

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.010

基于双隔离断口的GIS不停电扩建功能模块的研发及应用

张长虹¹, 庞准², 黎卫国¹, 杨旭¹, 李万民³, 吕金壮²,
陈伟民¹, 顾海捷³

(1. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2. 南方电网超高压输电公司, 广州 510663; 3. 上海思源高压开关有限公司, 上海 200000)

摘要: 为满足GIS间隔扩建对接安装及交接耐压试验时运行母线不停电的需求,文中介绍了一种具备双隔离断口操作,并能够确保双隔离断口中间导体有效接地的新型功能模块。文中首先比较了新功能模块与传统母线隔离开关模块的原理接线的性能特点,从壳体铸造、机械传动、内部结构以及电场分布等方面进行阐述与分析,最后提供了模块的工程应用实例。GIS备用间隔采用该模块作为母线隔离开关后,可以有效避免扩建安装以及交接耐压试验时断口击穿以致系统短路接地的风险。另外,该功能模块可大幅度降低GIS气室对接安装过程中的作业风险,大幅节省了SF₆气体的充放处理时间,有效提高工作效率。

关键词: 双隔离断口; 不停电扩建; GIS备用间隔; 不停电功能模块

Development and Application of GIS with Extension Function Module of Uninterrupted Power Based on Double Isolating Distance

ZHANG Changhong¹, PANG Zhun², LI Weiguo¹, YANG Xu¹, LI Wanmin³, LYU Jinzhuang²,
CHEN Weimin¹, GU Haijie³

(1. Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 3. Shanghai Sieyuan High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: It is desirable that the busbars can continue operating without shutting down during GIS extension and withstand tests. In order to meet this requirement, a new structure has been developed in this paper. The structure has double isolating distance and a function of earthing the middle conductor connected between the double breaks effectively. The comparison between the proposed GIS structure and the conventional GIS structure with bus disconnector is made. Further, the shell manufacturing, mechanical movement patterns, the interior structure as well as the principle of contacting are involved as well. Lastly, the installation instruction of the new structure in the field is introduced. The risk of ground faults caused by the breaks breakdown in the procession of the GIS extension and the commission withstand tests can be largely avoided with the new structure installed as the disconnector of a busbar. Besides, this structure can also evidently reduce the operational risk during the joint installation of GIS chambers and save the processing time of filling and releasing SF₆ gas, which aids to largely improve the working efficiency.

Key words: double-fracture disconnect switch; extension without shutting down; GIS standby interval; function of uninterrupted power

0 引言

随着电力技术的进步以及国民经济的发展,

GIS产品在市场上依靠自身结构占地面积小,运行故障率低、重量轻、免维护等一系列优势得到越来越多的应用^[1],同时,GIS后期工程扩建的停电问题

也日益彰显。

目前,国内外各大主流GIS设备厂对于备用间隔扩建结构的设计基本一致,即备用扩建间隔与运行母线之间仅有一个隔离断口,因此,在进行GIS备用间隔扩建安装以及交接耐压试验^[2-4]时均需对原运行母线进行停电处理,避免对接安装时隔离断口放电击穿造成的人身伤害,同时也防止交接耐压试验时隔离断口两端出现反向叠加电压时,导致放电击穿的设备安全事故的发生。对于运行单位,在GIS后期扩建,需要多次向调度申请及协调变电站母线停电,意味着延误工程施工进度、浪费人力物力以及线路停电带来的直接或间接的经济损失。据粗略估算,对于一个500 kV变电站,停电一天的直接经济损失可达数百万元以上,更有一些变电站,由于上下游客户的特殊性,如大型冶炼工厂、重要政府机关部门等,导致协调母线停电的难度极高,严重影响工程的投运时间,间接造成巨大的经济损失,在很多运维单位项目招标初期,就在GIS的技术规范书中明确提出:“GIS备用间隔设计方案需满足GIS在后期扩建过程中不停电运行母线的需求”。

因此,有必要研发一种功能简洁、结构紧凑的功能模块,通过该模块代替传统的GIS备用间隔母线隔离开关,可完成后续间隔扩建不停运行母线的目的。

1 研究现状

国内外尚无相关的研究文献提出过GIS扩建不停电的完美解决办法,综合目前业内研究现状,仅有少量的文献主要集中在缩小停电范围与停电时间以及新扩建间隔耐压试验不停运原设备的尝试中,但是仍然难以避免新间隔对接安装不停运原运行设备。

在缩小停电范围与停电时间的研究中,华北电力大学的王平提出改进GIS的元件布置方式以及母线结构,控制对接气室的大小,使安装扩建间隔操作最少,所需时间最短^[5]。河北送变电公司的郭彦伯,提出非全停扩建施工方法,介绍非全停扩建施工方法的扩建原理及施工步骤,通过实例分析该施工方法的应用情况,结果表明,该施工方法具有较好的效果^[6]。河南平高的吴文利提出可通过在扩建接口位置设置可拆卸结构,结合母线倒负荷的方式,实现对扩建设备对接安装与交接试验。

在新扩建间隔耐压试验不停运原设备的研究中,部分学者尝试使用新型的GIS方案以及试验方

法来解决以上GIS扩建不停电的要求。重庆电力公司的王谦通过建模和仿真分析了扩建的GIS设备间隔带电进行交流耐压试验过程中,母线隔离开关断口上出现极端击穿电压的情况下对GIS设备以及试验设备的影响,同时提出了交流耐压试验不停电的解决措施^[7-10]。广东电网珠海供电局的周峰提出通过同频同相交流耐压试验技术,可大面积减少交接试验时的停电范围,并在琴韵变电站得到应用。但是,目前这两种措施均存在局限性与风险,主要有以下2点:

1)采用波纹管对接GIS母线技术。这种方式仅仅达到对扩建设备进行工频耐压交接试验时不停运行母线的目的,但在波纹管对接安装过程中仍然需要对GIS运行母线进行停电处理。因此,这种方式未能完美解决GIS扩建设备时不停母线的问题,同时,也存在一定的安全隐患,例如:波纹管对接段是无法参与工频耐压交接试验考核的,只能通过对其带电运行24 h进行绝缘考核,如果波纹管对接段腔体内部存在粉尘颗粒物或者尖端毛刺,仅仅以运行相电压进行考核是存在盲区的;

2)采用GIS同频同相交流耐压试验技术并研制出相应的耐压试验装置^[11-15]。该技术以相邻设备运行电压(如取母线电压互感器二次侧电压)作为参考电压,通过调感串联谐振方式产生试验电压。该技术对相位角控制的精度要求极高,而且试验过程中隔离断口一旦出现击穿故障,仍然会影响母线的正常带电运行,从而造成电网事故。因此,同频同相耐压技术的推广受到极大的限制,要求在耐压过程中母线隔离断口不能出现任何的放电故障,否则,会导致电网停电事故,存在非常高的风险。

2 GIS不停电扩建原理接线

基于上述研究现状,文中从GIS备用间隔隔离开关内部结构改进作为切入点,提出一种可满足GIS间隔扩建不停电母线的系统原理接线方案。

采用不停电扩建功能模块后的GIS备用间隔与传统的GIS备用间隔接线对比示意图见图1、2。其中,CB为断路器的缩写(circuit breaker),ES为接地开关的缩写(earthing switch),DS为隔离开关的缩写(disconnect switch),DDS为改进后的双隔离开关的缩写(double-fracture disconnect switch)。

DDS原理接线与传统的母线DS最主要的区别在于2点:①将单断口隔离开关更改为双断口隔离开关;②在开关两个断口中间增加辅助接地开关ES。

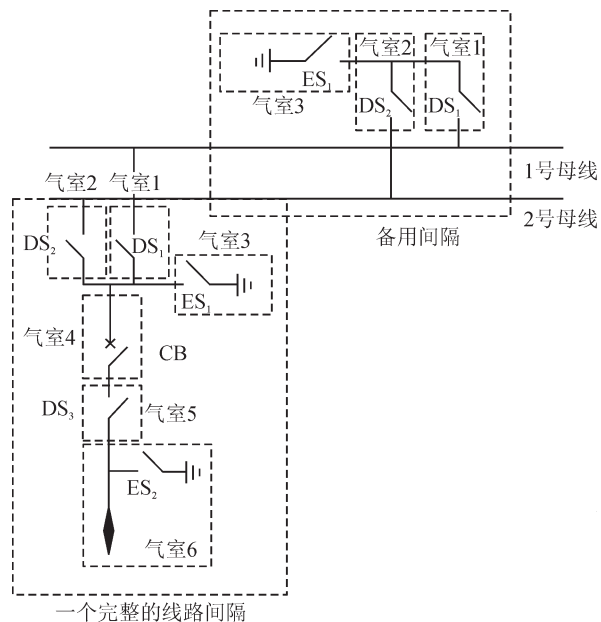


图1 原GIS备用间隔接线示意图

Fig. 1 Wiring diagram of the old GIS standby interval

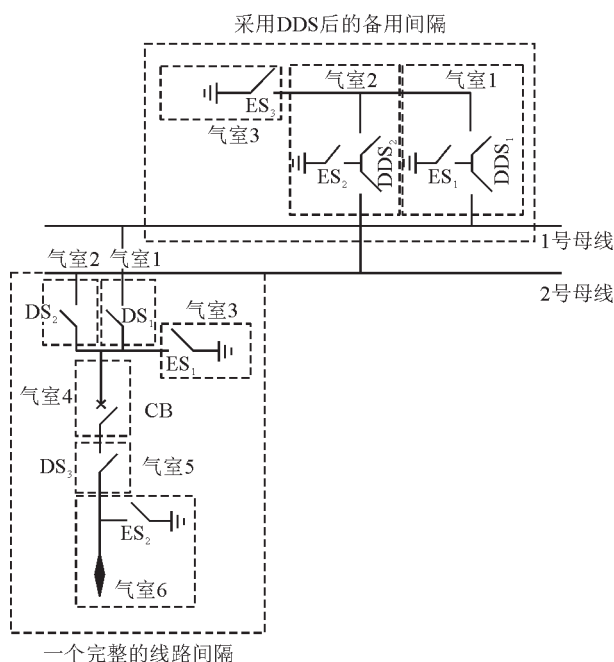


图2 采用不停电扩建功能模块后的GIS备用间隔接线示意图

Fig. 2 Wiring diagram of the GIS standby interval for the new structure without shutting down

GIS间隔不停电扩建功能模块的设计原理示意图见图3。与原GIS工程设计图纸对比,外观上的区别主要有2点:①在1号母线隔离开关气室1以及2号气室3各增加一把带手动操作机构的临时接地开关ES₁和ES₂;②在原母线隔离开关气室的基础上整体加长20%。

