「$SF_6$」

# 1 100 kV $SF_6$断路器合闸电阻研究

文/新东北电气集团高压开关有限公司　赵云学　李　彧　李科军　张　铎
国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院　曹　兵

*1 100 kV特高压断路器是保证1 000 kV特高压电网安全运行的重要设备。介绍了新东北电气自主研发的1 100 kV $SF_6$断路器的技术结构特点；对合闸电阻的设计进行了详细论述；对合闸电阻的绝缘性能进行了仿真分析；计算结果表明其热容量及绝缘性能均满足要求。*

在中国建设坚强的1 000 kV特高压电网是中国优化电力发展的必然要求。1 100 kV特高压断路器是保证1 000 kV电网安全运行的重要设备。为有效降低1 100 kV断路器合空载长线及自动重合闸时的合闸过电压，1 100 kV断路器要求带有合闸电阻。1 100 kV合闸电阻的良好设计，为1 100 kV特高压断路器的成功研制提供了可能。1 100 kV特高压断路器的成功研制，满足了我国庞大的特高压输变电系统对保护设备的迫切需求，为我国电力工业的持续稳定发展提供了至关重要的技术保障，其战略意义深远重大。

## 1 100 kV特高压断路器主要特点

新东北电气自主研制开发的1 100 kV特高压$SF_6$断路器，其结构组成如图1所示。

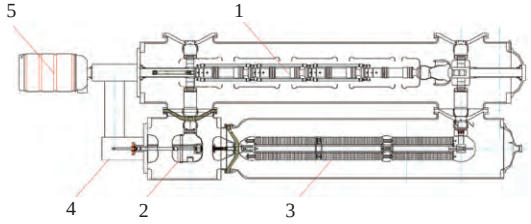


图1　1 100 kV特高压断路器

1—断路器主体灭弧装置　2—合闸电阻开关　3—合闸电阻
4—传动系统　5—液压弹簧操动机构

国家高技术研究发展计划：1 000 kV交流输变电工程GIS核心技术的研究（2006BAA02A12）。

1 100 kV特高压$SF_6$断路器由主体灭弧装置、合闸电阻开关、合闸电阻、传动系统和大功率液压弹簧操动机构等5部分组成。

1 100 kV特高压$SF_6$断路器具有以下特点。

1）绝缘水平高，对地绝缘雷电冲击耐受电压可以达到2 400×1.2＝2 880（kV）。

2）额定电流高，在6 300×1.1＝6 930（A）电流下能够满足温升要求。

3）合闸电阻热容量大，额定热容量117 MW，并可根据用户要求灵活进行调整。

## 1 100 kV断路器合闸电阻设计

合闸电阻限制合闸过电压的工作原理是利用合闸电阻将电网中的部分电能吸收转化为热能，从而达到削弱电磁振荡，限制过电压的目的。

1 100 kV断路器合闸电阻（详细结构如图1所示）与合闸电阻开关串联后与主体灭弧装置并联。1 100 kV断路器等值电路如图2所示。

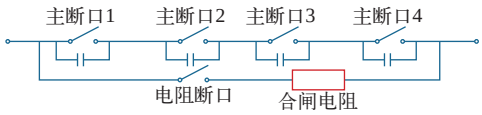


图2　1 100 kV特高压断路器等值电路

为保证合闸电阻的可靠投入，合闸电阻开关的动作特性应与主灭弧装置的动作特性恰当配合。

合闸电阻值与系统容量、线路长短有关。国内外从宏观上进行分析并针对较多有代表性的电网，合闸电阻$R$的取值范围通常是$0.5Z<R<2Z$，其中$Z$是线路波阻抗。对于1 100 kV断路器，国家电网要求其阻值在500～600 Ω之间，新东北电气集团选择525 Ω。

由于线路本身阻抗的阻尼作用，合闸过电压的持续时间为2.5～6.5 ms，并在合闸后20～60 ms全部衰减。造成这种时间分散性的主要原因是各种断路器三级合闸不同期值有差异。因此，从限制合闸过电压和电阻热容量的综合角度考虑，1 100 kV断路器合闸电阻的投入时间选定为7～11 ms。

