

800 kV 双断口罐式断路器研制

南振乐, 张 猛, 王建西, 余明星, 王文文, 张 蓁

(西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710077)

Development of 800 kV Tank Circuit Breaker with Two Breaks

NAN Zhen-le, ZHANG Meng, WANG Jian-xi, YU Ming-xing, WANG Wen-wen, ZHANG Zhen

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

摘要: 介绍了已研发成功, 并具有国际领先水平的 800 kV 双断口罐式断路器的设计、试验过程, 重点对 800 kV 双断口罐式断路器开发中的技术课题及其应对措施进行详细介绍。
关键词: 800 kV 双断口罐式断路器; 设计研制; 型式试验
中图分类号: TM56 文献标识码: A

Abstract: In this paper, the design and testing process of 800 kV tank circuit breaker with two breaks, which is of international leading levels, is introduced. The technological subjects and treatment measures of developing have been introduced in detailed.

Key words: 800 kV tank circuit breaker with two breaks; development and design; type test

0 前言

为了国家西北电网 750 kV 输变电线路建设, 促进和实现我国重大关键设备技术与装备的国产化, 我国自主研发的 LW13-800 罐式 SF₆ 高压交流断路器于 2005 年 10 月到 2006 年 5 月在国家高压电器质量监督检验中心进行了型式试验。2006 年 8 月通过了中国机械工业联合会和中国电机工程学会联合组织的鉴定, 鉴定专家认为该产品的关键技术参数达到了国际领先水平。该产品的研制成功标志着我国在超高压产品的自主研发方面又跨上了一个新的台阶, 它将为我国 750 kV 输变电线路的建设提供经济、可靠的技术和设备保障。

1 产品简介

(1) 基本参数

额定电压为 800 kV; 额定电流为 4 000 A; 额定短路开断电流为 50 kA; 额定峰值耐受电流为 135 kA; 额定短路持续时间为 2 s; 额定雷电冲击耐受电压为

2 100 kV; 额定操作冲击耐受电压为 1 550 kV; 额定短时工频耐受电压为 960 kV。

(2) 结构和原理

LW13-800 双断口罐式断路器的整体结构与传统的罐式断路器相同, 其结构图见图 1。上部为进出线套管, 紧接套管的下方是电流互感器, 电流互感器和进出线套管均安装在接地的灭弧室罐体上方, 在灭弧室的下部安装有一台大功率操动机构。



图 1 LW13-800 双断口罐式断路器

灭弧室内部结构整体呈左右对称布置, 见图 2。正中间是传动框架, 它通过绝缘支持台安装到接地的罐体内; 灭弧单元的动触头安装在传动框架的一侧, 通过框架内的传动系统及绝缘拉杆与操动机构连接; 静触头通过绝缘件也固定在传动框架的同一侧; 合闸电阻安装在静触头侧的法兰上。分合闸时, 操动机构带动动触头系统水平运动完成分合闸操作。

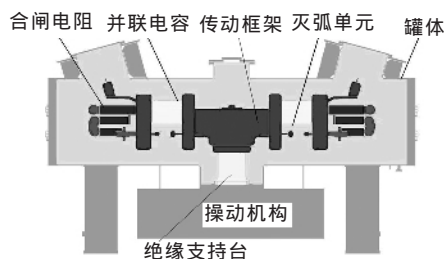


图 2 灭弧室内部结构

LW13-800 双断口罐式断路器配用气动或液压操动机构, 它的两个灭弧单元为 363 kV 单断口断路器。

2 主要研究和设计内容

(1) 灭弧能力

由于采用的 363 kV 单断口断路器的灭弧单元具有 50 kA 的开断能力，主要研究这两个断口串联后是否能够满足 800 kV 电压等级的开断要求。

首先根据开合空载长线的要求，确定断路器的速度特性。通过调整分闸速度特性，控制触头分离后 10 ms 内各时刻触头表面的场强，使其小于可以发生击穿的场强值，保证在触头分离 0 ms 附近开断后也不会重击穿。图 3 为 363 kV 单断口断路器和 800 kV 双断口断路器的灭弧单元在开合空载长线条件下触头分离后 10 ms 内弧触头表面场强对比曲线。

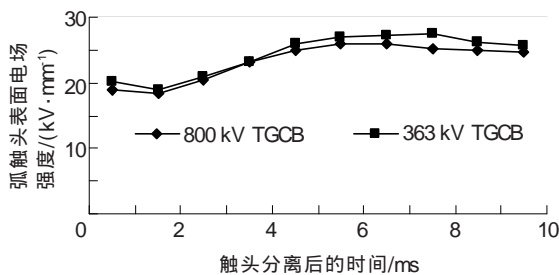


图3 开合空载长线条件下触头分离后其表面场强对比

对于大电流的开断能力，只要在同等开断条件（开断电流、SF₆ 气体压力、灭弧单元结构等相同）下，灭弧室的一个断口在额定电压等级 (800/2) kV 条件的恢复电压作用下，灭弧单元的触头在开断过程中各时刻的表面场强不大于已经通过试验验证的 363 kV 单断口断路器同样条件下的场强值，根据经验基本上可以认为满足大电流的开断性能要求。通过电场的计算、分析，确定了可以满足上述条件的罐式断路器灭弧室的运动特性曲线，从而在经验层面上保证灭弧室具备相应的大电流开断能力。

