

特高压断路器容性电流开合试验方法研究

黄 实, 姚斯立, 张海峰, 李 鹏, 杜 炜, 刘浩军, 程 茵, 那 虎

(西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Study on Test Method of Capacitive Current Switching for Ultra-high Voltage Circuit Breakers

HUANG Shi, YAO Si-li, ZHANG Hai-feng, LI Peng, DU Wei, LI Hao-jun, CHENG Yin, NA Hu

(Xi 'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi 'an 710077, China)

摘要: 主要介绍特高压断路器容性电流开合试验方法——合成试验法和直接试验法。通过分析超高压断路器容性电流开合直接试验的结果, 提出有分闸电阻与无分闸电阻型特高压断路器容性电流开合直接试验方法, 并采用 PSCAD 软件对两种直接试验回路进行了仿真模拟和比较。

关键词: 特高压断路器; 容性电流开合; 直接试验; 分闸电阻

中图分类号: TM56

文献标识码: A

Abstract: This paper mainly introduces test methods of synthetic test and direct test for capacitive current switching for ultra-high-voltage (UHV) circuit breakers. By analyzing the results of capacitive current switching direct test for extra-high-voltage circuit breakers, a direct test method of capacitive current switching for UHV circuit-breaker in parallel with or without opening resistors are presented in this paper, and the two test circuits will be simulated and compared by PSCAD software.

Key words: ultra-high-voltage circuit breaker; capacitive current switching; direct test; parallel opening resistors

0 引言

容性电流开合试验对特高压断路器非常重要, 尽管容性电流不大, 但切合该电流会引起严重的过电压, 对系统造成很大的危害。

容性电流开合试验可采用现场试验, 也可在试验室进行。试验室试验可采用合成试验与直接试验, 试验回路由电容器、电抗器、电阻等集中元件组成。以下结合西安高压电器研究所(简称西高所)大容量试验室已完成的工作及现有的条件对特高压断路器开合容性电流的试验方法进行介绍、分析和比对。

1 合成试验法简介

对特高压断路器, 当试验室短路功率及容性负

载不能满足直接试验要求时, IEC 也推荐了合成试验方法。容性电流开合的合成试验回路由电流回路和电压回路两部分组成。当采用感性或阻性的电流回路作为替代时, 两个回路都应具有容性的特征。两个回路的电源可以串联也可以并联, 可由短路发电机或振荡回路提供。以下介绍两种试验方法:

方法 1: 由短路发电机 G 经变压器为电流回路提供感性电流, 由两个 L-C 回路为电压回路提供容性电流及试品开断后的恢复电压, 电压和电流回路并联, 对试品试验断口两端加压, 试验线路图见图 1, 该方法正确考核了断路器带电导体和接地外壳之间的绝缘, 回路的压升可由两个电压回路电感 L_{s1}, L_{s2} 调节。

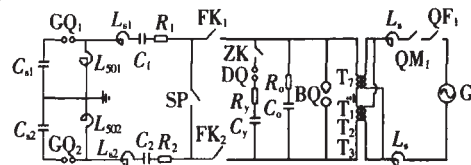


图 1 L-C 为电压回路的并联型合成试验回路

该回路的优点是负载电容 C_1, C_2 上的工作电压低, 试品重击穿后最高电压小于 1 200 kV, 辅助开关重击穿后最高电压小于 600 kV。缺点是当恢复电压持续 100 ms 时衰减了约 25%, 超过了 300 ms 时断路器断口电压的衰减不超过 10%^[1-2] 的标准要求。图 1 中: G 为短路发电机; QF₁ 为保护断路器; QM₁ 为合闸开关; T₁, T₂, T₃ 为短路变压器; T₇ 为升压变压器; R₀, C₀ 为调频电阻、电容; SP 为试品; R₁, R₂, C₁, C₂ 为负载电阻、电容; C_{s1}, C_{s2} 为主电容; L_s 为电源侧电感; L_{s1}, L_{s2}, L₅₀₁, L₅₀₂ 为高压回路电感; GQ₁, GQ₂ 为隔离球隙; DQ 为点火球隙; BQ 为保护球隙; R_y, C_y 为延弧电阻、电容; FK₁, FK₂ 为辅助开关; ZK 为真空开关, 下同。

