

ZF8-550/4000-63 GIS的研制

张 猛, 马曾锐

(西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710077)

Design and Development of ZF8-550/4000-63 GIS

ZHANG Meng, MA Zeng-rui

(Xi'an Shiky High Voltage Electric Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

摘要: 550 kV GIS是我国500 kV电网建设的重要设备之一。在ZF8-550/3150-50 GIS的基础上进行增容设计, 研制出额定电流4 000 A、额定短时耐受电流63 kA的GIS。笔者介绍了主回路及接地回路通流能力、动热稳定性的计算和快速接地开关合闸速度的计算及试验结果, 并通过试验验证了降低VFTO措施的有效性。

关键词: 550 kV GIS; 隔离开关; 母线充电电流; VFTO

中图分类号: TM596

文献标志码: A

Abstract: 550 kV GIS is one of the most important equipments for the construction of 500 kV power network in China. The GIS is upgraded based on type ZF8-550/3150-50 GIS, with the rated current of 4 000 A and the rated short time withstanding current of 63 kA. This paper introduces the current carrying capability of main circuit and earthing circuit, the flow capacity, the caculation of dynamic thermal stability and the calculation of closing speed of fast making earthing switch, as well as their test results. The effectivity of the measure to reduce VFTO is verified through test.

Key words: 550 kV GIS; disconnector;

bus-charging current; VFTO

0 引言

随着电力系统迅猛发展, 系统的容量越来越大, 电力系统对额定短路开断电流为63 kA的550 kV GIS的需求也越来越大, 结合额定短路开断电流为63 kA的420 kV GIS工程, 某公司于2003年底立项研发ZF8-550/4000-63 GIS, 该公司在1993年已成功研制了额定短路电流为50 kA、额定电流为3 150 A的ZF8-550/3150-50 GIS, 其所配气动操作的双断口断路器的短路开断电流已达67 kA、额定电流4 000 A, 并于2003年研发出配液压操动机构的额定电流

4 000 A、额定短路开断电流63 kA的双断口断路器。故ZF8-550/4000-63 GIS研发重点在提高主回路的通流能力、主回路和接地回路的短时耐受电流能力、快速接地开关的短路关合能力、隔离开关开合母线充电电流能力及绝缘设计, 主要参数见表1。

表1 ZF8-550/4000-63 GIS主要参数

| 项目 | 额定值 |
|------------------|-------|
| 额定电压/kV | 550 |
| 额定电流/A | 4 000 |
| 额定短时工频耐受电压/kV | 680 |
| 额定操作冲击耐受电压/kV | 1 175 |
| 额定雷电冲击耐受电压/kV | 1 550 |
| 额定短时耐受电流/kA | 63 |
| 额定峰值耐受电流/kA | 160 |
| 隔离开关开合母线充电电流/A | 2 |
| 快速接地开关开合电磁感应电流/A | 200 |
| 快速接地开关开合静电感应电流/A | 25 |
| 断路器每极断口数 | 2 |
| 断路器操动机构型式 | 液压或气动 |
| 隔离开关和接地开关操动机构型式 | 电动 |
| 快速接地开关操动机构型式 | 电动弹簧 |

1 通流能力设计

主回路的通流能力设计基准为6 300 A, 短时耐受电流设计基准为80 kA、3 s。

隔离开关中的连接导体一般采用铸铝件且其尺寸相对较大, 通流能力较强, 按照载流量计算, 一般通流能力均在11 000 A左右。隔离开关载流的薄弱点在动触头和静侧梅花触头, 为兼顾通流能力和减轻触头重量, 动触头采用纯铜管, 静触头采用多片触指并联的梅花触头, 每片触指的接触压力 $F_{\text{c}}=20\sim 30\text{ N}$, 铜导体的经济电流密度为 2 A/mm^2 , 隔离开关动触

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2007-11-19

作者简介: 张 猛(1963-), 男, 高级工程师, 硕士, 长期从事高压六氟化硫断路器和GIS的研究和产品开发。

头计算的通流能力约为 10 000 A, 梅花触头的通流能力约为 9 000 A; 母线导体采用成型铝管, 母线触头采用梅花触头, 触指为纯铜板, 触指接触压力 $F_j=35 \sim 40 \text{ N}$, 铝管的经济电流密度为 1 A/mm^2 。母线梅花触头计算的通流能力约为 10 000 A, 母线导体的通流能力约为 7 000 A。接地开关/快速接地开关梅花触头触指接触压力 $F_j=35 \text{ N}$ 。

