

# 550 kV/50 kA 单断口断路器的开发

王建西<sup>1,2</sup>, 张雅林<sup>1</sup>, 陈国平<sup>1</sup>, 穆双录<sup>1</sup>

(1. 西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

## Development of 550 kV/50 kA Single-break Circuit Breaker

WANG Jian-xi<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-lin<sup>1</sup>, CHEN Guo-ping<sup>1</sup>, MU Shuang-lu<sup>1</sup>

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

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:** 通过对 550 kV/63 kA 双断口断路器和 363 kV/50 kA 单断口断路器技术加以改进,利用计算机解析技术,提高了额定 SF<sub>6</sub> 气体压力和分闸速度,对弧触头和喷嘴形状进行了改进,优化了灭弧室结构,从而开发出 550 kV/50 kA 单断口罐式断路器样机。该样机分别在国家高压电器质量监督检验中心和 KEMA 实验站完成了绝缘试验及容性电流、大容量开断等试验项目。550 kV 单断口断路器所有电气性能得到了确认。

**关键词:** 单断口断路器; 灭弧室; 型式试验

**中图分类号:** TM561.3 **文献标识码:** A

**Abstract:** Through technical improvement of design of 550 kV/63 kA double-break and 363 kV/50 kA single-break circuit breaker, making use of computer analysis, increasing of the rated pressure of SF<sub>6</sub> gas and opening velocity, improving the shape of arcing contact and nozzle, optimizing the structure of interrupter, 550 kV/50 kA single-break dead-tank circuit breaker is developed. The test sample of 550 kV/50 kA single-break dead-tank circuit breaker have fulfilled dielectric test, capacitive current breaking test and short-current making and breaking tests, etc. in China National High Voltage Quality Supervision Testing Center and KEMA High Power Laboratory in Holland. All the performance of it has been confirmed successfully.

**Key words:** single-break circuit breaker; interrupter; type test

## 1 前言

近几年来,国内外超高压断路器开始向高电压、大容量、少断口方向发展。日本三菱公司于 20 世纪 90 年代初开发成功了 550 kV 单断口罐式 SF<sub>6</sub> 断路器,树立了其世界开关制造领域的技术领先地位,从而引发了世界各大型电器制造公司研制 550 kV 单

断口罐式 SF<sub>6</sub> 断路器的热潮。90 年代期间,日本东芝、日立公司也相继开发成功了 550 kV 单断口罐式 SF<sub>6</sub> 断路器,但至今尚未见有其它公司同类产品的报道。

西开股份公司于 1999 年开始启动 550 kV 单断口罐式 SF<sub>6</sub> 断路器的研制计划,1999 年研制成功了 363 kV/50 kA 单断口 SF<sub>6</sub> 断路器,在此基础上,通过利用计算机解析技术对高电压、大容量断路器灭弧室进行了探索研究,开发出了我国首台 550 kV/50 kA 单断口断路器试验样机。

## 2 主要技术参数和总体结构

额定电压 550 kV; 额定电流 4 000 A; 额定短路开断电流 50 kA; 额定雷电冲击耐受电压 1 675 kV; 额定工频耐受电压 680 kV。

该断路器为交流 50 Hz 户外型落地罐式开关设备。产品为分相式,操动机构挂于罐体的一端,电流互感器线圈置于套管下方,总体结构紧凑。灭弧室为单断口结构,灭弧室零部件数较双断口断路器减少约一半,简化了结构,提高了产品运行的可靠性。每台断路器配一定数量的电流互感器,断路器采用 CQ□-I 型气动弹簧操动机构,可实施分极操作,也可进行三极电气联动操作。产品外形结构见图 1。

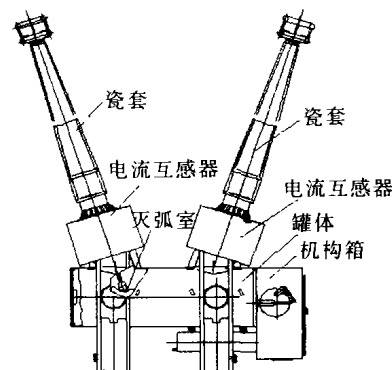


图 1 产品外形结构

### 3 550 kV 单断口断路器的技术要点

550 kV/50 kA 单断口断路器灭弧室的对地电压与双断口断路器的相同。技术关键在于提高断口间的耐受电压,使一个断口能够承受原来两个断口所承受的电压。也就是说,如果双断口灭弧室一个断口的电压分担率为 55%,则对于开断小电容电流、端子短路故障和近区故障,单断口灭弧室断口间承受的电压是双断口灭弧室的 1.82 倍。显然,在进行 550 kV 单断口灭弧室开发研究时,断口间的结构尺寸不可能是原来结构的简单放大,必须探寻使断口间既能承受这样高电压的结构尺寸,又能满足开断小电容电流、端子短路故障和近区故障时的特性曲线。

针对上述技术难题,在提高额定 SF<sub>6</sub> 气体压力、改进弧触头和喷口形状、提高分闸速度、优化灭弧室结构及主要尺寸等方面进行分析研究的基础上,开发了 550 kV 单断口断路器。图 2 为 550 kV/50 kA 单断口灭弧室结构图。