(2) 合闸电阻

在进行合闸电阻设计时，除了必须满足电力系统对电阻阻值和预先接入时间的要求外，还必须考虑电阻体要有足够的热容量，保证在规定的操作条件下，电阻内部温升控制在合理的范围内；此外，还要考虑电阻体的沿面绝缘问题，在电阻接入时沿面不能出现放电现象。通过计算对比，可知断路器在间隔时间为 30 min 的两次电源相位反向时的关合过程中向电阻注入的能量最大^[1]，这种情况下电阻体的温升应不大于允许温升值，通过这一条件可计算出电阻的体积，从而根据有关电阻元件的规格，选定电阻元件，并进行沿面绝缘验证。

反向合闸一次，注入电阻的能量为：

$$W = \frac{(2\sqrt{3}U_r/\sqrt{3})^2}{R} \times t \quad (1)$$

式中：W 为断路器反向合闸一次注入电阻的能量，J；U_r 为断路器额定电压，kV；R 为合闸电阻值，Ω；t 为

合闸电阻接入时间，ms；

电阻可以吸收的能量为：

$$W = V \times T \times c \quad (2)$$

式中：T 为允许温升，K；V 为电阻的体积，cm³；c 为电阻的比热容，J/(K·cm³)。

由于电阻的比热容 c 为一常数，许用温升 T 也是一个定值，从式(1)、式(2)可知，在电阻值 R 一定、每次接入时间 t 不变的情况下，需要的合闸电阻的体积 V 与额定电压 U_r 的平方成正比，即：

$$V \propto U_r^2 \quad (3)$$

因此对于超、特高压断路器，合闸电阻的体积会比较大，它在灭弧室内部的布置方式对断路器壳体直径和体积起很大的决定作用。在 800 kV 断路器中如果合闸电阻的阻值不变，其体积为 550 kV 合闸电阻体积的 2.12 倍以上。为了充分利用灭弧室壳体内的空间，我们将这些电阻分成多组，首尾相连，沿圆周方向布置在灭弧单元的两端（见图 2），然后通过合理的电场计算，确定了适当的灭弧室罐体尺寸。

(3) 并联电容器

对于多个断口串联而成的断路器（如图 4 所示两断口断路器），由于带电部位对地罐体的杂散电容 C_{对地} 的影响，会导致在分闸时，每个断口间承受的电压不一样。断路器通常采用在断口间增加电容的办法来减小断口间所承受电压的不均匀性，一般认为承受电压最高的一个断口所承受的电压与其应该承受电压之比（不均匀系数）不应超过 1.05。在这一前提下，首先根据经验初步确定电容值，然后估算不均匀系数。LW13-800 罐式断路器的最终实测不均匀系数为 1.04。在设计并联电容器的时候，必须考虑电容器的绝缘问题，因为断路器在开断状态它可能要长期承受断口间的电压；同时在满足电容值和绝缘性能要求的前提下，断口间并联电容器的长度要尽可能短。

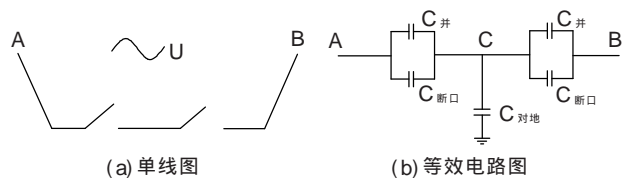


图4 断路器的主回路单线图和计算不均匀系数用的等效电路图

(4) 灭弧室内部的绝缘

对于灭弧室内部绝缘性能的研究，重点要解决灭弧室带电部件的对地绝缘问题、断口间的绝缘问题以及合闸电阻触头与主触头间的绝缘配合问题。在 SF₆ 绝缘的设备中，绝缘问题主要是控制各部位的电场强度，尽可能使得电场的分布比较均匀，并且将各部位的最大场强控制在许用值以下。因此，我们对灭弧室建立三维模型，用有限元分析法，对关键部位如合闸位置主屏蔽罩表面、电阻屏蔽罩表面及分

闸位置动静触头表面(包括主触头、弧触头和电阻触头)的场强进行了针对性的计算分析。通过反复地计算分析和优化设计,保证所有关键部位的电场强度均小于工程中的许用值。合闸电阻部分和断口部分的三维模型及电场分布见图 5,图 6。

