

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.002

对中国有机绝缘管形母线的回顾与展望

黎斌, 于欣¹, 仝志红¹, 刘扬¹, 夏立迎¹, 周小乐¹,
张春慧², 刘金龙¹, 王占文³, 李刚⁴, 李旭光⁴

(1. 天津沃尔法电力设备有限公司, 天津 301721; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;
3. 中国能源建设集团天津电力建设公司, 天津 300380; 4. 锦州供电公司, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 文中回顾了中国各种有机绝缘母线(简称管形绝缘母线)的发展历程、其优点与缺点、贡献与存在的问题。这些问题突出地表现在:一些管形绝缘母线在母线与母线接头处,因电场分布很差常发生母线对地闪络;一些管形绝缘母线在与开关设备、避雷器等电器接口处,或因电场集中常发生电晕而发展为对地闪络,或因接口处有效绝缘尺寸设计不足、制造组装质量不好而发生母线对地放电,给运行单位造成停电损失。文中分析了这些事故发生的原因,也提出了改进、完善与提高的建议。在中国多种有机绝缘母线磕磕碰碰艰难的发展历程中,也看到了希望——一种创新型电容式复合绝缘母线的发展前景。该母线在母线与母线、母线与其它电器的联结处采用了多重电容屏蔽设计,电场分布均匀,接口处绝缘可靠。文中还从材料特性、制造工艺和质量监控等多方面介绍了该母线的绝缘可靠性和控制局部放电的独特经验。局部放电是管形绝缘母线长期安全运行的生命线,谁控制了管形绝缘母线的局放特性,谁就掌握了绝缘管形母线向高压/超高压的发展方向。

关键词: 有机绝缘; 母线; 局部放电与沿面放电; 运行可靠性

Review and Prospect of the Organic Insulated Bus in China

LI Bin, YU Xin¹, TONG Zhihong¹, LIU Yang¹, XIA Liying¹, ZHOU Xiaole¹,
ZHANG Chunhui², LIU Jinlong¹, WANG Zhanwen³, LI Gang⁴, LI Xuguang⁴

(1. Tianjin Woerfar Power Equipment Co., Ltd., Tianjin 301721, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering of Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. China Energy Construction Group Tianjin Electric Power Construction Company, Tianjin 300380, China; 4. Jinzhou Power Supply Company, Liaoning Jinzhou 121000, China)

Abstract: This article reviews the development of various organic insulated bus (tubular insulated bus) in China, including their advantages & shortcomings, and their contributions and problems. These problems reflect outstanding in: tubular insulated bus in the bus and the bus connector. Due to the electric field distribution is very poor, bus to ground flashover often occurs; some tubular insulated bus and switch equipment, arrester electrical interface, because of the electric field concentration, corona often occurs and further to flashover, or due to the lack of effective insulation size design, manufacture and assembly quality is not good and bus discharge to the ground, to the operation unit caused by power loss. This paper analyzes the cause of the accident, also put forward the improvement and improved suggestion. In our country, during the difficult development process of varieties of organic insulated bus, the author also sees the hope: the development prospects for a new type of capacitive compositely insulated bus. The bus is connected with the bus, the bus and other electric apparatus, and the design of multiple capacitor shields are adopted, the electric field distribution is uniform, and the insulation of the interface is reliable. In this paper, the characteristics of the material, manufacturing process and quality control and other aspects of the bus insulation reliability and control of the unique experience of partial discharge. Partial discharge is a tubular insulated bus lifeline long-term safe operation, which controls the tubular

收稿日期:2016-02-22; 修回日期:2016-04-06

insulating bus PD characteristic, grasps the insulated tube bus to the direction of high/ultra high voltage.

Key words: organic insulation; busbar; partial discharge and discharge along surface; operational reliability

0 引言

以往低压配电系统大量使用价位较高的电缆,影响了配电设备的经济性;为降低配电设备成本,有的也采用裸露的母排,却受到来自潮湿污秽环境和小动物入侵的干扰。

为解决上述问题,十多年前中研发出多种有机绝缘材料包裹的绝缘母线,如聚四氟乙烯带包绕母线,硅橡胶挤包母线,环氧树脂浇注母线,以及近年新研发的用聚脂薄膜包绕的电容式复合绝缘母线,以上简称绝缘管母。这些绝缘管母的推广使用,为缩小配电母线的布置空间、提高母线运行可靠性作出了历史性的贡献,功不可没^[1-9]。

