

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.033

## 带双侧隔离开关的新型12 kV开关柜研制

朱志豪, 袁端磊, 费翔, 马明乐, 冯祥伟, 王海燕, 祁海洋  
(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

**摘要:** 为了解决手车移开式开关柜电场不均、隔离手车可靠性不易提升等问题,提出了一种新型空气绝缘金属封闭开关设备的设计方案,该方案集中了移开柜和固定柜的优点,它的主要特点是从柜前看三相主回路后中前纵向布置,主回路主要采用圆形导体,真空灭弧室两侧设有直动式隔离开关。对该方案的设计实现思路进行了分析,采用有限元方法对电场进行了仿真,结果显示该方案电场分布明显优于通常采用矩形铜排的开关柜。制造了采用该方案的12 kV/1 250 A产品样机,并通过了全套试验,该样机达到了柜宽仅500 mm、主导电回路缩短从而节约大量有色金属、整机局部放电量 $<10\text{ pC}$ 的效果,实现了中压空气绝缘开关柜兼具小型化、双隔离和优异绝缘性能的特点,促进了中压开关柜的多元化发展。

**关键词:** 移开式开关柜; 固定柜; 小型化; 隔离开关; 电场优化

## Research and Manufacture of a Novel 12 kV Switchgear with Two-side Disconnectors

ZHU Zhihao, YUAN Duanlei, FEI Xiang, MA Mingle, FENG Xiangwei, WANG Haiyan,  
QI Haiyang  
(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of uneven electric field and poor reliability of the withdrawable switchgear. The paper presents a novel design scheme of the air insulation metal-enclosed switchgear, which combines the advantages of removable and fixed switchgears. Its main features are as follows: the three-phase main circuits are longitudinal layout from back to front if looking from the front of the cabinet, and the main circuit is mainly composed of circular conductors, with a linear moving disconnecting switch on each side of the vacuum interrupter. The reasons for this design and the ways to achieve it are discussed. The model's electrical field is calculations by finite element method, the results show that its electric field is obviously superior to the switchgears which usually adopt rectangular conductors. A typical 12 kV/1 250 A product prototype of this design is manufactured and tested. Its width is only 500 mm. The partial discharge of the whole switchgear is less than 10 pC, and the main conductive circuit is greatly shortened, so a lot of material is saved accordingly. It is achieved that the switchgear combines the characteristics of miniaturization, with two-side disconnectors and excellent insulation performance, which promotes the diversified development of medium voltage switchgear.

**Key words:** withdrawable switchgear; fixed switchgear; miniaturization; disconnector; electric field optimization

## 0 引言

中国城镇化快速发展,刺激着城市配电网开关柜快速增长。这种需求不仅在于量的增长,更重要

的是质的提高,要求高可靠(极少维护)、小型化、节能环保,并逐步向智能化发展<sup>[1-2]</sup>。空气绝缘真空开关柜是目前中国市场上中压一次配电开关设备的主要存在形式,空气绝缘有以下众多优点:技术成

收稿日期:2019-10-18; 修回日期:2019-12-18

基金项目:国家电网公司总部科技项目(一二次融合的配电设备可靠性技术研究及设备研制)资助。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Reliability Technology Research and Development of Distribution Equipment Based on Primary and Secondary Integration).

熟、结构简单、制造成本低、维护方便、最环保、无漏气和老化风险<sup>[3-4]</sup>,可以预见,较长时期内空气绝缘开关柜仍将是12 kV一次开关设备的主流类型。

早期开关柜是以固定柜的形式出现的,虽然固定柜具有可靠性高的优点,但是早期的固定柜体积较大,维护不便。随后基于少油断路器设计的中置手车移开式开关柜逐渐取代了固定柜,手车柜灭弧室两侧具有紧凑的隔离开关<sup>[5-6]</sup>,维护方便,但是由于手车运动质量大、驱动点偏心、活门的开闭及联锁零部件较多等特点,导致实现其高机械可靠性和可靠电动操作成为难点<sup>[7-8]</sup>。在手车正常操作推入过程中,曾多次出现因机械故障导致三相对地短路并造成人员受伤的严重事故<sup>[9]</sup>。另外断路器的隔离梅花触头与柜体内的一次静触头容易偏心,导致接触不良成为温升的薄弱点,特别是大电流等级该问题更加突出<sup>[10-14]</sup>。随着真空断路器向高可靠性、少(免)维护的发展,为了实现隔离的功能而采取断路器手车整体的移动,在某些方面已经有些得不偿失。另外由于开关柜的电压等级比高压输电设备低,传统产品设计对开关柜的电场均匀性重视程度不够,限制了开关柜向高可靠性的发展。