对比图1、2,可以发现GIS备用间隔采用不停电扩建功能模块后相比传统的隔离开关,主要具备2个优点:

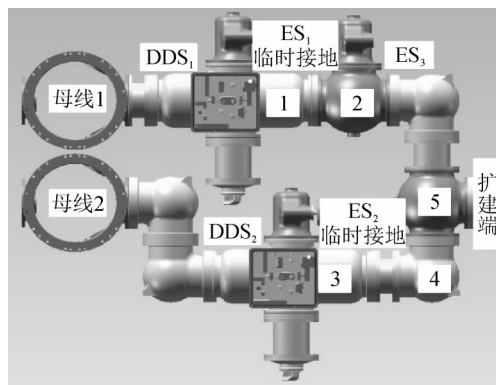


图3 不停电扩建功能模块原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the new structure for the extension without shutting down

1)备用间隔扩建对接安装时通过双隔离断口安全隔离,母线可以带电运行,即使母线侧隔离断口闪络放电,会经过辅助接地开关ES形成放电回路,不影响扩建侧的施工安全。

2)新扩建间隔进行交接耐压试验时,母线可以带电运行,通过双隔离断口对两侧进行安全隔离,辅助接地开关ES对隔离断口中间导体钳制地电位,无论哪一侧断口闪络放电,均不会影响对侧的带电状态。

3 功能模块关键技术研究

从上节不停电扩建系统接线方案中可看出,仅需要对原传动母线隔离开关气室改造为一个带双隔离断口的集成模块,就可以在备用间隔对接安装以及交接耐压试验过程中,不停电原运行设备,且不会对扩建侧与带电侧人员和设备的安全造成威胁。

下面分别从功能模块的外部壳体铸造、内部结构设计、机械传动以及电场分布等关键技术进行计算与分析。

3.1 三胞胎模块壳体

在不停电扩建功能模块的结构设计中,由于需要考虑将隔离开关和辅助接地开关进行集成化设计,为降低该功能模块整体尺寸,节省后续模块结构的布置,采用整体铸造壳体,铸造壳体的方式适用于较复杂的壳体制造,在稳定可靠的铸造工艺下,可避免焊接方式在焊接壳体过程中可能出现的焊接缺陷,以及由于焊接质量不好造成的漏气问题^[6]。

壳体外壁侧面设计便于观察断口位置的观察窗,在壳体下部设计颗粒陷阱结构,该结构是在壳体底部设计了6个凹槽,凹槽对应的位置在动静触头接触的下方,当触头机械传动以及接触摩擦时产

生的金属碎屑等异物掉落后,将直接掉入陷阱中,且由于处于陷阱的低场强分布区域,金属碎屑等异物不会逸出,避免由于碎屑等异物造成电场分布畸变^[17-18],有效减少壳体内部放电概率。铸造壳体结构示意图见图4。

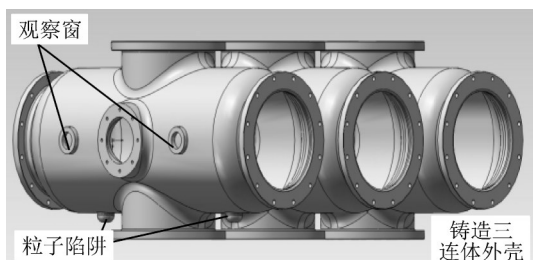


图4 铸造壳体结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure for casting shell

该壳体采用ZL101-T6铸造方式生产,按照GB 7674—2008要求对壳体强度采用爆破试验工况进行校核,对壳体内表面及封板内表面施加5倍的设计压力(0.72 MPa)为3.6 MPa,通过计算,最大主应力为233.1 MPa,小于ZL101-T6要求的239 MPa(安全系数1.15),应力最大区域位于观察窗凸台与壳体本体的过渡位置,此处有应力集中,但是均小于许用应力,机械强度满足要求。计算云图见图5。