合闸电阻的投入次数由电网操作保护方式决定。为提高安全裕度，国家电网公司要求电阻热容量应能满足两种操作顺序。操作顺序如下。

操作顺序1：C（1.3$E$）－3 min－C（1.3$E$）－30 min－C（1.3$E$）－3 min－C（1.3$E$）。操作顺序2：CO（2$E$）－30 min－CO（2$E$）。其中，C表示合闸（close），CO表示合分闸（close－open）；$E$表示相电压。

根据焦耳定律，合闸电阻在投入过程中被注入的能量

$$W=\int_{t_1}^{t_2}\frac{U^2(t)}{R(t)}\mathrm{d}t$$

式中，$W$为注入能量；$t_1$为合闸电阻投入起始时刻；$t_2$为主灭弧装置关合时刻，即合闸电阻退出时刻；$U(t)$为加在合闸电阻两端的电压；$R(t)$为合闸电阻。

针对1 100 kV断路器合闸电阻525 Ω的阻值，11 ms的投入时间，两种操作方式下，合闸电阻吸收的能量如下表所示。

表　1 100 kV断路器合闸电阻吸收能量

| 操作顺序 | 电阻被注入能量/MJ |
|---|---|
| 1 | 77.740 |
| 2 | 91.875 |

1 100 kV特高压断路器合闸电阻详细结构如图1所示，电阻片选用英国摩根公司的陶瓷电阻片。1 100 kV合闸电阻单独安装于一个金属壳体内，选用专门气室，不受断路器短路电流开断后粉尘的任何影响；电阻片采用多级电阻串联，每级电阻由多片电阻并联而成，总电阻热容量为117 MJ。针对操作顺序1，其安全系数为1.51倍；针对操作顺序2，其安全系数为1.27倍。

## 1 100 kV合闸电阻绝缘性能分析

1 100 kV断路器的绝缘性能是其最基本的性能。由1 100 kV断路器等值电路图2可知，1 100 kV断路器合闸电阻最高应能承受雷电冲击电压耐受电压2 400 kV。

为了防止多级串联电阻片之间可能存在的排列不整齐而导致的绝缘性能不良，在每隔三组电阻片之间设置了改善电场分布的屏蔽罩。在雷电冲击耐受电压2 400 kV下，1 100 kV断路器合闸电阻电场分布如图3所示，电场强度最大值为20.8 kV/mm。1 100 kV断路器合闸电阻开关最低功能，$SF_6$充气压力为0.5 MPa（表压），资料显示，该气压下$SF_6$气体的许用场强为29 kV/mm。因此其绝缘性能安全可靠，且具有一定的安全裕度。

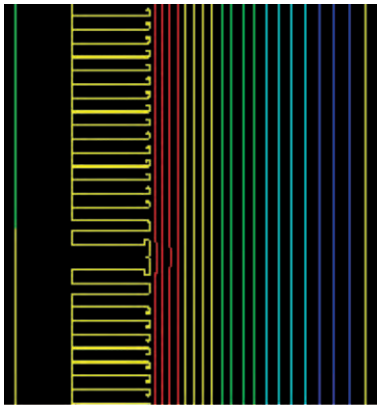

图3　1 100 kV合闸电阻电场分布

## 1 100 kV特高压断路器型式试验验证

1 100 kV特高压$SF_6$断路器按照GB/Z 24838—2009在国家高压电器质量监督检验中心顺利通过了两个操作方式的电阻热容量试验，在机械工业高压电器产品质量检测中心（沈阳）顺利通过了整套绝缘型式试验验证，对地绝缘水平高达2 400×1.2＝2 880 kV，试验过程均有国家电网专家组见证。

## 结束语

新东北电气自主研制开发了高参数高性能的1 100 kV特高压$SF_6$断路器，为中国特高压电网建设提供了经济、可靠的技术和设备保障。**EA**

（收稿日期：2017.10.18）
（编辑：刘群垚）