文中提出了一种新型移开式金属封闭开关设备的设计方案,该方案的主要特点是真空灭弧室两侧设有集成的直动式隔离开关,充分发挥了隔离触头质量轻,运动可靠性高的优点,并保留了移开的功能,以便于小概率的断路器检修,满足用户使用习惯,同时实现了高绝缘可靠性下的小型化设计。最后经过样机制造和试验,验证了设计的可行性。

## 1 方案设计

### 1.1 设计思路

为了实现灭弧室双侧隔离,并且具有小型化的特点,必须进行完全创新的设计。文中的思路是借助近年来得到广泛应用,且可靠性得到验证的环氧树脂 APG 浇注技术,将灭弧室、隔离开关等各元件高度集成化、模块化,同时采取了 A、B、C 三相纵向的布置方式,主导电回路的总体设计思路见图 1。

从图 1 可以看出,该开关柜三相后中前纵向“一”字型布置,作为断路器单元的真空灭弧室两侧分别设置了一个直动式的隔离开关。高压主回路被分割为 3 个隔室,母线室、断路器室和电缆室,相邻隔室由金属隔板和集成式隔离套管隔开,为了实现全金属封闭,设计了金属式活门,活门采用直动式逐级展开结构,运行时活门完全收缩至安全位置,当检修时,操动机构顺序地带动隔离开关收回

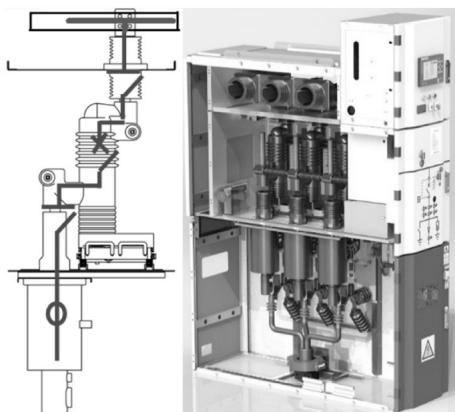


图1 总体设计方案

Fig. 1 Overall design scheme

和活门闭合,完全封堵一次高压导体,确保维护人员安全。

### 1.2 技术参数

按照设计思路,设计了12、40.5 kV,1 250~4 000 A 的系列化产品的总体方案。为了验证设计思路,选择了12 kV 1 250 A 规格进行了样机研制和试验,主要技术参数见表 1。

表1 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters

| 参数             | 数值              |
|----------------|-----------------|
| 额定电压/kV        | 12              |
| 额定电流/A         | 1 250           |
| 额定短路开断电流/kA    | 31.5            |
| 1 min工频耐受电压/kV | 42              |
| 雷电冲击耐受电压       | 75              |
| 外形尺寸(宽×深×高)/mm | 500×1 450×2 300 |
| 整机局放值/pC       | ≤10             |

### 1.3 结构和原理

主导电回路的布置图见图 2,主要特点是:新型固封极柱的真空灭弧室与两侧各一个直动式的隔离开关集成设计,上隔离静触头直接与主母线连接,省去分支母线;下隔离静触头、电流互感器浇注在一起,总体上大大简化了电缆和母线的连接,使结构更加紧凑,实现了小型化设计。另外除了主母线以外,几乎所有导体采用圆柱形,电场相比常见的矩形母线更加均匀<sup>[15-16]</sup>。另外管型圆柱导体的集肤效应要小于矩形导体,发热量更小,有利于降低设备的温升<sup>[17]</sup>。

隔离开关采用齿轮齿条传动的直动式两工位隔离开关,配有专门设计的隔离操动机构,可实现电动/手动操作。隔离开关的隔离位置、导通位置示意图见图 3,从图 3 中看出,三相隔离触头为上下直动式联动,设计了电动隔离机构,结合固定在触头