梅花触头短时耐受电流(热稳定)的计算采用计算接触点的接触电阻电压降, 文[1]表明: 铜触头触点熔化时的接触电阻电压降为 0.4 V, 铝触头触点熔化时的接触电阻电压降为 0.26 V, 文[2]取经济安全系数 1.67, 则铜触头允许接触电阻电压降 $U_k=0.4/1.67=0.23 \text{ V}$, 铝触头允许接触电阻电压降 $U_k=0.26/1.67=0.16 \text{ V}$ 。

文[1]表明: 梅花触头峰值耐受电流(动稳定)的计算采用经验公式 $I_m=nk\sqrt{0.1F_j}$, 其中 n 为梅花触头的触指数量; k 为梅花触头系数, 铜触指-铜导体时 $k=5$, 铜触指-铝导体时 $k=2$ 。

据此, 对隔离开关(DS)梅花触头、接地开关(ES)梅花触头、母线梅花触头通过 80 kA 短路电流时的 U_k 、峰值耐受电流 I_m 计算结果见表 2。

表 2 各类梅花触头动热稳定计算结果

| | U_k/V | I_m/kA |
|----|----------------|-----------------|
| DS | 0.16 | 339 |
| ES | 0.18 | 299 |
| 母线 | 0.15 | 294 |

2 快速接地开关的短路关合

根据 IEC 62271-102 和 GB 1985-2004 对 E1 级接地开关的要求, 快速接地开关应具有两次关合短路电流的能力, 其中一次关合在额定电压波的峰值处, 此时产生一个对称的短路电流以及最长的预击穿电弧, 该电流为额定短路电流的对称分量; 另一次关合在额定电压波零点处, 此时无预击穿, 产生一个完整的非对称短路电流, 该电流为额定短路关合电流。

2.1 快速接地开关的分合闸速度

快速接地开关不仅要关合短路电流, 而且还要有开合感应电流的能力, 故不仅要有合适的合闸速度, 而且更要有分闸速度。快速接地开关配用的电动弹簧机构分闸功和合闸功基本一样, 故快速接地开关的合、分速度由短路关合时需要的速度确定, 见图 1。

短路关合时, 触头电动力及触头接触压力形成的摩擦力是关合时的阻力, 关合时合闸功必须大于阻力功才能可靠关合, 即

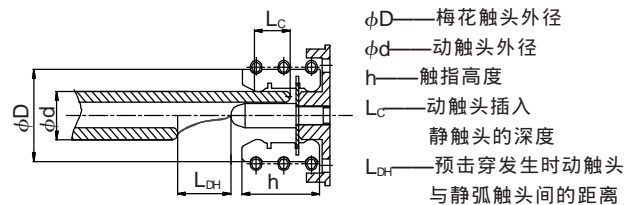


图 1 快速接地开关动静触头结构尺寸示意图

$$\frac{1}{2} m^2 (F_D + F_j) \cdot f \cdot L_c + F_{DH} \cdot L_{DH} \quad (1)$$

式(1)中, $m=4.4$ 为快速接地开关的动触头运动部件归化到动触头处的归化质量, kg; g 为快速接地开关的合闸速度, m/s; F_D 为动静触头接触后触头电动力, N; $F_j=1120$ 为梅花触头的弹簧压力, N; $f=0.2$ 为摩擦系数; $L_c=0.04 \text{ m}$; F_{DH} 为发生预击穿时动触头的电动力, N。

以 LW13-550 和 ZF9-252 的断路器在短路关合产生预击穿时的电场强度为初步设计依据, 考虑 SF_6 气体压力和快速接地开关的具体结构, 通过电场计算, 预测预击穿电弧的最大长度 $L_{DH}=0.04 \text{ m}$ 。电场计算结果见图 2。

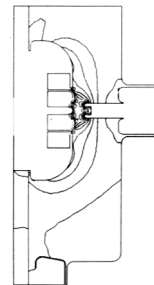


图 2 快速接地开关预击穿时电场计算图

有预击穿时

$$F_D = 1 \times 10^{-7} \times (\sqrt{2} \times 63)^2 \times 10^6 C = 58 \text{ N} \quad (2)$$

其中: C 为回路系数,

$$C = \frac{4h}{n(D-d)} \left(1 - \frac{d}{D-d} \ln \frac{D}{d} \right) = 0.072$$

$$F_{DH} = 1 \times 10^{-7} \times (\sqrt{2} \times 63)^2 \times 10^6 \times n(D/d) = 514 \text{ N}$$

故 $(F_D + F_j) \cdot f \cdot L_c + F_{DH} \cdot L_{DH} = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$3.7 \text{ m/s}$$

无预击穿时

$$F_D = 1 \times 10^{-7} \times 160^2 \times 10^6 C = 184 \text{ N}$$

$$(F_D + F_j) \cdot f \cdot L_c = (184 + 1120) \times 0.2 \times 0.04 = 10.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$2.2 \text{ m/s}$$