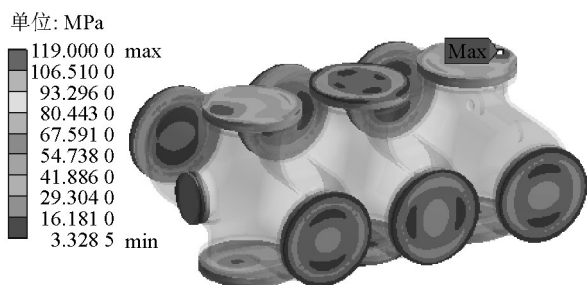


图5 壳体应力分布计算云图

Fig. 5 Calculation cloud chart of stress distribution in shell

3.2 模块内部结构设计

为了在系统电气接线图上不额外增加隔离开关编号,必须确保在一个功能气室内部设计带双断口的隔离开关,且可以实现同时分合闸操作,设计如下。

在一个SF₆气室内部,隔离开关的主电接触结构为弹簧触头,由一个电动操作机构通过齿轮齿条传动方式同时带动触头向两端的静触头进行分合闸操作,模块内部触头结构见图6。

由于齿轮齿条传动方式,隔离断口两端的动静触头需采用非轴对称的偏心设计,对内部结构的电场优化提出较高的要求^[19]。

动触头中间齿轮通过轴承、花键与环氧树脂传动连杆连接,并实现三相机械联动,另外辅助接地开关ES₁、ES₂采用手动操动机构,分相操作。

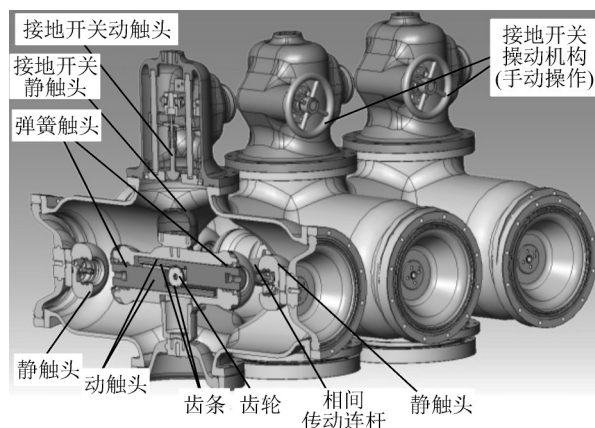


图6 模块内部触头结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the internal structure for the new structure

通过功能模块能够同时实现双侧隔离断口分合闸、断口中动触头导电部分可靠接地的功能,功能模块内部横截面示意图见图7。

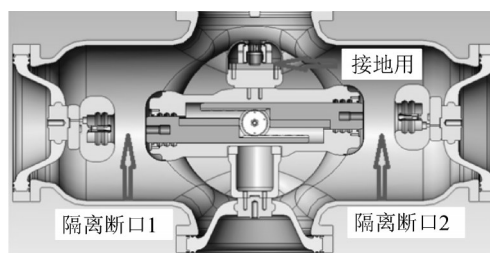


图7 功能模块横截面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the cross section for the new structure

隔离开关采用齿轮齿条的传动方式,可同时驱动动触头导体往两侧进行分合闸运动,合闸状态下与静触头内部压紧弹簧紧密接触,可承受GIS运行过程中的额定电流以及故障短路电流。齿轮齿条具体结构见图8,动触头的装配图见图9。

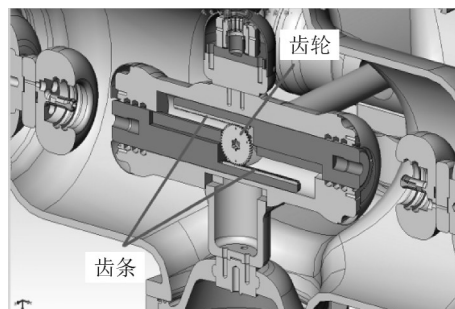


图8 齿轮齿条结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the structure for the gear and rack

由于该结构中一个齿轮同时需要驱动两侧动触头,因此对触头上面齿条和齿轮的配合度要求较高,否则难以保证两侧断口的分合闸同期性。配合度的控制一方面是传动部件的加工工艺,另一方面

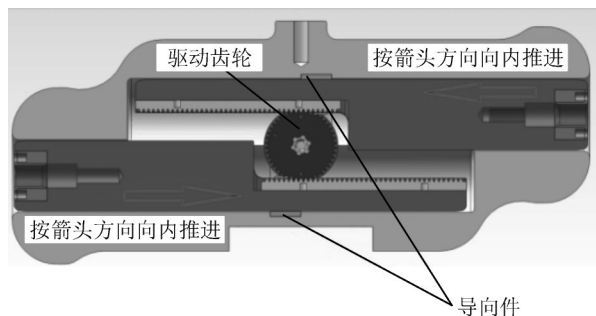


图9 动触头装配示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the assembly for the movable contact

是装配工艺。在装配过程中需要将传动齿轮固定后,将双侧导体同时向齿轮方向推进,直至齿轮与齿条完全啮合,如齿轮与齿条配合不当则容易出现触头运动卡滞。

在该位置要设计合理的导向结构,对中间动触头两侧运动进行支撑,防止运动过程中触头受力运动轨迹发生改变导致运动不畅。

3.3 机械传动及其扭矩校核

为确保功能模块机械操作的稳定性与可靠性,双断口隔离开关单独由一个操作机构控制,辅助接地开关采用独立手动分合闸操作,该设计有利于优化及简化开关操作时序,避免误操作,功能模块三相联腔剖面示意图见图10。因为在GIS操作过程中,对于功能模块和接地开关的分合闸时序有严格的要求,一旦操作顺序不正确,极易造成运行事故,例如:在GIS双母线运行过程中功能模块需要承担切合母线转换电流功能,该过程要求功能模块完成相应的开关操作,如果双断口隔离开关和接地开关采用同一个操动机构控制,如果中间传动的分合闸同期性误差超标,接地开关断口先于隔离开关断口分开之前关合将导致带电母线直接接地短路,给设备运行造成重大事故^[20]。

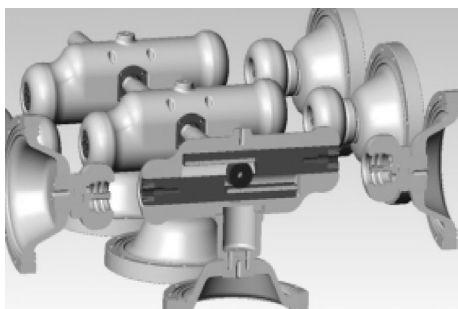


图10 功能模块三相联腔剖面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the three-linked cavity for the new structure