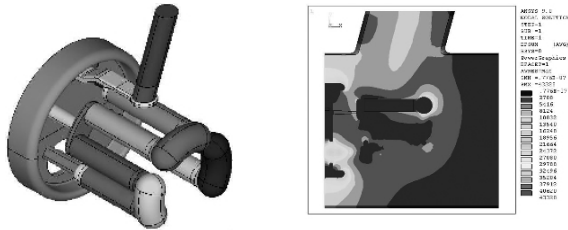


图 5 合闸电阻部分的三维模型及电场分布

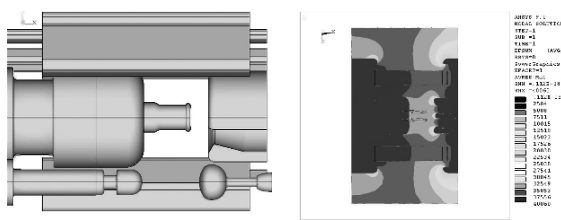


图 6 断口部分的三维模型及电场分布

(5) 出线套管

SF₆ 绝缘结构强调电场分布的均匀性及最高工作场强的控制,而不过分追求放大尺寸,因此 800 kV 电压等级 SF₆ 开关设备的出线套管采用电场较均匀的同轴圆柱形电场结构。随着电压等级的提高,断路器套管的中心导体与接地法兰间电场分布的不均匀性变得更加突出。通过增设接地内屏蔽可以改善电场分布,且电容式套管的设计和使用经验表明,多层同轴圆柱形屏蔽改善电场分布的效果很好。将这一经验应用到充 SF₆ 开关设备套管的设计中,采用悬浮电位与接地电位双重屏蔽的方法,使得 800 kV 断路器套管的内外电场分布更加合理,获得满意的技术经济指标。800 kV 断路器套管由屏蔽环、瓷套、中心导体(引线)、悬浮电位屏蔽筒、接地屏蔽筒、接地法兰以及绝缘支持件等构成,具体结构见图 7。

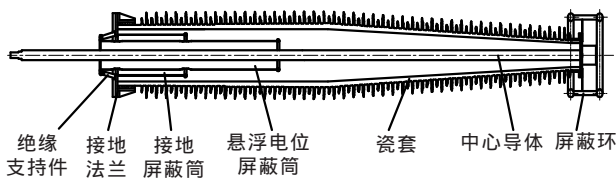


图 7 套管结构

通过调整接地屏蔽筒的直径和高度、悬浮电位屏蔽筒的直径和高度以及屏蔽环的位置,使瓷套沿面的电位分布比较接近理想的电位分布,从而有效地利用瓷套的高度,保证外表面场强在工程可以接受范围之内。图 8(a)为套管表面的电位分布曲线,图 8(b)为套管表面的电场分布曲线。调整接地屏蔽筒、悬浮电位屏蔽筒端部的形状,可以将内部电场的

最大值控制在工程可以接受范围之内。

屏蔽环的作用有两个:①要保证套管上部的电场均匀,在 1.1 倍相电压下空气中不产生可见电晕;②配合内部屏蔽筒,改变瓷套表面的电位分布,使其更接近理想状态。改变屏蔽环的管径,可以降低屏蔽环表面的电场,见表 1,从而满足第 1 个作用要求。对于第 2 个作用要求,通过该变屏蔽环的下环与瓷套上端部屏面的相对位置,即可实现,见图 8。

表 1 屏蔽环管径与其表面电场

屏蔽环的管径/mm	作用电压/kV	环的表面电场/(kV·mm ⁻¹)
50	718	2.6
100	718	1.6

注:作用电压为 1.1 倍相电压

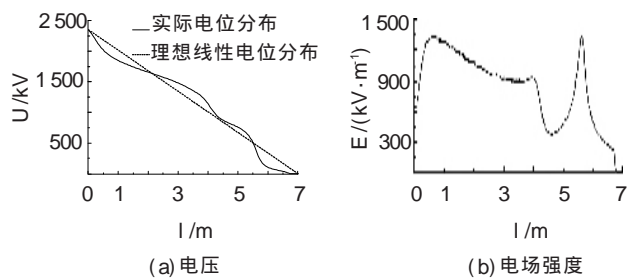


图 8 沿套管表面电压及电场强度分布

套管设计中的另一个问题是:10 多米长的中心导体,很难整体制造,必须从设计阶段解决这一难题。通过计算,在保证内部绝缘性能的前提下,在适当的位置将中心导体分成两段,对这两段中心导体分别加工制造,最后以法兰的形式装配成一个整体。