十多年来其中的一些母线在运行中也出现一些故障^[9-14],大都集中在母线接头、母线与其他电器的接口处,如何科学地认识各种有机绝缘母线值得思考。文中从技术角度探讨问题,找准中有机绝缘母线技术的发展方向,促进其健康发展。

1 聚四氟乙烯带包绕母线

1.1 干式互感器的质量

20 世纪九十年代初出现的干式电流互感器,将聚四氟乙烯带引入高压电器作主绝缘介质,通过几年的研制、生产及运行,干式 CT 发展受限。其原因主要是:①允许工作场强较低($2\sim 3\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$);②耐电晕性较差,较小的局部放电会导致聚四氟乙烯快速分解粉化;③电容屏材料(铝箔)厚而硬,热膨胀系数与聚四氟乙烯不一致;④抗张强度很小($10.3\sim 31\text{ MPa}$);⑤填充的硅油因用量多,密封结构不好而大量渗油。

原因④导致包扎力小,带间夹杂的空气挤不干净,内部气泡场强高,大大降低了局部放电的起始电压,局放量也相应增大;原因①不仅使绝缘层过厚,材料消耗量大,成本高,更重要的是包扎越厚夹入空气也多,局放特性就越差;原因③将导致缠绕时铝箔与聚四氟乙烯带间弥合性不好,带间易出现褶皱而窝藏空气。在低温时,铝箔与聚四氟乙烯带收缩不同步出现带间空隙,导致大量空气侵入而使局放量骤增;原因⑤不仅影响了产品外观,硅油流失后,填充空隙还是空气,又一次恶化了产品的局放特性。

以上原因①、③、④、⑤产生的后果都集中到一点——破坏了母线的局放性能,导致局放起始电压

降低、局放量增大;原因②说明了局部放电是逐渐侵蚀绝缘材料、导致主绝缘破坏的隐形杀手。

1.2 聚四氟乙烯带包绕母线的质量

母线行业内有人不知上述问题,简单地将其与电缆技术拉扯到一起,而形成了聚四氟乙烯带包绕母线,运行中的质量问题,归纳如下。

1.2.1 母线接口处电场集中绝缘隐患多

聚四氟管母不仅遗留了干式 CT 原有的毛病,还患上了新的病痛:在母线与母线的接头处、母线与其他电器的接口处经常闪络放电烧坏母线^[15],见图 1。

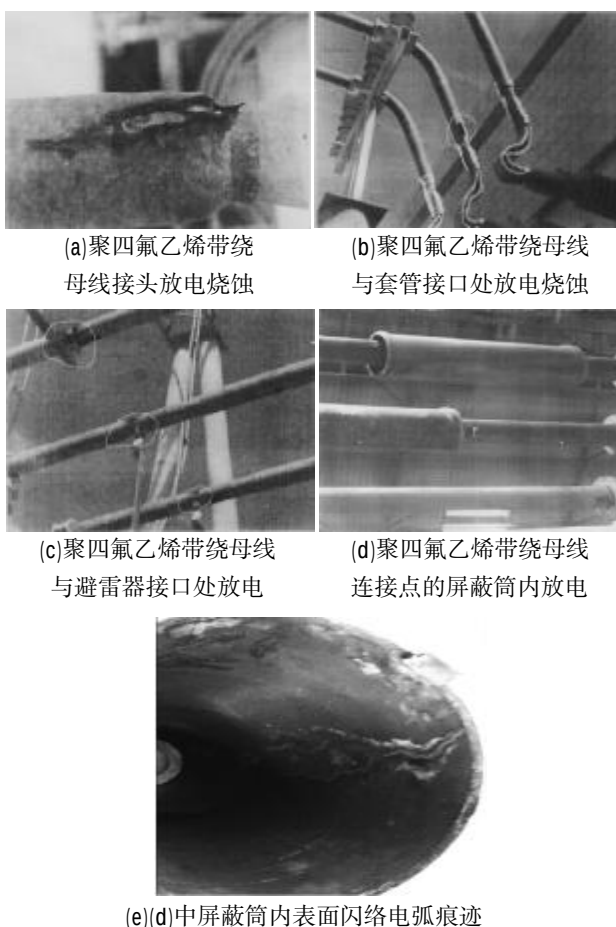


图 1 聚四氟乙烯带绕母线接口处的闪络故障摘录

Fig. 1 Flashover at interface of the PTFE belt busbar

图 1(a)–(e)所示故障,绝不是“外护层绝缘电阻下降……引起沿面放电”,因为外护套不是主绝缘,击穿放电是主绝缘被破坏。

聚四氟乙烯带绕母线结构示意图见图 2,该母线在导体与接地屏蔽之间,仅是一种单层电容结构,不是多重电容结构。对一个非多重电容,在其端部(图 2 中的尺寸 A 区域)如果没有其它改善电场分布的设计,电场分布是很不均匀的, D 点场强通常很高