方法 2: 由短路发电机 G 经一台短路变压器 T₁

收稿日期: 2006-07-24

作者简介: 黄 实(1972-), 男, 浙江省丽水人, 高级工程师, 主要从事高压电器产品大容量试验研究工作。

为电流回路提供感性电流，两个电压回路提供容性电流及试品开断后的恢复电压，电压和电流回路并联，对试品试验断口两端加压。试验线路图见图2，其中电压源1为发电机经3台短路变压器 T_1, T_2, T_3 将电压升至252 kV，电压源2为发电机经升压变压器 T_7 将电压升至252 kV，两个电压分别施加于试品断口两端。此回路的压升可通过电流回路的感性特点加以补偿。

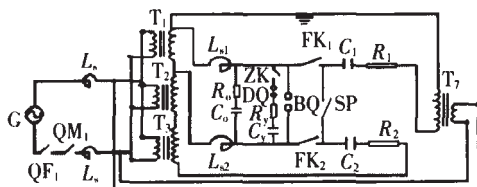


图2 发电机为电压回路的并联型合成试验回路

该回路的优点是向试品断口两端分别施加的极性电压波形与直接试验几乎相同，恢复电压不衰减，电容器工作电压低。但它的缺点是使用设备多，线路复杂，试验运行不方便。

以上的合成试验线路较为复杂，对控制要求高，试验成功率较低，但所需要的设备参数相对较低，试验压升可以满足要求，当试验室电源容量不足时可采用。上述方法不适合带分闸电阻断路器的试验，因为无法对主断口和辅助断口同时进行考核。

2 直接试验法及其分析

合成试验虽然对设备的容量要求不是很高，但它只是一种直接试验的替代方法。随着西高所大容量试验室技术改造项目的完成，试验能力得到了很大的提高，已具备超高压断路器开合容性电流直接试验的条件，并完成了800 kV及550 kV罐式断路器容性电流开合直接试验。以下通过分析已完成的超高压断路器容性电流开合直接试验的结果，提出特高压断路器在无分闸电阻与带分闸电阻时的容性电流开合直接试验方法。

2.1 超高压断路器开合容性电流直接试验结果分析

在超高压断路器开合容性电流直接试验中，电源采用短路变压器 T_1, T_2, T_3 与升压变压器 T_7 反接，中间接地，双边加压的方法。试验时可根据试验电压的不同改变 T_1, T_2, T_3 接法。试验原理图见图3，图中： I 为电流测量； U 为电压测量。LC2^[1-2]试验方式的工频及TRV示波图见图4和图5。

试验结果为：试验电流 $I_c=504$ A；试验电压 $U_1=$

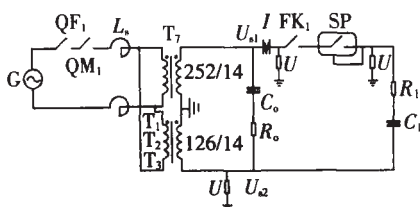


图3 容性电流开合直接试验原理图

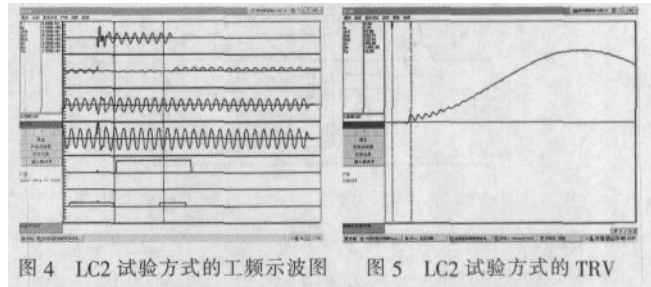


图4 LC2试验方式的工频示波图 图5 LC2试验方式的TRV

399 kV；电源电压 $U_{s1}=233$ kV；电源电压 $U_{s2}=122$ kV；恢复电压最大值 $U_c=1052$ kV；时间 $t_2=8.3$ ms；暂态恢复电压初始部分(ITRV)的峰值 $U_1=90$ kV；时间 $t_1=221$ μ s；试验压升 $u=44$ kV。

从试验结果可以看出， u 较高(14%)， U_1, I_c, U_c 及 t_2 参数均满足标准要求。因试验回路电源侧未接调频回路的 C_0, R_0 ，所以 $U_1=90$ kV>38 kV， $t_1=221$ μ s<292 μ s，与标准偏差较大。