(6) 操动机构

对于 LW13-800 双断口罐式断路器来说,操动机构的分闸输出功必须足够大才能满足灭弧室的分闸特性要求。目前,有气动和液压两种大功率操动机构可以配用,配用这两种操动机构的断路器具有一致的机械特性。

3 型式试验

型式试验在国家高压电器质量监督检验中心,按照 GB 1984-2003 《高压交流断路器》国家标准进行。大容量开合试验用合成试验法,在一个断口上进行,另一个断口串联在合成试验回路中作为辅助开关使用,这样断路器的两个断口均经受了大电流的考核;被试品放置在对地绝缘的台子上,在断路器的外壳上施加与瞬态恢复电压反向的直流电压,以确保被试品主回路对地之间的绝缘满足 800 kV 电压等级的要求。所有的开合试验项目全部一次性通过,并且在 T100a 开断试验中,线路的直流分量衰减时间常数按 120 ms 进行试验,触头分离时刻的直流分量达 81%。试验形态见图 9,图 10 为端子短路



图9 开断试验的试验形态

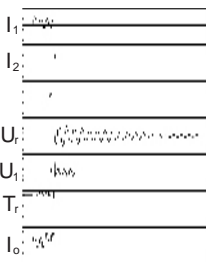


图10 T100a开断试验的示波图

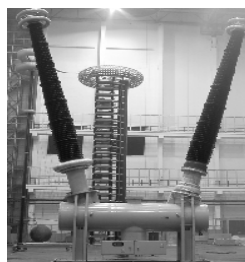


图11 样机进行绝缘试验

开断试验 T100a 的示波图。

绝缘试验除按照技术规范的要求进行标准规定的试验外,依据有关标准按照海拔 3 000 m 校正后的数值重新对整台样机进行了雷电和操作冲击耐压试验,试验参数分别达到了 2 688 kV 和 1 860 kV,灭弧室内绝缘同样也承受了高达 2 688 kV 的雷电冲击电压,其高度可靠的内绝缘性能也得到了验证。图 11 为进行绝缘试验时的形态。

另外,其它试验项目的试验结果也都达到或高于设计时的期望值。

4 结语

型式试验的结果显示,研制的 LW13-800 双断口罐式断路器是一种开断性能优良、绝缘性能可靠、可以在海拔 3 000 m 及以下环境中使用的断路器产品,完全可以满足 750 kV 输电线路对断路器的要求。

参考文献:

- [1] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

(上接第 423 页)

化孔单、双面印制板分规范;⑤GB/T 4677-2002 印制板测试方法。

(3) IEC 相关标准: PCB 型 Rogowski 线圈除了要遵循上述的有关印制板性能相关标准外,因其是电流互感器的组成部分,还要依据 IEC 60044-8 进行电子式电流互感器相关的型式试验和例行试验。

4 结语

Rogowski 线圈电流互感器是新型电子式电流互感器的一种,具有广阔的应用前景。IEC 60044-8 标准中指出了电子式电流互感器在可靠性方面应与变电站的电子元件的可靠性可比。本文仅是 Rogowski 线圈电流互感器可靠性研究的开始,文中简要介绍了 PCB 型 Rogowski 线圈的设计原理,镀通孔常见的失效模式、失效机理;给出了 PCB 型 Rogowski 线圈的失效判据;建立了 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性框图和可靠性数学模型;定量地推导出 PCB 型 Rogowski 线圈的失效率和平均寿命与线圈镀通孔数目及镜像印制板对数间的关系,对如何设计和生产高可靠性 PCB 型 Rogowski 线圈给出一些指导建议。最后依据军标 GJB/Z 299B-1998 对测量 300 A 电流的 PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效

率和寿命进行了可靠性预计,在保证正确的生产工艺和严格的质量检验后,这种电流等级的 PCB 型 Rogowski 线圈具有很高的可靠性,寿命可达到 27 年。

参考文献:

- [1] 李红斌,刘延冰,张明明. 电子式电流互感器的关键技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 4-6.
- [2] Kojovic L. Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 47-52.
- [3] 李红斌,陈庆,张明明,等. 一种基于印刷电路板的高准确度 Rogowski 线圈[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 54-56.
- [4] 陈庆,李红斌,张明明,等. 采用主副印刷电路板构造的 Rogowski 线圈的性能分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.
- [5] Kojovic L. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3): 50-53.
- [6] IPC 6011. Generic Performance Specification for Printed Boards[S].
- [7] IPC-TM-650. Test Methods Manual[S].
- [8] Ahmad Mudasar, Sue Teng, Mason Hu. Assessing the Reliability of Plated Vias[J]. PC FAB, 2002, 25(11): 30-37.
- [9] IEC 60044-8 Electronic Current Transformers[S].
- [10] MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment-NOTICE2[S].
- [11] GJB/Z 299B-1998. 电子设备可靠性预计手册[K].

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!