应考虑一定的设计安全系数, 则快速接地开关的合闸速度为

$$4.3 \text{ m/s}$$

2.2 可靠关合的措施

为减小快速接地开关在短路关合过程中动触头的径向摆动, 在结构设计时优化动触头的导向结构, 增加了导向件长度的同时提高了动触头与导向件间

的配合精度，避免在关合时因动触头的摆动而碰撞到静弧触头或静侧屏蔽罩上导致关合失败。

3 隔离开关开合母线充电电流能力

550 kV GIS 中的隔离开关在切合母线充电电流时，在合闸过程中，因合闸速度不高，在触头合闸前电击穿次数较多，在分闸时电弧多次重燃，每次触头间隙击穿或重燃都会伴随产生波头很陡、频率很高的快速暂态过电压(VFTO)，当 VFTO 的幅值达到 3.0 p.u. 时可能危及 GIS 和其他设备的安全。VFTO 的幅值过高时会使隔离开关触头间的电弧产生飘移接地而发展成为对地短路故障。

为降低 VFTO 的幅值和减少其危害，在断口电场的设计时将屏蔽尺寸放大，断口间形成平板电极，可有效防止电弧的飘移，使电弧限定在触头之间而不会飞逸到触头屏蔽的侧表面，难以形成对外壳闪络；并在屏蔽罩端部加装铜钨屏蔽头，增加电极在断口间重燃或击穿时耐电弧烧蚀能力，见图 3。

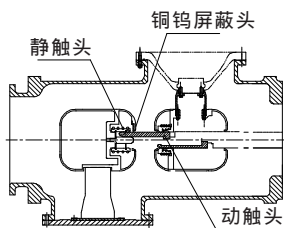


图 3 隔离开关结构示意图

4 型式试验

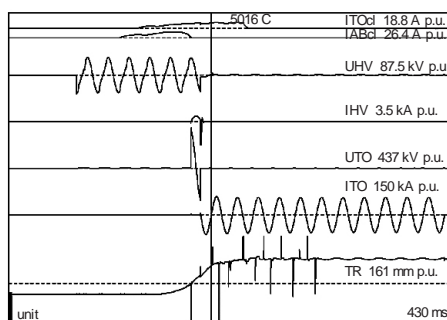
ZF8-550/4000-63 GIS 按照 IEC 62271-203、IEC 62271-102 完成了型式试验。其中断路器的短路关合和开断试验、快速接地开关的短路关合试验、快速接地开关切合感应电流试验、隔离开关开合母线充电电流试验、隔离开关切合母线转换电流试验、短时耐受电流和峰值耐受电流试验等在 KEMA 试验站完成并取得了合格证。以下就几个试验项目予以简要说明。

4.1 快速接地开关短路关合试验

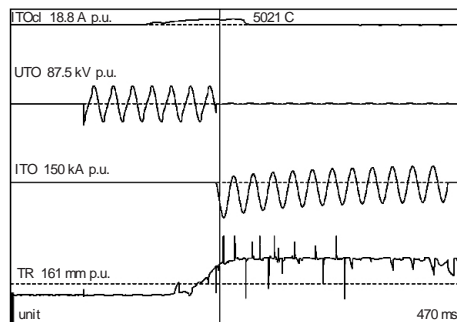
按照 IEC62271-102 的要求，快速接地开关一次关合在电压峰值时刻，一次关合在电压过零时刻，每次关合电流起始时刻与要求的电压相位角偏差不能超过 15°。在 KEMA 试验站该试验采用合成回路，如果电流的引入时间不符合要求，造成无效试验则对试品进行重复试验，尤其是电压峰值关合，由于会产生最长预击穿电弧，其对快速接地开关的动静触头的烧损会较重。精确的电流引入需要快速接地开关的每次合闸时间均一致，然而，因电动弹簧机构动作时间具有很大的分散性，使得快速接地开关的合

闸时间具有极大的不确定性。为解决该问题，专门为快速接地开关制作了一个试验用瞬时脱扣器，装在快速接地开关的输出拐臂处，在操动机弹簧储能后，通过脱扣器释放拐臂，从而保证了每次合闸时间的一致，使电流可以有效引入。

试验结果显示电压峰值关合时预击穿时间约为 10 ms，见图 4(a)，这与电场计算值以及快速接地开关的关合速度的配合的预期相吻合。图 4(b)是无预击穿时的非对称短路电流关合。试验后动静触头的烧损并不是很严重，因高压关合时电弧飘移，使静侧屏蔽罩有轻微烧损，见图 5。



