以及在超大电流直流高速断路器分断性能中对分断电流和分段时间测试的实用性,选取了湖南长沙轨道交通二号线所用的直流高速断路器UR-40-82,正常工作电流4 000 A,一级分断电流有6 000 A和12 000 A两档。

分断时间测试电流上升率 di/dt 选取在 $3 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ A/s之间,分断时间在5~20 ms之间,全录波时间在500 ms之内。分断电流的测试,电流上升率不大于200 A/ms,全录波时间在3 s以内。经超过500次的试验,录波效果良好,波形光滑无毛刺,为分断电流和分断时间的测量计算提供了坚实可靠的数据。下面是典型的测试示例。

3.1 UR-40-82断路器分断电流测试及录波

1) 12 000 A分断电流测试:进步值200 A,每步200 ms。图5为12 000 A档分断电流录波,分断电流为12 962 A。

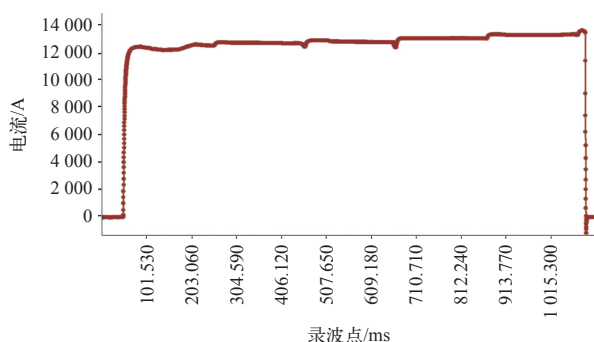


图5 12 000 A档分断电流录波

2) 6 000 A分断电流测试:进步值200 A,每步200 ms。图6为6 000 A档分断电流录波,分断电流为6 415 A。

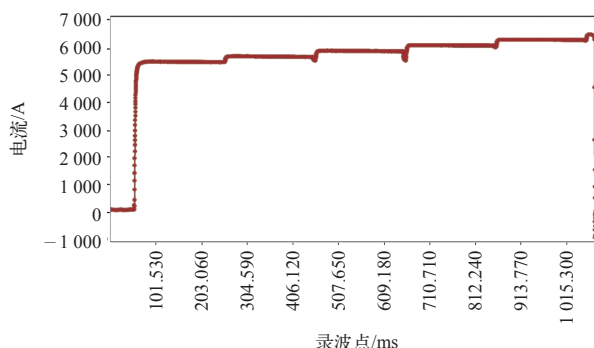


图6 6 000 A档分断电流录波

3.2 UR-40-82断路器分段时间测试及录波

1) 12 000 A分断时间测试1:开始电流值为10 250 A,结束电流值为13 062 A, $di/dt=5 \times 10^5$ A/s,分断时间为9.295 ms。12 000 A档分断时间录波如图7所示,其放大图如图8所示。

2) 12 000 A分断时间测试2:开始电流值为

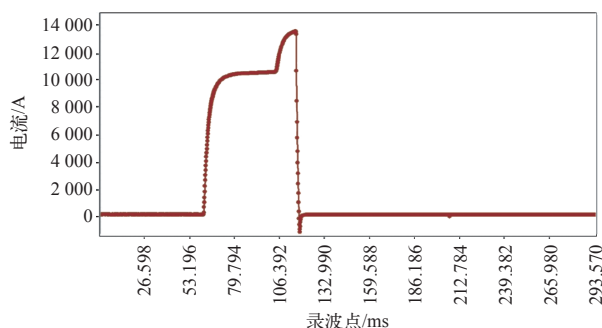


图7 12 000 A档分断时间录波1

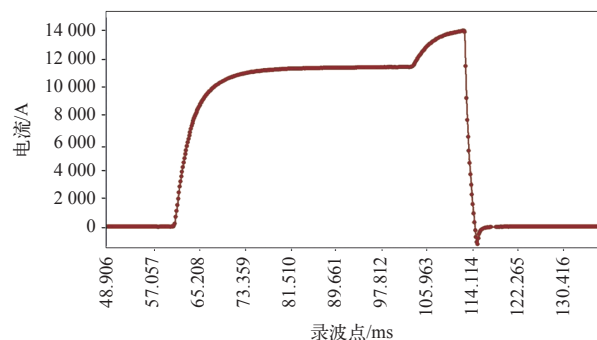


图8 12 000 A档分断时间录波放大图1

8 000 A, 结束电流值为13 624 A, $di/dt = 1 \times 10^6$ A/s, 分断时间为8.294 ms。12 000 A档分断时间录波如图9所示, 其放大图如图10所示。