(参见第 2.2 节)。

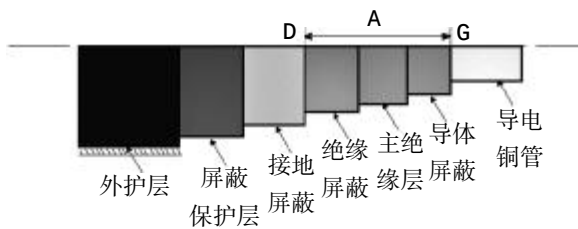


图 2 聚四氟乙烯带绕母线结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the PTFE belt busbar

母线端部密封简陋, 易受雨雪侵入而使主绝缘受潮, 主绝缘表面绝缘电阻骤减, 局放起始电压常下降到正常运行相电压附近, 局放不断发展而形成带电母线沿主绝缘表面对接地屏闪络, 电弧殃及内外, 主绝缘被破坏。

为了改善这个问题, 硅橡胶挤包母线端部绝缘处理见图 3。图 3 在母线端部设置一小段用聚四氟乙烯带和铝箔包绕的多重电容屏, 用以改善母线端部的电场分布, 单层电容屏端部电场分布见图 4(见第 2.3 节), 这种设计有效果, 但其绝缘可靠性有待进一步研究改进提高。

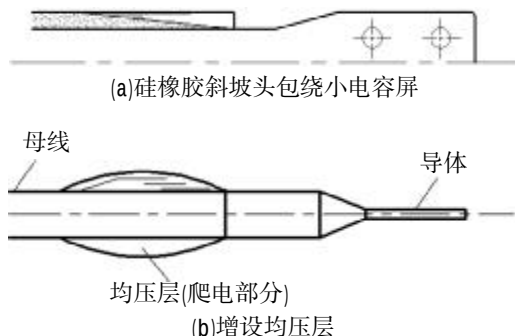


图 3 硅橡胶挤包母线端部绝缘处理

Fig. 3 Insulation treatment of the silicone rubber extruded insulative busbar end

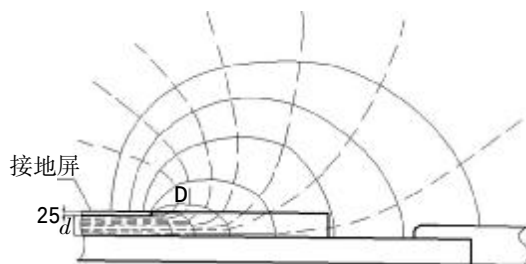


图 4 单层电容屏端部电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of single layer capacitive screen end

1.2.2 主绝缘手工包绕不紧密, 夹入空气多

聚四氟乙烯带(以及性能相近的聚乙烯带)抗拉强度都小于 30 MPa, 手工包绕时用力不能大, 主绝缘层包扎不紧, 夹入空气较多, 是导致这类母线局放特性不太好的根本原因。从这类制作不太好的母线

断面看, 见图 5, 层间弥合松弛, 夹入空气不可避免。严格控制好包绕质密度很重要。

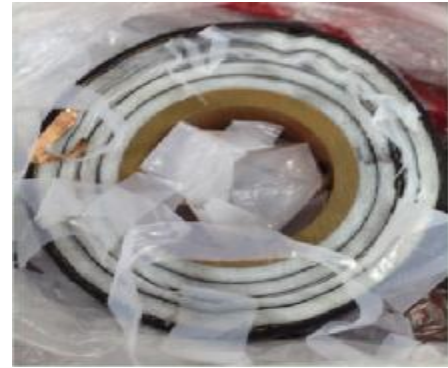


图 5 聚乙烯(聚四氟乙烯)手工包绕母线截面

Fig. 5 Section diagram of the handmade PTFE belt busbar

1.2.3 半导体层(绝缘屏蔽)破裂

完整的半导体层(图 2 中的绝缘屏蔽层), 处于主绝缘与接地屏蔽之间, 对主绝缘有一定的均匀电场的屏蔽作用。半导体层材料机械强度不高, 手工包绕时常出现裂缝(亦空气气隙)。气隙强度高达 3 kV/mm 以上, 常引发明显的局部放电, 因热及电的破坏而将母线的主绝缘和外包层破坏^[6]。