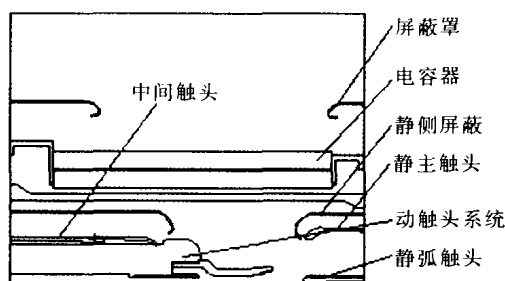


图 2 单断口灭弧室结构图

#### (1) 提高额定 SF<sub>6</sub> 气体压力

与双断口断路器相比,将额定 SF<sub>6</sub> 气体压力 0.5 MPa 提高到 0.6 MPa,使绝缘性能提高约 13%(额定压力下)和 15.7%(闭锁压力下),从而增大了弧触头附近的气体密度,有利于提高断口间绝缘的恢复特性。

#### (2) 改进内部电场

为了尽可能降低小电容电流开断时弧触头端部的电场强度和减少端子短路开断时弧触头端部的磨损,增大了弧触头的直径,并且改善了弧触头端部的曲率。通过电场计算,确定了最佳动静弧触头形状,提高了在进行小电容电流开断时的性能。

为促使热气体从断口间有效排出,对下游区排气筒形状进行了合理设计,减小了电弧对气体密度下降的影响,提高了对电弧的冷却能力。

为增加对电弧的气吹流速,提高对电弧的冷却能力,并促进热气体从断口间有效排出,用电弧模型对开断现象进行了解析,确定了适当的压气缸直径。在喷口形状及操作力相同的前提下,选择恰当的压气缸直径,使压气室压力上升最快,对电弧的气吹速度最高,从而提高短路开断性能。

为改善断路器近区故障的开断条件,在灭弧室

断口间并联了一定数值的电容器,这一方面可使单断口断路器承受的高陡度锯齿形恢复电压波形在初期变得平缓一些,另一方面也可使断口间的电场分布变得更加均匀。图 3 为灭弧室电场计算图。

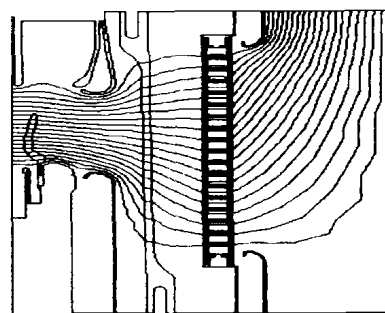


图 3 灭弧室电场计算图

#### (3) 改进喷口形状

如图 2 所示,针对单断口断口间开距的增大,相应地加长了喷口长度,同时为提高弧触头附近的气体密度,研究了不同喉径尺寸对气体密度的影响。通过计算机分析计算,得出了合理的喷口喉径尺寸。同时对喷口材质进行了充分的研究,合适的喷口材质可以适当降低弧触头端部的电场强度。与 550 kV 双断口断路器灭弧室相比,增大了单断口断路器灭弧室的气体密度,也适当降低了弧触头端部的电场强度,提高了开断性能。

#### (4) 优化特性曲线

灭弧室进行容性开断及负载开断时,其断口间绝缘恢复特性是随开断过程而变化的,这主要取决于弧触头附近的电场强度及 SF<sub>6</sub> 气体密度。因而,要提高绝缘恢复特性,应设法提高灭弧室的分闸速度,同时改善弧触头形状,以降低弧触头表面的电场强度。然而,当分闸速度过快时,对于端子短路 T100a 等开断时,可能无法满足对燃弧区的要求。同时考虑到电弧产生的能量几乎与触头运动速度(亦即行程)成比例的增加,因此必须把分闸速度的增大限制在一定范围内,这也是抑制电弧能量的有效手段。

依据开断容性电流恢复电压曲线,拟订了初步的位移-时间曲线,见图 4。以此为基础,按最严格的燃弧时间为 0 ms 作为开断点,以 1 ms 时间间隔为步长,计算断口间在开断过程不同时刻下的电场分布及触头间 SF<sub>6</sub> 气体密度分布,从而对速度-时间曲

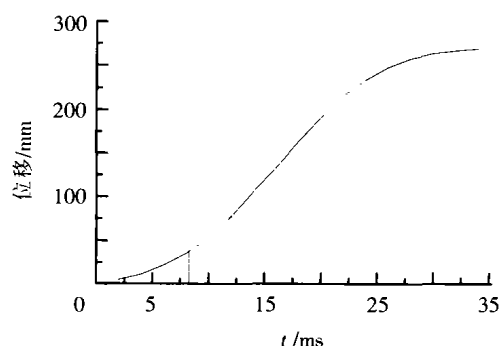


图 4 位移-时间曲线

线进行了优化设计, 得出了既满足容性开断又满足大容量开断的合理的特性曲线。

综上, 通过提高额定气体压力、加大喷口喉部长度、增大弧触头附近的气体密度以及降低弧触头端部电场强度等措施, 使得开断速度与 363 kV/50 kA 单断口 SF<sub>6</sub> 断路器相比提高了约 30%。另外, 在断路器壳体内部设置了内拐臂, 使灭弧室的动作行程相对于操动机构得到了加大, 从而减小了可动侧的等价质量。