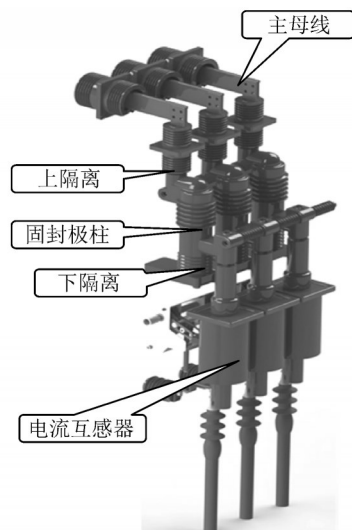


图2 主导回路(导通状态)

Fig. 2 Main circuit(connected position)

上的齿条和电场屏蔽的齿轮传动装置,触头运动非常可靠,加上电动操作可以实现遥控,能够最大程度地保护操作人员的安全。另外由于仅仅移动了圆柱形的隔离触头而断路器本身保持不动,不采用断路器手车的移开来实现隔离开关的功能,可以非常方便地实现移开柜和固定柜的转换,仅需将断路器手车固定就能转变为固定柜。

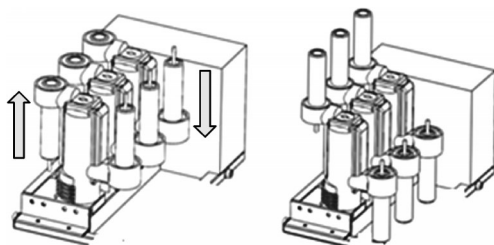


图3 断路器从隔离位置到导通位置过程

Fig. 3 Circuit breaker from disconnecting to operating position

断路器、固封极柱示意图见图4,断路器采用框架手车式结构,可以通过手车移动实现移开式操作,也可以将手车固定,包含了常规移开式断路器的全部功能,并且将断路器和隔离开关的操动机构全部集成在同一个机构箱内。固封极柱除了包含真空灭弧室、导电连接、绝缘拉杆,还将一端的隔离静触头与真空灭弧室通过环氧树脂浇注的方式进行集成,环氧树脂既起到绝缘又起到机械支撑的作用,实现了保证可靠性的紧凑设计。

## 2 绝缘分析

### 2.1 导体形状的选择

目前开关柜中主要采用的是矩形铜排,矩形铜排的优点是加工方便,但窄边的曲率半径较小,电

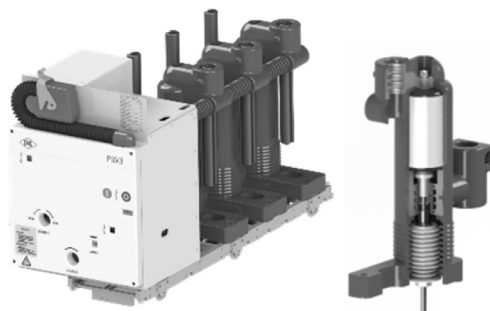


图4 断路器手车和固封极柱

Fig. 4 Circuit breaker handcart and embedded poles

场极不均匀,要达到规定的绝缘水平必须增大绝缘距离,直接增大了开关柜的总体尺寸,即使尺寸增大,绝缘故障仍时有发生<sup>[18-19]</sup>。为了使得新型开关柜在具有优异的绝缘能力的前提下,实现总体尺寸的紧凑性优化设计,采用竖直布置的主母线,全部采用圆形导体均匀电场的方式,仿真了典型80 mm×10 mm的矩形铜排和 $\phi 40$  mm,壁厚为10 mm的管型母线的电场分布,导体加载75 kV高电位,设置与接地点相同的距离,结果显示虽然矩形铜排倒了全圆角,但最大场强是管型母线的2倍,因此采用管型母线实现了模块化开关柜的电场优化,进一步能够实现总体尺寸的优化设计。

### 2.2 绝缘设计和电场仿真

由于环氧树脂材料的绝缘耐受性能远好于空气,总体设计思路是对主回路穿过柜体的部分,采用环氧树脂材料浇注,减少导体外露区域,充分利用固体和气体复合绝缘性能好的优点<sup>[15]</sup>,而依赖于空气绝缘的主回路对地、上下双隔离断口净距则满足125 mm。为了验证设计,并对绝缘结构进行优化,对新型开关柜进行了电场仿真计算,断路器室的电场分布见图5,因为环氧树脂的介电强度高,实际最大场强远小于击穿场强,因此只展示了空气介质的场强。