因此一个完整的不停电扩建功能模块实际上

是由DDS(双断口隔离开关,见图10)和ES(手动辅助接地开关,见图11)组成。

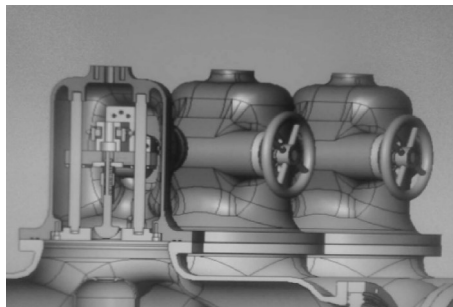


图11 辅助接地开关示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the auxiliary earthing switch

针对三相联动机械传动结构,为了增强产品关键部件的耐候性,同时减少传动环节,提高隔离开关的分合操作传动效率,采用无外露连杆的内置式传动结构设计,功能模块内部传动结构及外观见图12。

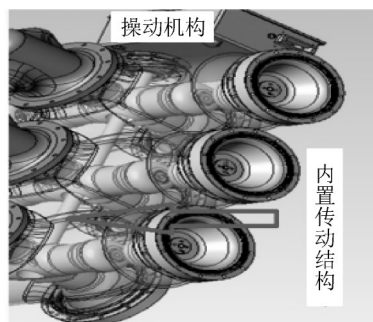


图12 内部传动结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the internal structure for drive mechanism

相比传统的单断口隔离开关,三相6个隔离断口的分合闸操作对绝缘拉杆及其嵌件的机械强度要求非常高,可能存在机械应力分布不均匀的问题,通过仿真计算,在最大扭矩120 N·m下,绝缘拉杆最大应力7 MPa,小于许用应力20 MPa,嵌件粘结面花键轴最大应力339 MPa,小于扭转剪切强度471 MPa,校核结果符合机械强度设计要求,计算云图见图13。

3.4 模块电场裕度校核

由于模块开关采用了齿轮齿条传动设计,因此动静触头属于非轴对称偏心布置,如果电场优化不良,会导致内部场强分布不均匀,击穿场强裕度降低。文中采用雷电冲击耐压值对模块使用过程中的4种工况进行有限元计算,校核电场设计裕度是否满足要求。