这类母线局部放电量较大, 不仅在中低压电网运行状况令人担忧, 也阻挡了它向高电压发展的可能性。

1.2.4 用热缩管代替四氟乙烯带

个别厂家为降低成本, 用热缩管代替聚四氟乙烯带作主绝缘, 在表皮缠绕一点白色的聚四氟乙烯带作伪装, 见图 6。热缩管是一种外包护套材料, 有一定绝缘能力, 但不能作主绝缘材料。



棕色热缩管 白色聚四氟乙烯带

图 6 用热缩管代替聚四氟乙烯带的生产现场照片

Fig. 6 Production site diagram of the PTFE instead by heat shrinkable tube

2 挤包硅橡胶绝缘母线

2.1 母线基本结构

从产品样本和投标文件图片可见, 它是一种以硅橡胶作主绝缘的多重串联电容屏包绝缘, 见图 7; 但从这种母线的实物切片看, 它却是单层电容屏包绝缘, 见图 8。

产品样本和投标文件介绍的与产品实物不一致是因为一次挤包多重电容屏是不可能的。多次挤包

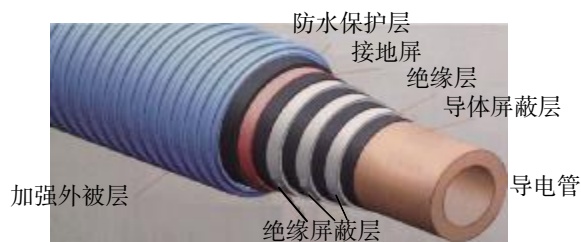


图 7 硅橡胶挤包绝缘母线(产品样本投标文件介绍)

Fig. 7 Diagram of the silicone rubber extruded insulative busbar



图 8 硅橡胶挤包绝缘母线(实物切片)

Fig. 8 Material slice of the silicone rubber extruded insulative busbar

费工时费材料,成本不允许,才出现实物与资料介绍不一致现象,对单层电容屏的弊病应予剖析。

2.2 单层电容屏母线端部电场分布不均匀

母线接口屏蔽筒,见图 9。如图 9 所示,母线与母线接头处外套“全绝缘屏蔽筒”。而单层电容屏电场分布不均匀(见图 4 中的虚线所示等位线)。



图 9 母线接口屏蔽筒

Fig. 9 Interface shield tube of the busbar

接地屏端部场强为^[14]

$$E_M = U / (\sqrt{\pi s} \cdot \sqrt{d})。$$

通常接地屏厚度 $2s$ 值很小,主绝缘层 d 厚度也不大,因此端部地屏场强较高。因为地屏在大气中局放起始场强不高($\leq 0.65 \sim 0.70$ kV/mm)^[15],因此,在不高的电压 U 值下会出现局部放电,局放发展的结果必然导致母线带电体对地屏闪络。

2.3 母线端部接头的绝缘处理

处理地屏端部场强高的办法有两种:一种如图 3(a)所示,在端部橡胶上切割斜坡,斜坡上再用聚四氟乙烯带和铝箔手工包绕小段电容屏,改善端部电场分布;另一种见图 3(b)所示,在端部设置均压层(爬电部分),拉大了裸露导体与母线地屏间的距离。这种“均压层”的结构工作原理与 3(a)相似,采用聚四氟乙烯带包绕小电容屏头。

应研究设计合理小电容屏头的电场分布,如屏头结构、屏数、屏长等。值得指出的是,母线接头处采用的这种多重小电容屏,若是在安装现场采用手工包扎时,应特别重视其包绕质量。

2.4 母线与母线连接处的绝缘处理

从图 9 可知,母线与屏蔽筒都是单层电容屏设计。屏蔽筒在径向的对地绝缘是可靠的,但其母线端部的电场分布不均匀。在母线轴向、导电母线对地屏的绝缘设计值得注意:

1)在非均匀电场空间,爬电距离设计不足时,局放起始电压低、闪络电压低。

2)屏蔽筒的密封不可能阻挡潮气的侵入,如果通风不好,筒内易积潮凝露,绝缘性能下降,局放起始电压进一步下降,局放加大了母线轴向闪络的隐患,很可能出现图 1(e)所示故障。

2.5 弯形母线的加工与绝缘可靠性

硅橡胶弯形母线加工一种办法为:先挤出直母线成品,而后再弯形,但弯形挤压应力及拉伸应力对硅橡胶绝缘层的破坏和对其绝缘性能的影响都应进行深入研究;有的弯形母线采用聚四氟乙烯带包绕,见图 10,其外包绝缘护套,如前面第 1.2.2 节所述,手工包绕的后果是令人担忧的。