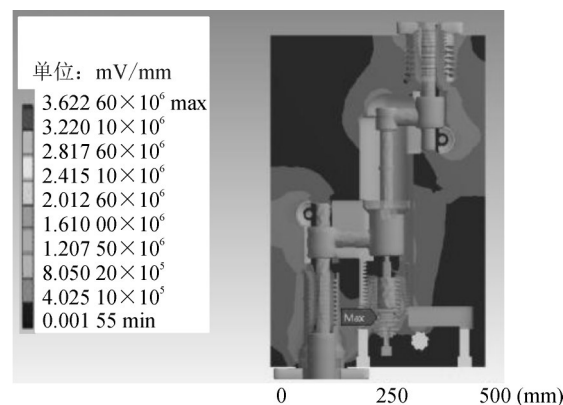


图5 断路器室空气介质电场分布

Fig. 5 Air electric field in the circuit breaker compartment  
最大场强位于隔离动触头的齿条的边缘上,最

大场强为 3.6 kV/mm,分析由于齿条尖角较大,电场集中,优化方法为将齿条嵌入动触头内部,并增大圆角,优化后电场强度显著降低,实现了在加载 75 kV 雷电冲击电压下,空气最大场强小于 3 kV/mm。

### 3 样机制造和试验

基于 12 kV/1 250 A 空气绝缘模块化开关柜总体方案,进行了样机研制,并通过了全部型式试验,样机照片见图 6。



图6 新型开关柜照片(两个单元并柜)

Fig. 6 Prototype of switchgear with two units

绝缘方面,在满足如表 1 所示的基本参数和相关标准<sup>[20-21]</sup>规定的试验之后,针对整柜的局部放电和绝缘裕度试验做了进一步研究,试验结果显示:当试验电压达到 1.3U<sub>n</sub>(额定电压)时,高于标准规定的测试电压 1.1U<sub>n</sub>,测得整机局放值仍 < 10 pC,1 min 工频耐受电压 47 kV。12 kV/1 250 A 的该产品与 KYN28 型空气绝缘移开式开关柜的主要参数对比,见表 2。

表2 该产品与 KYN28 的主要参数对比

Table 2 Comparison between the product with KYN28

| 参数                 | 文中产品            | KYN28           |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 外形尺寸(宽×深×高)/mm     | 500×1 450×2 300 | 800×1 450×2 300 |
| 主回路铜材用量/kg         | 22              | 约 31            |
| 主回路电阻/ $\mu\Omega$ | 70              | 约 120           |

通过表 2 可以看出,由于采用了全新的设计方案,主回路近似成直线型,省却了分支母线,以及圆形导体的采用,文中研究的 12 kV/1 250 A 空气绝缘开关柜占地面积比同参数 KYN28 减小了 37.5%,铜材用量减少 30%,主回路电阻减小了 40%以上。

### 4 结论

文中介绍了新型移开式金属封闭开关设备的

设计、仿真分析和试验,通过研究得出了以下结论:

1)在灭弧室两侧设置集成式隔离开关的设计,使断路器手车的移开仅为了便于小概率的断路器检修和满足用户使用习惯,与传统移开柜依靠手车移动实现双侧隔离相比,隔离功能的实现大大简化。另外仅需将移开柜的断路器手车固定就能转变为固定柜,使其既具有固定柜可靠性高的优点,又满足移开柜双侧隔离的优点。