试验压升较高主要是电源侧电感 L_s 引起的。在满足标准要求的试验电流和试验电压下， L_s 过大将使断路器ITRV的 U_1 参数增高，而使恢复电压的最大值 U_c 减小。对断路器来说，电流过零后电弧是否复燃决定于ITRV的 U_1 和 t_1 ，而是否出现电弧的重击穿则往往与 U_c 有很大关系^[3]。文[1]，[2]中有这样的说明：如果电压变化超过规定值，允许使用规定的恢复电压(见文[1]6.111.10)来替代进行试验。因此，试验时需要通过提高试验电压来满足标准要求的 U_c 。通过调节电源侧 R_0 及 C_0 来降低 U_1 和增大 t_1 。如果 U_1 仍高于标准的要求值，可通过合理选择 C_0 及 R_0 来降低ITRV的上升率，使其对断路器初始部分的开断影响降至最低，保证试验的等价性。 R_0, C_0 的计算参照文[4]。较高的压升对试验系统负载电容器和调频电容器的绝缘及对地绝缘要求增高，但电源侧电感 L_s 对限制试验中的合闸涌流起着积极的作用。

2.2 无分闸电阻型特高压断路器直接试验方法

无分闸电阻型特高压断路器的直接试验回路采用短路变压器 T_1, T_2, T_3 串联，将电压升至189 kV再与升压变压器 T_7 反接，中间接地，双边不对称加压的方法。试验原理图见图3，只是试验参数稍有差别，试验参数计算结果见表1。试验时可通过提高试验电压来满足标准要求的 U_c 。通过合理选择 C_0 及 R_0 来弥补压升对试品开断的影响。该方法对1100 kV罐式断路器外壳和带电导体可施加与断口相同的全电压。

表1 1100 kV无电阻容性开合直接试验参数

试验参数	电源阻抗 X_s/Ω	试验电流 I/A	试验电压 U_1/kV	电压变化 $U/\%$	负载电容 $C/\mu F$	调频电容 $C_0/\mu F$	调频电阻 R_0/Ω	断口恢复电压最大值 U_c/kV
LC ₁	125	300	420	8.4	2.2	0.5	600	1223
LC ₂	125	1200	478	27	8	0.8	900	1147

2.3 带分闸电阻型特高压断路器直接试验方法

特高压断路器有的在主断口并联电阻元件，采用并联电阻开断的方式来降低断路器开断时的过电

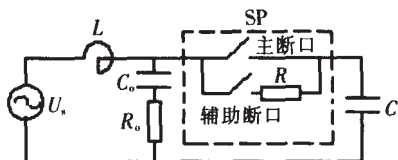


图 6 带分闸电阻的断路器容性电流开断的等效原理图

压。等效原理图见图 6。

带分闸电阻断路器在进行容性电流开断时,主断口先开断,开断时电源电压 U_s 正处于电压的峰值 U_m ,电容 C 也被充电到电压 U_m 。主断口电流过零后电源电压按 $U_m \cos t$ 规律降低,于是电容 C 通过电阻 R 对电源放电,此时主断口电压 $U_c = CR \omega U_m [\sin(t - \varphi) + \sin e^{-t/RC}] / \sqrt{1 + (CR)^2}$ [5],其最大值也不会超过 U_m 。与不带电阻开断的主断口电压的最大值 $2U_m$ 相比,其值大幅度地下降。主断口开断后约 30 ms 辅助断口开断,由于开断电阻的接入使回路的阻抗和功率因数等发生了变化,向断路器极间施加的电压波形变成 $[\cos - \cos(t + \varphi)]$,其中 $\varphi = \arctan(CR)$,该波形的峰值与不带电阻开断的断口电压波形 $(1 - \cos t)$ 的峰值相比稍下降,但电压波前部分的 du/dt 却急剧上升。各断口恢复电压比较见图 7。

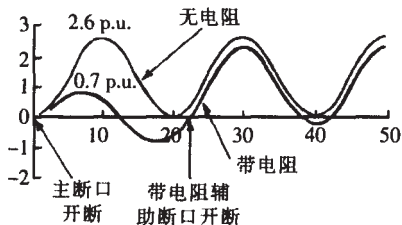


图 7 带电阻与无电阻开断恢复电压比较

通过以上分析认为,对 1100 kV 带分闸电阻断路器可选用无电阻型断路器所采用的直接试验回路,该回路与实际运行条件接近,可较好地反映带电阻断路器容性电流开断过程。但由于电源侧电感 L_s 的影响,各断口开断时回路参数如 $\varphi = \arctan [R/(1/C - \omega L)]$ 及阻抗等发生变化,各断口开断后的电压也将发生变化,因此需对试验回路参数进行合理调节,以满足试验的等价性。试验中 U_c 的要求值与理想值 ($L_s=0$) 相比可适当的下调,下调幅度仍需进一步商榷。