图 10 手工包绕弯形母线

Fig. 10 Curved busbar of hand wrap around

2.6 母线 T 形分叉点的绝缘隐患

硅橡胶绝缘母线的分叉点见图 11。图 11 中的 T 形接头采用了类似电缆应力锥的结构。母线联接时, 如果装配技术不熟练、装配质量控制不好或内锥面夹入异物, T 形接头内锥面与母线应力锥外表面会弥合不好, 在两锥面出现缝隙而夹入空气, 此处场强升高, 加上潮气与大气污秽物的干扰, 在运行电压时也可能产生局放, 并沿尺寸很小的锥面对地闪络。

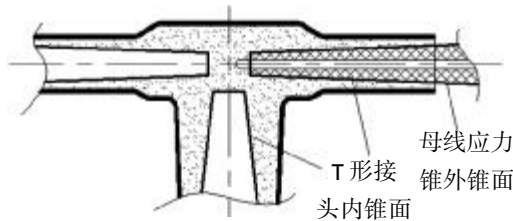


图 11 T 形接头示意图

Fig. 11 Structure diagram of the T joint

改进措施: 适当加长锥体长度和锥面压紧力。

3 环氧树脂浇注绝缘母线

环氧树脂浇注绝缘母线(环氧母线)是在母线外浇注一层环氧树脂作主绝缘, 母线接头处虽采用了一小段多重电容屏设计, 其绝缘可靠性决定于多重电容屏头的结构设计是否合适。在母线与其他电器接口处采用了类似电缆应力锥结构的连接, 见图 12。

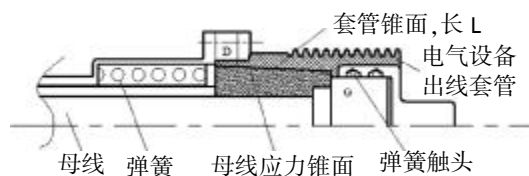


图 12 环氧母线接口示意图

Fig. 12 Interface structure diagram of the epoxy busbar

图 12 中母线应力锥面与套管锥面在组装时一旦出现装配间隙, 锥面的缝隙处场强很高, 在试验电压(甚至在运行电压)下缝隙中的空气电离, 加上锥面尺寸 L 很小, 导致高电位 G 点沿套管内锥面向地电位 D 点闪络。

被电弧烧(熏)黑的母线触头端部见图 13。图 13 箭头 K 所指就是母线端部对地(D 点)闪络后, 电弧将母线触头上端面烧(熏)黑的照片。

这种联接在运行中, 若弹簧力不足使两锥面压不紧; 或低温时应力锥收缩、硬度增大、弹簧跟进力不足; 或应力锥面长期承受了较大的母线弯应力都会使两锥面弥合不好、在分离的间隙中进入空气而导致绝缘事故。

除上述在工厂组装和运行现场可能出现的故障之外, 这类环氧母线另一个隐患是: 母线的环氧树脂



图 13 被电弧烧(熏)黑的母线触头端部

Fig. 13 Burned black by electric arc of the busbar contact end

整个浇注系统不可能全部在真空容器中进行, 在浇注过程中难免带进空气。因此, 控制局放特性是一个难题, 这也是影响这类母线向 40.5 kV 以上电压等级发展的重要原因之一。

4 局部放电——有机绝缘母线的生命线

相对工频试验耐受电压和雷电冲击电压试验, 局部放电试验最难通过。对中低压母线, 规定在 1.2 倍额定线电压下测量局部放电量 $\leq 5 \sim 10$ pC, 不是所有的绝缘母线都能在批量生产中满足这一要求。

局部放电特性是有机绝缘母线的生命线, 它影响着母线的电老化和使用寿命。局放对有机绝缘材料是个隐形杀手, 其电和热的作用侵蚀着主绝缘, 发展到一定时候使其粉化、可使主绝缘沿面闪络和体积击穿性能下降而导致事故。这个隐形杀手不像工频耐压和雷电冲击耐压试验那样明显而快速地引起注意, 却是绝缘隐患的制造者。对这样一个的技术指标, 各种有机绝缘母线在结构设计、材料选用及加工工艺等方面是如何保证的? 在出厂试验时是如何检验? 母线使用设计者在母线选型时是如何考虑的? 相关采购标准是怎样把关的? 这些问题都值得重视。