2)主回路后中前纵向的布置,使母线到电缆连接的主导电回路近似直线布置,降低了回路电阻,节约了 30% 的导电材料,并大大缩小了总体尺寸。

3)在绝缘方面,圆形导体的采用能提高电场的均匀度,加上合理复合绝缘和电场优化,实现产品小型化的同时满足较高的绝缘性能要求。

### 参考文献:

- [1] 黎 斌,王日新,王 君,等. 对中压配电柜各种主绝缘的思考——兼评抽出式紧凑型空气绝缘环网柜的特点[J]. 高压电器,2016,52(8):7-13.  
LI Bin, WANG Rixin, WANG Jun, et al. Thoughts on various kinds of main insulation of medium voltage distribution cabinet—comment on the characteristics of withdrawable compact air-insulated RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8):7-13.
- [2] 兰 剑,王承玉,李庆余. 中国配电开关应关注的发展热点[J]. 高压电器,2015,51(10):217-220.  
LAN Jian, WANG Chengyu, LI Qingyu. The development hot spots that China's power distribution switches should pay attention to[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10):217-220.
- [3] 崔成恕,高 华. 金属封闭开关设备的发展简析[J]. 高压电器,2003,39(2):18-22.  
CUI Chengshu, GAO Hua. Development of metal enclosed switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2):18-22.
- [4] 钱家骊,袁大陆,杨丽华,等. 高压开关柜—结构、计算、运行、发展[M]. 北京:中国电力出版社,2006:4-20.  
QIAN Jiali, YUAN Dalu, YANG Lihua, et al. Structure, calculation, functioning, development of high voltage metal-enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006:4-20.
- [5] MARTIJN I, ENGBERSEN H. Fixed or withdrawable switchgear — withdrawable switchgear, past or future[C]//in Proc. 2011 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings IEEE. [S.l.]:IEEE, 2011:1-6.
- [6] MARTIJN I, VERMEER M, ONKELEN R V. Benefits of withdrawable switchgear and motor control centres[C]//in Proc. 2012 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings IEEE. [S.l.]:IEEE, 2012:1-10.

- [7] 高继法,韩宏先. 40.5 kV 移开式开关柜改为固定柜在供电系统中的应用[J]. 高压电器,2003,39(4):70-71.  
GAO Jifa, HAN Hongxian. Application of 40.5 kV move-out switchgear to fixed cabinet in power supply system[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 70-71.
- [8] 黄新波,王海东,胡海燕,等.高压开关柜电动底盘车防堵转技术与应用[J]. 高压电器,2018,54(3):205-211.  
HUANG Xinbo, WANG Haidong, HU Haiyan, et al. Technology and application of avoiding locked rotor fault of HV switchgear electric chassis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 205-211.
- [9] 李端姣. 10 kV 系统用移开式开关柜潜在缺陷的改进研究[J]. 高压电器,2013,49(2):110-115.  
LI Duanjiao. Improvement of potential defects for 10 kV system removal-type switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 110-115.
- [10] 丁健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器,2012,48(8):114-117.  
DING Jian. Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 114-117.
- [11] 马保军,吴传红.高压开关柜内接头发热事故的分析及解决[J]. 河南科技,2010(10):77-78.  
MA Baojun, WU Chuanhong. Analysis and solution of contact fever accidents in high voltage switchgear[J]. Henan Technology, 2010(10): 77-78.
- [12] 王红艳. 12 kV 可移开式手车断路器的电动力分析及设计改进[J]. 高压电器,2016,52(9):50-54.  
WANG Hongyan. Electrodynamics analysis and design improvement of 12 kV removable handcart circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 50-54.
- [13] 周立福. 10 kV 变低开关柜发热造成主变跳闸的故障分析及改进措施[J]. 电源技术应用,2012(12):62.  
ZHOU Lifu. Failure analysis of main transformer trip caused by heating of 10 kV switch cabinet and improvement measures [J]. Application of Power Technology, 2012 (12): 62.
- [14] 王秉政,江健武,赵灵,等.高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器,2013,49(12):42-48.  
WANG Bingzheng, JIANG Jianwu, ZHAO Ling, et al. Numerical calculation of contact heating temperature field in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 42-48.
- [15] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002.  
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [16] 钱立骁,陈慎言. 12~24 kV 氮气绝缘环网柜的研制[J]. 高压电压技术,2014,40(12):3717-3724.  
QIAN Lixiao, CHEN Shenyan. Research and design of 12~24 kV nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3717-3724.
- [17] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.  
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Theories and applications of high-voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [18] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,47(7):90-93.  
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [19] 张会建. 一起因开关柜故障而导致的变压器事故分析[J]. 变压器,2017,54(9):80-81.  
ZHANG Huijian. A transformer accident analysis caused by a switchgear fault[J]. Transformer, 2017, 54(9): 80-81.
- [20] 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB 3906—2006[S]. 2006.  
Alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB 3906—2006[S]. 2006.
- [21] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术条件: GB/T 11022—2011[S]. 2011.  
Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear: GB/T 11022—2011[S]. 2011.
- 朱志豪(1985—),男,硕士,工程师,主要从事中压开关柜和断路器等产品的研发工作。