工况1:母线侧加高压1050 kV,中间装配、隔离开关、吸附剂装配及壳体接地取零电位,静侧取反向电压-206 kV,整体电位分布及隔离断口电场分

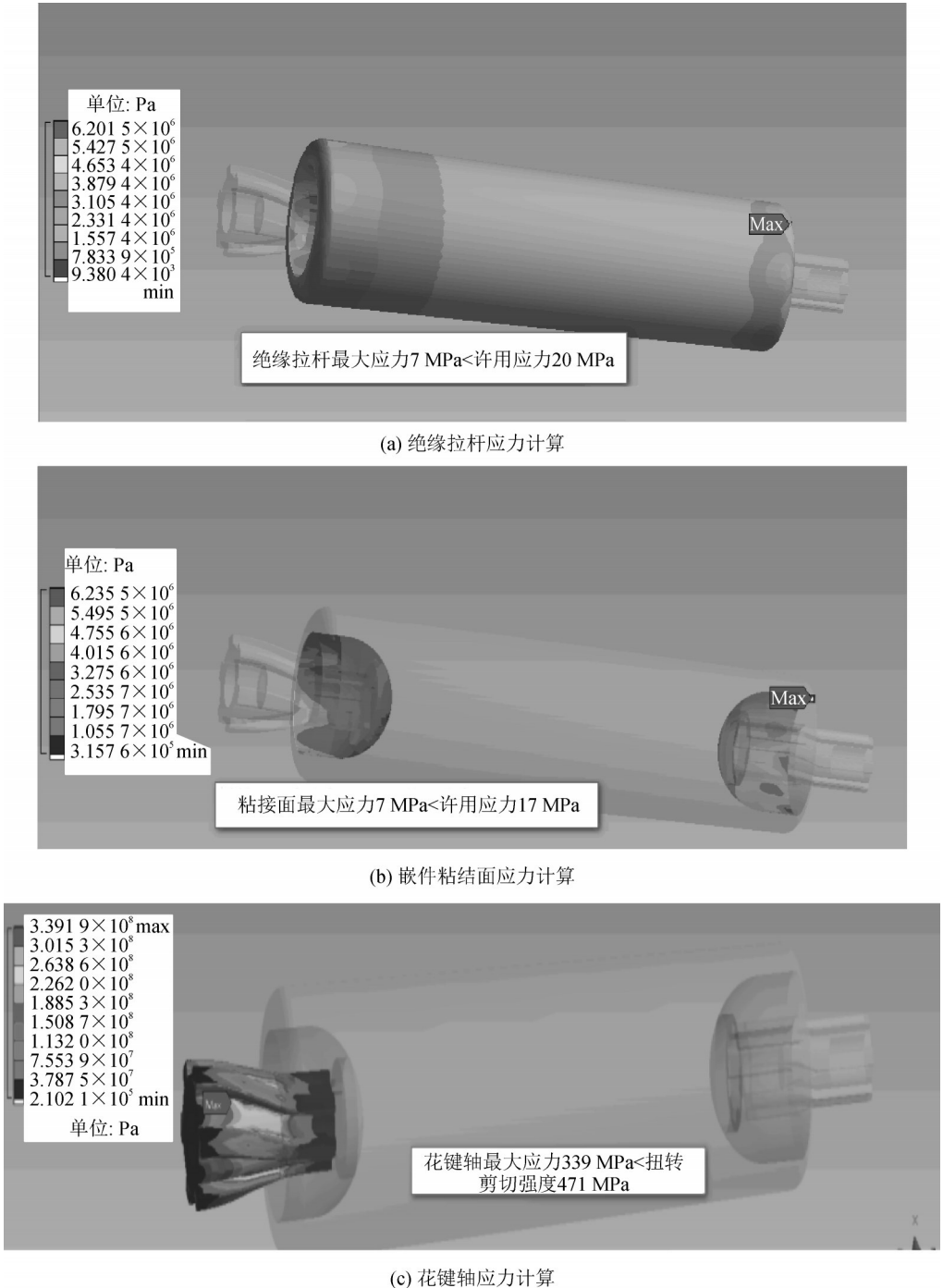


图 13 绝缘拉杆机械应力计算云图

Fig. 13 Calculation cloud chart of mechanical stress of insulating rod

布见图 14。

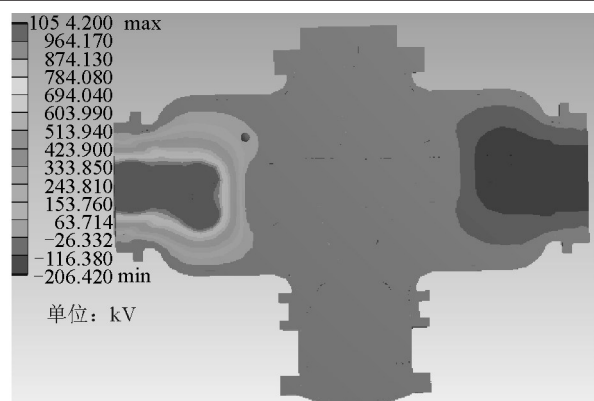
工况 2: 母线侧及静侧取反向电压-206 kV, 中间装配导体、隔离开关、吸附剂装配及壳体施加零电位, 静侧加高压 1 050 kV, 电场分布情况与工况 1 类似。

工况 3: 母线侧加高压 1 050 kV, 中间装配导体悬浮, 静侧施加-206 kV, 隔离开关、吸附剂装配及壳体接地。断口电场分布见图 15。

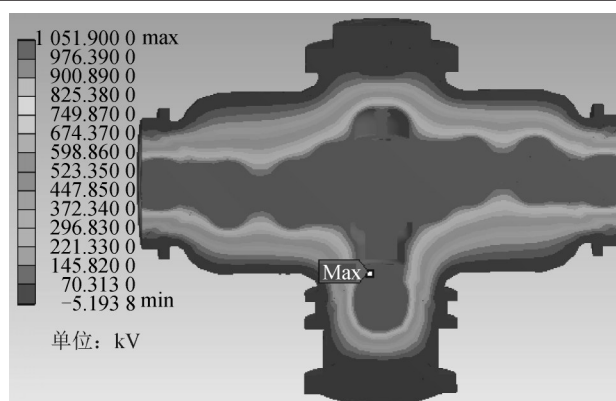
工况 4: 母线侧、中间装配导体以及静侧加高压

1 050 kV, 隔离开关、吸附剂装配及壳体施加零电位, 绝缘拉杆近中间导体面加高压 1 050 kV, 近轴承面加零电位。模块整体电位分布及断口电场分布见图 16。

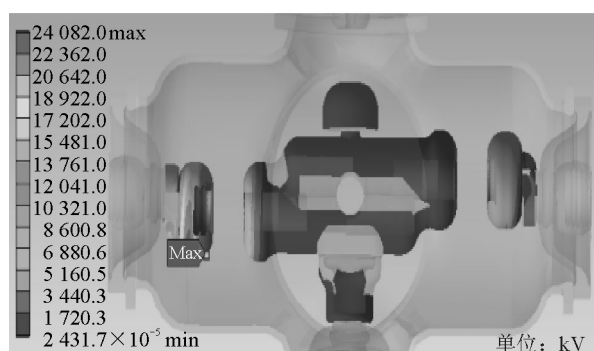
模块在 4 中特定工况下电场校核计算结果见表 1。一般常规 GIS 气室内部电场在额定表压 0.58 MPa 下的许用场强为 26.5 kV/mm(已考虑 1.15 倍的绝缘裕度), 而该模块内部场强以许用值 25 kV/mm 进行设计和优化, 实际绝缘裕度可达到 1.22 倍, 模



(a) 断口隔离开关整体电位分布

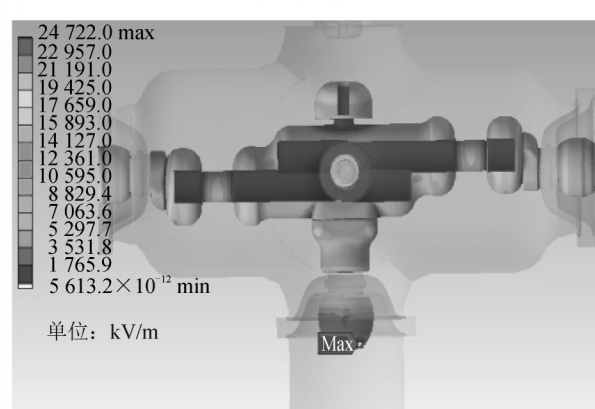


(a) 整体电位分布



(b) 断口隔离开关整体电位分布

图 14 工况 1 电场分布云图



(b) 断口电场分布

图 16 工况 4 电场分布云图

Fig. 14 Cloud chart of electric field distribution in operating condition 1

Fig. 16 Cloud chart of electric field distribution in operating condition 4

块内部各结构部件在各种工况下均满足电场判据的要求。

4 模块工程应用

与单断口隔离开关相比,采用双断口隔离开关,通过多一个断口及中间导体接地,既保证扩建过程中以及交接耐压试验时原 GIS 运行设备不需停电,又能够将扩建过程中 GIS 对接安装以及扩建后耐压试验的风险大幅减低,有效节省 GIS 扩建工期,