3) 6 000 A分断时间测试: 开始电流值1 850 A,

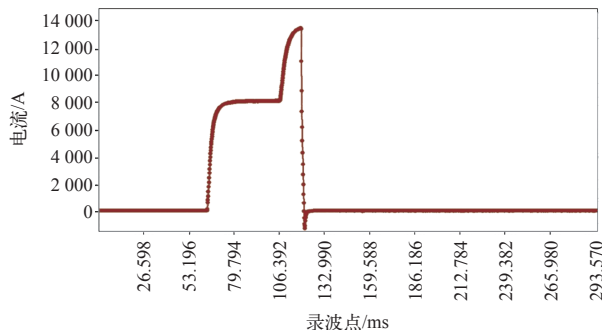


图9 12 000 A档分断时间录波2

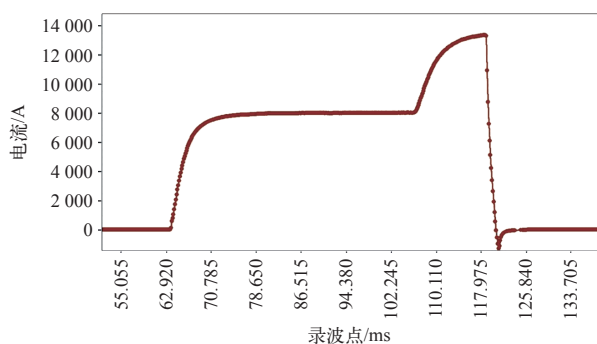


图10 12 000 A档分断时间录波放大图2

结束电流值8 278 A, $di/dt = 1 \times 10^6$ A/s, 分断时间为11.011 ms。6 000 A档分断时间录波如图11所示, 其放大图如图12所示。

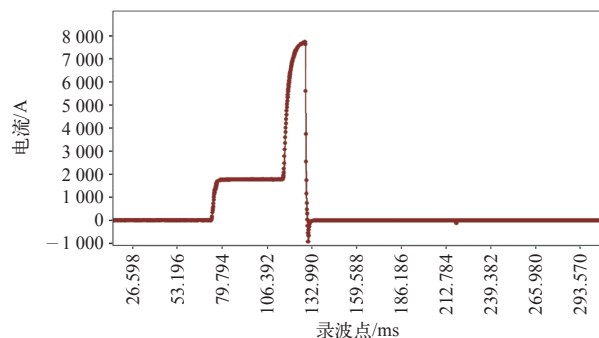


图11 6 000 A档分断时间录波

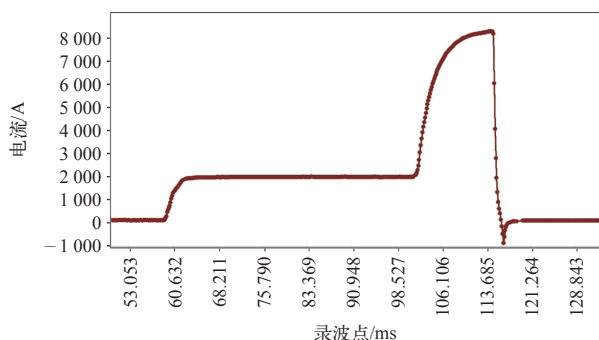


图12 6 000 A档分断时间录波放大图

从多次试验的结果看, 在0~16 000 A范围内, 录波电流准确度达到了 $(30 \pm 5\%)$ A, 录波时间达到了 $(75 \pm 5\%)$ μ s, 符合超大电流直流快速断路器的测量要求。

4 结束语

本文介绍的录波系统采用了具备高速、较高信噪比和12位转换准确度的AD7892。其转换时间1.47 μ s, 吞吐率最高到达了600 kS/s, 满足采样和数字滤波的要求。系统采用的芯片提供了高速串行和并行的数据输出端口, 为快速储存数据提供了可靠基础, 使裸数与结果数据的比例达到10:1以上, 为数字滤波提供充足的数据宽裕度。

该精密录波系统在快速断路器测试中有效实现了分断电流、分断时间及设定电流上升率 di/dt 下的分断时间测试。为断路器特别是应用于地下轨道交通的断路器现场运维提供了有效和必要的手段。

(收稿日期: 2017-06-09) EA