(a) 电压峰值时



(b) 电压过零时

图 4 快速接地开关电压峰值与过零时短路关合示波图



图 5 快速接地开关短路关合后的动、静触头

4.2 隔离开关开合母线充电电流试验

按照 IEC 62271-102 的要求，隔离开关开合母线充电电流有 3 种方式，方式 1 是强制的型式试验项目，ZF8-550/4000-63 GIS 的隔离开关完成了方式 1、3 的试验。在进行方式 3 试验时，容性电流为 2 A，但受实验室条件所限电压峰值略显不足。隔离开关母线充电电流试验方式 1 形态及试验回路见图 6。其中 $U_1=350 \text{ kV(AC)}$ ； $U_2=495 \text{ V(DC)}$ ； $d_2/d_1=0.47$ 。

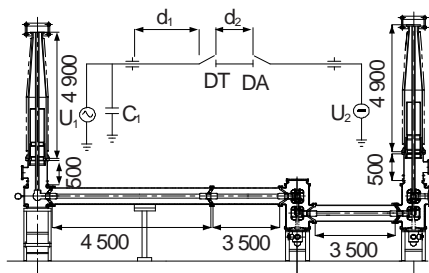


图 6 隔离开关母线充电电流试验方式 1 形态及试验回路

在进行该试验时,按照标准要求对该试验回路的快速瞬态(VFT)响应进行了直接测量,结果见图 7。

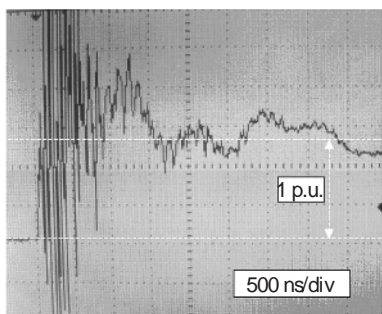


图 7 隔离开关开合母线充电电流测量的 VFTO 图

试样在试验过程中未发生对地破坏性放电和电气及机械的损伤,动静触头及静侧屏蔽罩处有轻微的烧蚀痕迹,但手感光滑,说明 VFTO 产生的触头间的重击穿能量不足于将动、静触头处的铜钨材料熔化,隔离开关切合母线充电电流后其绝缘性能不会下降。

从试验结果分析,因合闸时动触头从下往上运动需克服触头的自重,运动速度明显低于分闸速度,合闸时在第 1 次预击穿后的 300 ms 内会发生多次电击穿;分闸时,在动静触头分离后 100 ~ 300 ms 范围内发生重燃,约 400 ms 后无重燃现象。

(上接第 433 页) 直流滤波器造价。

(3) 在总的高压电容值相同的情况下,两组双调谐直流滤波器的滤波效果优于一组三调谐滤波器的滤波效果。

(4) 方案 2 是推荐的向家坝-上海 ±800 kV UHVDC 工程直流滤波器设计方案,即:每站每极设置两组双调谐 DCF 支路,调谐次数分别为 12/24, 12/36, 每一 DCF 支路高压电容 C_1 均取 2 μF 。这种直流滤波器方案可确保在直流系统各种运行方式下直流线路

试验后检查静触头屏蔽,在 $\phi 150$ 内有较密集的轻微电烧蚀痕迹,仅有极少数的痕迹在 $\phi 150 \sim \phi 200$ 之间,见图 8,未发现有电弧飘出屏蔽罩的痕迹,说明足够大的静侧屏蔽对抑制 VFTO 和防止电弧飘移引起的接地短路故障是十分有效的。

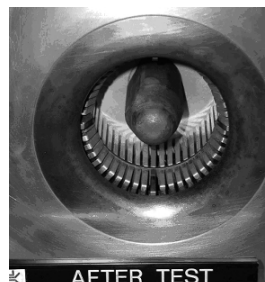


图 8 隔离开关切合母线充电电流后的触头

5 结语

利用专用软件进行电场计算而设计的样机,按照 IEC 62271-203 2003 的要求完成了整套型式试验,随后又按照系统时间常数 120 ms 的要求完成了断路器的短路开断和关合试验、快速接地开关的 171 kA 短路关合试验、GIS 其它元件的峰值耐受电流试验;又分别完成了 5 500、6 300 A 的温升试验,说明设计时选取的触头接触压力值、接触电阻电压降值及快速接地开关关合速度等是合适的,该产品的研制是成功的。

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] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

沿线的等效干扰电流 I_{eq} 不大于 2 200 mA。

参考文献:

- [1] 北京网联直流工程技术有限公司. 向家坝-上海 ±800 kV 特高压直流输电工程功能规范书[R]. 北京: 北京网联直流工程技术公司, 2006.
- [2] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 (2005 年)[M]. 中国电力出版社, 2006.
- [3] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 中国电力出版社, 2004.

启 事

原在每期后面连载的国家高压电器质量监督检验中心 2006 年已发放的合格检验报告名录(补充部分)因故将在 2008 年第 1 期的《高压电器》上刊出。