1100 kV 带分闸电阻的罐式断路器试验时可对带电导体和外壳施加与断口相同的电压,该电压为直流叠加交流电压,其峰值虽略低于电源侧带电导体与外壳全交流电压 U_m ,但高于负载侧带电导体与外壳全直流电压 $U_m \cos$,对断路器带电导体与外壳

的考核与实际运行条件接近,基本保证试验的等价性。标准要求见文[6]。

2.4 带电阻与无电阻型直接试验回路仿真和比较

带电阻与无电阻型断路器的试验参数可采用 PSCAD 软件进行模拟。针对 LC2 试验方式的两种直接试验回路仿真波形见图 8 和图 9,仿真结果比较见表 2。

由表 2 可以看出,由于试验中电阻的影响,断路器断口施加的恢复电压最大值 U_c 降低到 902 kV (无电阻时为 1199 kV),但恢复电压波前部分的 du/dt 却增大到 $0.17 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ (无电阻时 $0.14 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$);主断口开断时的恢复电压 U_c 最大值仅为 342 kV;负载电容对地电压 U_{ec} 的峰值降低到 587 kV (无电阻时 885 kV);试品开断后负载电容器的直流电压 U_L 降低到 378 kV (无电阻时 676 kV)。各断口恢复电压的最大值减小降低了断路器电流过零后重击穿的可能性,即使发生重击穿,由于电阻的接入,使试验系统

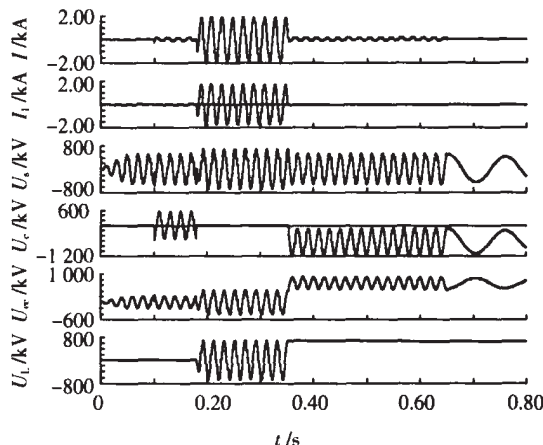


图 8 无电阻型 LC2 试验方式 PSCAD 仿真

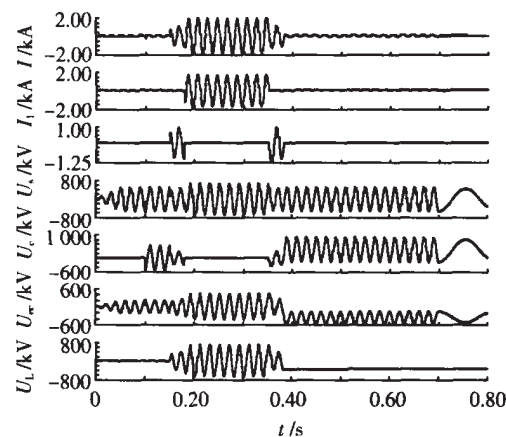


图 9 有电阻型 LC2 试验方式 PSCAD 仿真

表 2 有电阻与无电阻试验参数比较

试验参数	总电流 I/A	主断口电流 I1/A	辅助断口电流 I2/A	电源电压 U_s /kV	恢复电压最大值(主断口开断时) U_c /kV	恢复电压最大值(辅助断口开断时) U_a /kV	负载电容直流电压(SP开断后) U_L /kV	负载电容对地电压峰值 U_{ec} /kV	断口恢复电压上升率(SP开断后) du/dt
无电阻	1315	1202		378	1199		676	885	0.14
有电阻	1315	1202	790	378	342	902	378	587	0.17

集中断信号来实现,每个数据采集模块由各自的定时器发定时采样中断,管理板每隔10个采样中断发一个同步采集中断信号,3块数据采集模块每收到一个同步采集中断信号,就即刻修改自己的定时器,使其一致,这样就可以达到同步采集的目的。同步采集中断的中断优先级比定时采样中断要高。