## 4 型式试验

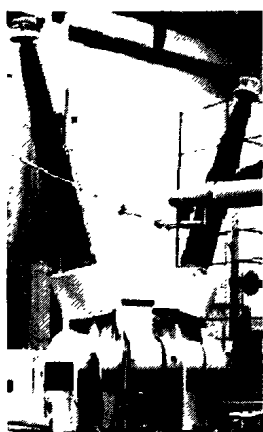


图5 550 kV 单断口断路器样机

图5是550 kV单断口断路器开发的原型样机。这一样机分别在国家高压电器质量监督检验中心和KEMA实验站严格依据IEC62271-100的要求, 进行了绝缘试验及容性电流、大容量开断等试验。

### 4.1 绝缘试验

2003年6月, 该样机在国家高压电器质量监督检验中心进行了如下绝缘试验: 雷电冲击耐压 $\pm(1\ 675+450)$  kV; 操作冲击耐压 $\pm(1\ 175+450)$  kV; 工频耐压 $(680+318)$  kV; 5 min 零表压 $1.3\times 318$  kV;  $1.1\times 318$  kV 下局部放电量 $<5$  pC, 无线电干扰 $<500$   $\mu$ V。样机一次性通过上述试验。

### 4.2 大容量开断试验

#### 4.2.1 近区故障试验

由于采取了改进喷口形状、提高开断速度、断口间并联电容器等措施, 使得在电流零点的吹弧能力增大, 近区故障开断性能得以大幅度提高。试验结果表明, 样机近区故障开断性能有相当大的裕度。

试验方法及试验过程严格依据IEC62271-100的要求, 样机操作方式按O-0.3 s-CO-180 s-CO进行, 燃弧区间长达11 ms。L90开断试验后还进行了绝缘验证试验。在进行L90开断试验过程中, KEMA实验站使用其研制的测量电流过零装置对开断过程进行了测量, 结果显示, 电流过零后几个微秒内, 弧道内的电导率很低, 见图6。据此, KEMA专家预测该样机具有63 kA的近区故障开断能力。

#### 4.2.2 短路电流关合和开断试验

开断电流为50 kA, 进行了T100s, T100a (直流分量56%), T60, T30, T10等开断试验, 其中T100s试验中的T100s(a)试验按高压关合进行, 关合电压峰值为450 kV。该样机经受了基本短路等各试验方式

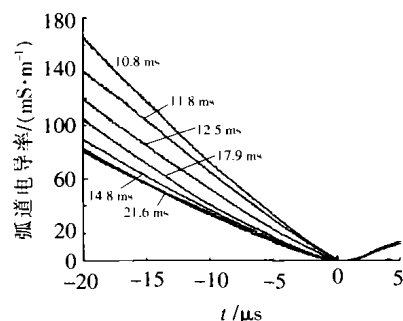


图6 电流过零后弧道内的电导率

的严酷考验, 得到了良好的结果。

#### 4.2.3 电容电流开断试验

试验按C1级试验方式进行, 试验电流为500 A。试验操作方式按CO方式, 试验严格按IEC62271-100要求进行。即使在最苛刻的条件, 即最小燃弧时间点0.2 ms附近, 分别进行正负极性各6次的试验, 试验结果也均无重燃现象。

该试验过程中, CO操作方式中的关合操作都是在高压下进行的, 合闸中的预击穿均发生在电压峰值的 $\pm 15^\circ$ 以内。

#### 4.2.4 失步关合与开断试验

样机严格按IEC62271-100要求进行了OP2试验方式的试验, 试验电压为 $2.0\times 550/\sqrt{3}$  kV。在该试验过程中, CO操作方式中的关合操作也是在全电压下进行的, 其关合电压峰值高达900 kV。样机经受了高压关合的严酷考验, 顺利通过了失步关合与开断试验。

#### 4.2.5 短时电流与峰值电流耐受试验

短时耐受电流50 kA, 2s; 峰值耐受电流125 kA。

## 5 结语

成功开发了550 kV/50 kA单断口罐式断路器样机, 并在KEMA实验站取得试验合格证。该断路器的开发成功, 标志着我国高压电器行业制造水平上了一个新台阶, 使550 kV GIS进一步小型化成为可能, 并为进一步研制800 kV电压等级的断路器奠定了技术基础。

## 6 致谢

向参加研制工作项目组的成员: 杨夙峰, 尹茂华, 张希捷, 晏世涛, 阮艳丽, 张震峰等表示衷心感谢。同时, 在该项目的执行过程中, 先后得到了西开公司丁小林, 申豫章, 施曼, 张猛, 于锡源, 陈建中, 杨雯, 申春红, 苗发金, 赵智明等同志的支持与帮助, 在此一并致谢。

作者简介: 王建西(1963-), 男, 在职硕士生, 高级工程师, 从事高压SF<sub>6</sub>断路器的开发设计工作。