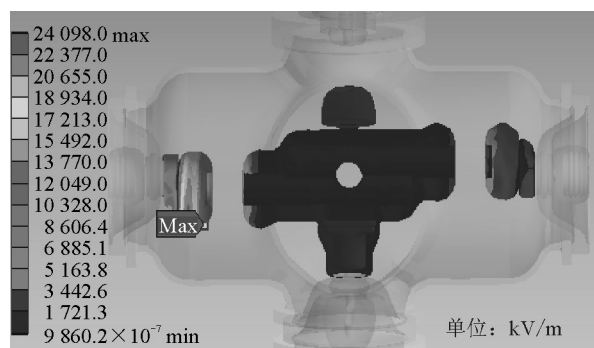


图 15 工况 3 电场分布云图

Fig. 15 Cloud chart of electric field distribution in operating condition 3

表 1 4 种工况下电场仿真计算值

Table 1 Calculation value of electric field simulation under 4 conditions

计算部位	雷电冲击耐压 1 050 kV 下最大场强值/(kV·m⁻¹)				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	许用值
壳体	13.92	14.06	13.60	15.17	16
导体	24.08	24.23	24.09	24.72	25
双隔离 断口结 构	环氧件	11.69(盆子凸侧)	10.32(盆子凸侧)	9.46(绝缘拉杆)	12
	表面	10.72(盆子凹侧)	10.56(盆子凹侧)	11.55(通盆凸侧)	
				11.99(通盆凹侧)	
绝缘子内部 金属嵌件	2.06	2.08	2.07	2.09	3

注:1. 根据软件计算原理,绝缘件表面电场值为 $E_1 = (E_{SF_6侧} + E_{环氧侧})/2$; 2. 计算绝缘件表面电场值 E_1 时,取环氧表面最大值电场 E 环氧侧及该位置对应的 SF_6 侧电场 $E_{SF_6侧}$; 3. 绝缘件内部嵌件场强是在额定相电压下计算。

提高施工效率,避免由于母线停电带来的各种损失。

以下通过操作步骤详细说明不停电扩建功能模块分别在GIS扩建安装以及交接试验时的工程应用。

4.1 备用间隔扩建对接安装

1)主母线隔离开关(DDS_1 、 DDS_2)操作至分闸状态,临时接地开关 ES_1 和 ES_2 处于合闸接地状态;

2)接地开关 ES_3 操作至合闸接地状态;

3)1号、2号母线带电运行;

4)将气室2、4气体从额定压力降低为安全气压(压力为额定压力的一半及以下);气室1、3保持气体额定压力不变;

5)回收扩建端气室5的气体至大气压力;

6)拆开扩建端的密封盖;

7)在气室5的扩建端对接安装新扩建间隔。由于气体压力通过1、2、3、4气室逐级降低,在气室5达到大气压力后,对安装人员不存在隔板炸裂的风险,可确保安全作业,且在新扩建间隔对接完成后,可以通过接地开关(ES_3)完成扩建间隔的回路电阻测量工作。具体见图17。

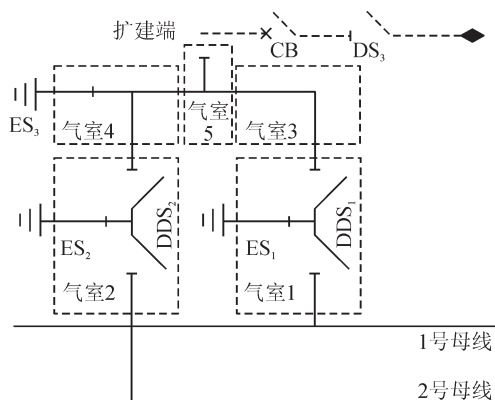


图17 扩建间隔与备用间隔对接时功能模块的操作状态

Fig. 17 Operation status of the butt joint between the extension interval and the standby interval in the new structure

4.2 扩建后新闻隔耐压试验

1)气室1、2、3、4、5中充入额定压力的 SF_6 气体;

2)操作功能模块1、功能模块2的隔离断口为分闸状态,临时接地开关 ES_1 和 ES_2 为合闸状态,确保在扩建端的新建间隔进行工频耐压试验电压与运行母线电压不会互相干扰叠加,即使出现隔离断口击穿也是通过接地回路(临时接地 ES_1 、 ES_2)形成放电回路,并不影响隔离断口另一侧运行设备;

3)接地开关 ES_3 处于分闸位置;

4)通过工频耐压装置进行工频耐压交接试验;