3.4.2 故障启动的实现

故障报告截取7个周波数据,正常时不停地刷新7个周波的采样数据,包括模拟量和开关量,同时在NVRAM中保存历史数据,确保数据安全。采集开始等待7个周波,采满7个周波,判据投入标志位置位,故障判断启动。如果本身故障启动或者接到外部其它采集模块的故障启动信号,则故障位标志置,执行故障处理子程序。如无上述情况则结束采样,中断服务程序回到主程序循环。进入故障处理程序时先记录时间,然后向其它数据采集模块和数据处理模块发送故障启动信号,完成故障数据同步采集。将故障前3个周波数据和故障时数据同时存入NVRAM中,跳出中断后在主程序中上传给数据管理模块。

4 在线监测装置的软件方案

按照系统硬件的层次化配置,系统软件也按层次化、模块化设计。整个系统软件可分为3部分:下层数据采集即数据采集模块软件;下层系统管理软件即数据管理模块软件和下层显示板软件;上层管理、故障综合分析诊断软件。

由于篇幅有限,这里只简单介绍下层数据采集模块软件。该软件主要完成数据采集计算,异常启动判断,通讯上传等功能。主控板实时监测断路器三相电流,计算开断电流、母线电压的实虚部及幅值,断路器分闸线圈电流,线圈电压,实现各种非电量信号的数据采集,记录各种开关量。发出断路器异常报警,硬件自检故障报警,断路器检修(电寿命到)报警。程序结构分为主程序和中断程序两个部分。在中断程序中实现定时采样,故障异常判断,故障录波数据存储等。中断执行时间必须有一定的裕

(上接第34页)主电容的反向充电电压降低,入射波和反射波的幅值都减小,增加了试验系统的安全性。

3 结语

试验室对特高压断路器实施容性电流开合试验可采用合成试验或直接试验。合成试验线路复杂,控制要求高,试验成功率低;直接试验压升较高,但试验条件与实际运行条件接近,试验线路及操作简单,效率高。西高所大容量检测室利用现有的设备适当增容,合理选择试验回路参数,可满足特高压无分闸电阻及带分闸电阻型断路器容性电流开合直接试验的要求。

度以满足实际需要,大约占2/3个中断间隔时间。

5 结语

电气设备在线监测是变电站综合自动化的拓展,断路器状态在线监测是其中关键的一个环节。介绍了一种基于定点DSP+CPLD模式的断路器综合在线监测装置,阐述了监控功能的硬件实现和所需的传感隔离技术,其改进结构尤其适合中小变电站场合,性价比高,可扩展性强。对于大型变电站,因监测设备多,监测量大,可以用几台该种结构的监测装置通过CAN网通讯构成一个网络来实现。该装置同时具有很高的通用性能,只需要改变前端传感器并配以相应的诊断分析软件就可以实现变电站其它各种设备的在线监测。

参考文献:

- [1] 戴怀志. 断路器综合在线监测系统研制[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 104-106.
- [2] 刘全志. 高压断路器在线监测与诊断技术[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 29-31.
- [3] 石飞. 弹簧操动机构的真空断路器机械特性计算与监测[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 39-42.
- [4] 赵霞. 用细化频谱技术分析断路器操动机构振动信号[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 37-40.
- [5] 沈力. 断路器操动机构振动信号的分析[J]. 高压电器, 1996, 32(6): 11-13.
- [6] 沈力. 断路器振动信号的相频特性及在监测中的应用[J]. 电工技术学报, 1997, 12(3): 42-45.
- [7] 沈力. 高压断路器机械状态监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 12(7): 113-117.
- [8] 孟永鹏. 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.
- [9] 文学. 高压断路器机械特性的在线监测[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 40-44.
- [10] 关永刚. 真空断路器电磨损技术的改进[J]. 高压电器, 2001, 37(4): 1-4.
- [11] 狄美华. 开关电器触头电寿命诊断方法综述[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 201-204.
- [12] 邵德军. 电气设备在线监测数据采集系统中大容量数据存储的实现[J]. 继电器, 2004, 32(12): 68-70.

参考文献:

- [1] GB 1984-2003. 交流高压断路器[S].
- [2] IEC 62271-100:2001. 高压开关设备和控制设备 第100部分: 高压交流断路器[S].
- [3] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 清华大学出版社, 2000.
- [4] 王仁甫. 计算断流能力试验中暂态恢复电压的使用方法[J]. 高压电器, 1978, 14(6): 1-20.
- [5] 尚振球, 郭文元. 高压电器[M]. 西安交通大学出版社, 1992.
- [6] IEC 1633:1995. 高压交流断路器-金属封闭和落地罐式断路器短路和开合试验程序的导则[S].