5 创新型电容式复合绝缘母线

5.1 母线基本绝缘结构

近年来发展的创新型用聚脂薄膜为主绝缘材料的电容式复合绝缘母线^[13], 见图 14。在母线(铝管或铜管)外包聚脂薄膜→镀铝膜→聚脂薄膜→镀铝膜→……构成多重电容屏, 不仅母线径向电场分布均匀, 而且母线轴向及端部空间电场分布均匀性也令人满意。

5.2 母线与母线连接

长母线中, 母线与母线连接方式有: ① 40.5 kV 及以下原则上采用母线导体现场快速电焊, 焊后现场用包扎机自动包绕电容屏, 整个母线都被包封于

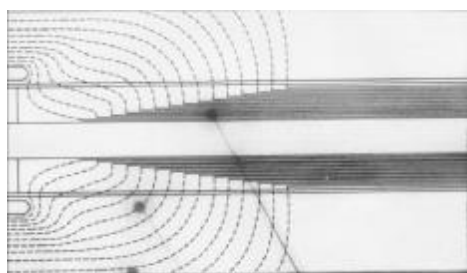


图 14 电容式复合绝缘母线的多重电容屏结构及端部较均匀的电场分布

Fig. 14 End electric field distribution & multiple capacitor screen of the capacitive compositely insulative busbar

连续的多重电容屏中,运行实践证明,这种连接方式母线接头对地及相间绝缘都很可靠;②对于 72.5 kV 及以上母线,用预制的母线接头。导体可采用软联结、硬联结或弹簧触头联接,见图 15。

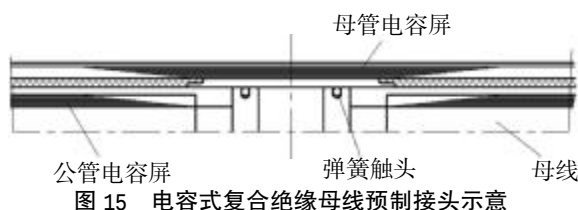


图 15 电容式复合绝缘母线预制接头示意

母管电容屏包绕在环氧树脂玻璃丝缠绕管上,母线接头处于母管电容屏—共管电容屏组合的电场分布较均匀的屏蔽空间内。电容屏的尾椎尺寸(及相对应的绝缘管沿面爬电距离)设计充裕,留有足够的绝缘裕度。母管电容屏两端与共管母线间的密封既能防止雨水进入,又能使母管内的空气与大气沟通避免发生积潮凝露,保证在户外恶劣气象条件下能可靠地运行。

5.3 母线与其他电器的接口

该母线有多种结构的接口分别与户外变压器、GIS/H-GIS/C-GIS 相联。与 GIS/H-GIS/C-GIS 连接头见图 16。

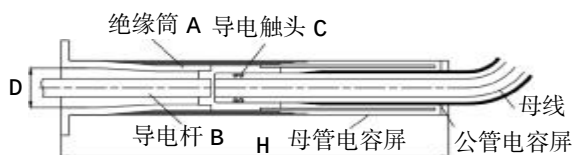


图 16 与 GIS/H-GIS/C-GIS 连接头

Fig. 16 Connectors connected with GIS/H-GIS/C-GIS

5.3.1 与 GIS/H-GIS/C-GIS 连接头

如图 16 所示,环氧树脂浇注绝缘筒 A 与 SF₆ 电器出口相联,GIS/H-GIS/C-GIS 连接头 A 筒内的 SF₆ 与所联电器的气室相通,筒内有导电杆 B 与所联电器保持电气相联。

母线用弹簧触头 C 与接头相联,接头处于共管

电容屏—母管电容屏组合的电场分布较均匀的空间内,如 5.2 节所述,接口具有稳定可靠的绝缘性能。

绝缘筒直径 D、母屏高 H 等参数可根据不同电压等级设计,其结构原则上适用于各种高压/超高压/特高压等级。

5.3.2 与变压器相联的接头

与变压器相连的接头见图 17,在母线电容屏的尾椎部分,为适应户外运行条件增设了硅橡胶伞,伞径及长度 L 按不同电压等级、不同污秽等级和不同海拔要求设计。

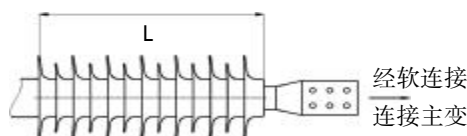


图 17 与变压器相连的接头

Fig. 17 Connectors connected with transformer

5.4 与 H-GIS 配合使用的 U 型母线

目前 550 kV 及以上超高压电站使用的 SF₆ 复合电器 H-GIS 都与架空线配合。与 GIS 相比,H-GIS 投资少、维护检修方便、占地面积较大。为进一步缩小 H-GIS 开关站面积可以使 H-GIS 与电容式复合绝缘 U 型母线配合使用,见图 18。