5)工频耐压交接试验完成后,将接地开关 ES_3 操作为分闸位置,隔离开关(DDS_1 或 DDS_2)操作为合

闸状态,扩建间隔可正常投运。具体见图18。

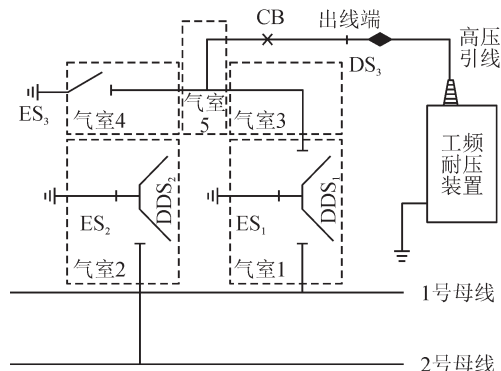


图18 交接耐压试验时功能模块的操作状态

Fig. 18 Operation status of the new structure with AC withstand test

5 结语

文中基于双隔离断口的全新设计理念提出了一种GIS不停电扩建功能模块,双断口隔离开关与辅助接地开关配合操作,可实现GIS间隔后期扩建对接安装及交接耐压试验时不停电运行母线,同时不存在之前采用同频同相法以及波纹管法进行GIS后期扩建的风险。

该模块完美解决了困扰电网许久的GIS备用间隔后续扩建停电难题,在备用间隔扩建对接安装以及工频交接耐压时,该模块的设计均具备较高的安全性与经济性。

参考文献:

- [1] BACKERS J. 城市供电网使用GIS与AIS系统的比较[J]. 国际电力, 1999(4): 38-43.
BACKERS J. Comparison of GIS and AIS system for urban supply networks[J]. International Electric Power for China, 1999(4): 38-43.
- [2] 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程: DL/T 618—1997[S]. 1997.
Code for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed switchgear on site: DL/T 618—1997[S]. 1997.
- [3] 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件: DL/T 617—2010[S]. 2010.
Specification for gas-insulated metal-enclosed switchgear: DL/T 617—2010[S]. 2010.
- [4] 额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674—2008[S]. 2008.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltage of 72.5 kV and above: GB 7674—2008[S]. 2008.
- [5] 王平, 王慧娟, 郭路遥, 等. GIS变电站灵活性扩建及电气试验方案的研究[J]. 电气时代, 2010(8): 84-85.
WANG Ping, WANG Huijuan, GUO Luyao, et al. Research

- on the flexibility extension and electrical test scheme of GIS substation[J]. Electric Age, 2010(8): 84-85.
- [6] 郭彦伯, 李 猛, 范 震, 等. 非全停扩建施工方法在GIS变电站的应用[J]. 河北电力技术, 2016, 35(2): 30-31.
GUO Yanbo, LI Meng, FAN Zhen, et al. Application of not all power outage construction method in GIS substation[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(2): 30-31.
- [7] 贾良庆. 浅谈GIS设备的现场交流耐压试验[J]. 工程与建设, 2008, 22(5): 710-712.
JIA Liangqing. On the field AC voltage withstanding test for GIS equipments[J]. Engineering and Construction, 2008, 22(5): 710-712.
- [8] 王 谦, 吴高林, 徐瑞林, 等. GIS设备不停电交流耐压试验时母线隔离断口击穿仿真分析及防止措施[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 98-104.
WANG Qian, WU Gaolin, XU Ruilin, et al. Simulation and prevention of isolating distance breakdown in busbar during power frequency withstand test for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 98-104.
- [9] 文 学, 李宏仁. SF₆断路器及GIS的现场交流耐压试验[J]. 四川电力技术, 1999(6): 4-6.
WEN Xue, LI Hongren. On-site AC withstand voltage test of SF₆ circuit-breaker and GIS[J]. Sichuan Electric Power Technology, 1999(6): 4-6.
- [10] 王贻平. GIS现场交流耐压试验技术[J]. 华东电力, 1998(4): 40-43.
WANG Yiping. On-line AC voltage withstand test technology for GIS[J]. East China Electric Power, 1998(4): 40-43.
- [11] 周 峰. GIS同频同相交流耐压试验技术在对澳供电设备扩建中的应用探讨[J]. 科技创新与应用, 2016(9): 180.
ZHOU Feng. Discussion on the application of the same frequency and phase AC withstand voltage test technology on GIS equipment[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016(9): 180.
- [12] 印 华, 王 谦, 龙英凯. GIS同频同相交流耐压试验技术解析[J]. 智能电网, 2015, 3(7): 679-682.
YIN Hua, WANG Qian, LONG Yingkai. Analysis of same frequency and phase AC withstand voltage test technique of GIS[J]. Smart Grid, 2015, 3(7): 679-682.
- [13] 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则: DL/T 555—2004[S]. 2004.
Guide for withstand voltage and insulated test of gas-insulated metal-enclosure switchgear on site: DL/T 555—2004 [S]. 2004.
- [14] 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件: DL/T 617—2010 [S]. 2010.
Specification for gas-insulated metal-enclosed switchgear DL/T 617—2010[S]. 2010.
- [15] 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程: DL/T 618—2011[S]. 2011.
Code for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed switchgear on site: DL/T 618—2011[S]. 2011.
- [16] 罗学琛. SF₆气体绝缘封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated(metal-enclosed) switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [17] 朱德恒, 严 璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
ZHU Deheng, YAN Zhang. High voltage insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [18] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [19] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
LIN Xin. Modern high voltage electrical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [20] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 第四版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
LI Bin. Design of SF₆ high-voltage electrical apparatus[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- 张长虹(1983—), 男, 教授级高级工程师, 高级技师, 从事高电压技术研究工作。