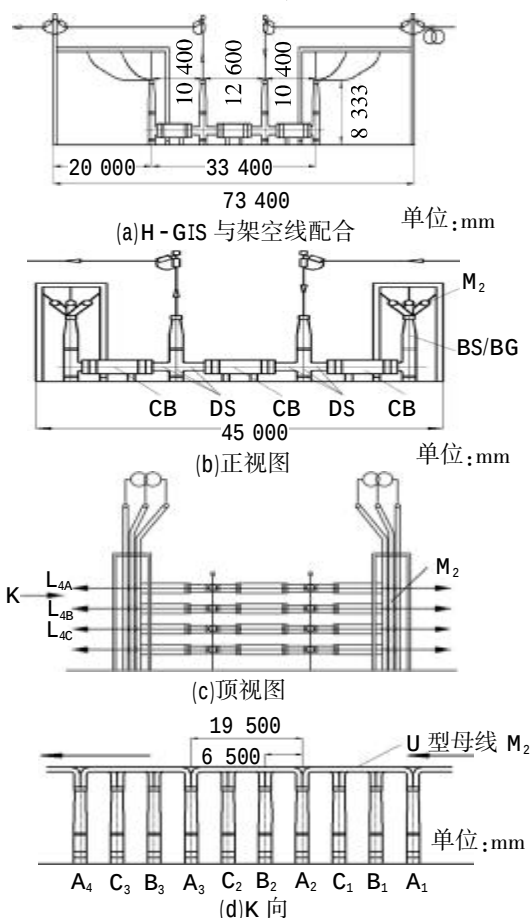


图 18 550 kV H-GIS 与电容式复合绝缘母线配合

Fig. 18 550 kV H-GIS connected with capacitive compositely insulative busbar

用 U 型母线 M_2 代替 550 kV 架空线, 可使 550 kV H-GIS 开关站宽由 73 m 压缩到 45 m。显著地减少了用地(或开山平地)的费用, 经济效益明显; 同时, 以全绝缘母线代替架空线, 母线不受大气环境干扰, 运行可靠性提高。

5.5 电容式复合绝缘母线的主要特性及可靠性

电容式复合绝缘母线的主要特性有以下 4 点。

5.5.1 绝缘介质性能优良

1) 聚酯薄膜介电强度高。介电强度 150~250 kV/mm, 比聚四氟乙烯薄膜介电强度 (87~173) kV/mm 高^[16], 比常用的车削聚四氟乙烯带 (17~60) kV/mm 更高^[17]。是硅橡胶的 7~10 倍, 是环氧树脂的 5~8 倍。允许长期工作场强 30~50 kV/mm, 也是上述三者的 10 倍多。

聚酯薄膜经多种产品数十年运行检验, 绝缘性能稳定可靠, 作为母线主绝缘介质, 是保证母线安全运行的基本条件。

2) 聚酯薄膜机械强度高。聚酯薄膜抗拉 147~205 MPa, 是聚四氟乙烯带的 10 倍多, 其包扎力大, 电容屏包扎紧密、残留气体极少, 减少了产生局放的可能性, 提高了局放起始电压值。

3) 硅油进一步提高了主绝缘性能。硅油介电强度高 (45 kV/mm), 及允许工作温度范围宽 (-50~120 °C), 成为很好的包扎填充剂。利用其填充电容屏头及聚酯薄膜叠层间的微小缝隙及聚酯薄膜上微米级的针孔, 进一步提高了主绝缘的介电强度, 硅油的排挤作用减少了包扎过程中可能夹入屏中的空气。

4) 电容屏极板材料特性优秀。电容极板为镀铝聚酯薄膜, 柔软、包绕性好。运行时与主绝缘材料同步同步胀缩, 使包绕层间不会因环温及运行温差而产生间隙, 破坏局放特性。

由此可见: 母线主绝缘介质的优秀电性能和机械性能, 为母线保持可靠优良的局部放电特性提供了物资保证。

5.5.2 机器包扎、质量稳定

直形及弯形母线都采用包绕机自动包扎, 带宽、带厚及包扎力恒定, 无人因素干扰, 是减少屏中残留气体、提高局放性能、稳定批量生产母线质量的工艺保证。

5.5.3 局放特性的设计可控性

电容式复合绝缘母线, 通过结构尺寸调整和电场计算而将屏内场强控制在允许范围之内。母线局放特性设计有可靠的理论支撑, 使局放特性保持在较高水平。

0.38~252 kV 母线在 1.2 倍线电压时、363~500 kV 母线在 1.2 倍相电压时, 局放量 ≤ 5 pC—这

一特性, 是企业从结构设计、电场计算、材料选用、包绕工艺和质量管理等方面获得的。

5.5.4 母线接口绝缘可靠

采用公管—母管多重电容屏组合设计, 使母线→母线接口、母线→其他电器接口相关部位电场分布比较均匀, 使这些接口处的对地和相间绝缘能力提高, 而且其性能稳定, 不受装配人为因素的干扰, 这是该母线的最大特点。避免了其他绝缘母线接头处的绝缘隐患, 这是区别于其他绝缘管母的重要标志之一。

如 40.5 kV 母线试品端部, 在每层电容屏的屏头和接地末屏头采用了特殊的绝缘设计, 减小了母线端部尺寸, 电场分布也比较均匀, 在工频耐受电压 96 kV 时无局部放电发生, 试品表面潮湿、带水珠状态下局放起始电压高达 49 kV 以上 (局放量 2 pC), 在同样潮湿、带水珠状态下通过了雷电冲击 200 kV 试验。这些试验数据表明了该母线优异可靠的绝缘性能。

6 绝缘母线的定义

目前, 使用的绝缘母线名称比较杂乱和模糊, 如: 封闭绝缘母线、挤包绝缘母线、复合屏蔽封闭绝缘母线、全绝缘母线等^[18~20]。

这些名词已列入某些采购标准。母线被什么封闭? 是气体、固体还是液体绝缘介质? 没有定义明确, 没写明绝缘介质的特性, 甚至还可能与发电机系统的大电流空气绝缘封闭母线相混。

为准确说明绝缘母线的特性, 对文中所述的各种绝缘母线统称为“有机绝缘母线”比较合适, 它准确地限定了这类母线都是由有机绝缘固体材料包裹, 其中各种母线在文中所采用的不同名称也表述了不同的有机绝缘材料。

母线行业中常使用“全绝缘母线”一词。全绝缘母线的真正含义应该是: 整个母线系统(包括母线间接头、母线与其它电器的接口)都有可靠的对地和相间绝缘。如果只有绝缘材料的外包装, 而在某些部位没有可靠的对地和相间绝缘功能, 不能称为全绝缘母线。

采用科学准确的绝缘母线定义, 这对电站建设、对有机绝缘母线技术的发展是有益的。

7 有机绝缘管形母线的发展前景

4 种有机绝缘母线见表 1。在现有的 4 种有机绝缘母线中, 从上述分析和表 1 的对比可看出: 最有发展潜力的是电容式复合绝缘母线。

表 1 4 种有机绝缘母线对比

Table 1 Comparison of 4 kinds of organic insulated busbar

参数		聚酯薄膜包绕电容式 复合绝缘母线	聚四氟乙烯 包绕母线	硅橡胶挤包母线	环氧树脂浇注母线
主绝缘 材质特 性	介电强度/(kV·mm ⁻¹)	150~250	87~173	22~23	30
	允许工作场强/(kV·mm ⁻¹)	30~50	2~3	3	3
	抗张强度/MPa	147.0~205.0	10.3~31.0	3.5~6.0	70.0~90.0
	允许工作温度/℃	-50~120	-50~250	-120~150	-50~130
母线端 头	电场分布均匀度	好	较差	较差	较差
	绝缘可靠性	可靠	值得关注	值得关注	值得关注
局放特性		1.2×(0.38~252) kV 时及 1.2(252~550)/√3 kV 时≤5 pC	未见要求	未见要求	未见要求
向 126 kV 及以上发展可能性		有	无	无	无

表 1 中, 值得特别强调的是局部放电特性——这是有机绝缘的要害。不控制好局部放电, 有机绝缘母线就没有生命力。谁控制了有机绝缘母线的局部放电, 谁就掌握了中国有机绝缘母线的发展方向。因此不难看出以聚酯薄膜为主绝缘材料的电容式复合绝缘母线广阔的发展前景:

1) 在中低压领域, 多年稳定可靠的运行, 加深对它的信任度, 其使用范围和使用量会迅速扩大;

2) 随着研究工作的深入, 必将进入高压和超高压的领域。为提高水电站、核电站和各类变电站的母线运行可靠性、为缩小开关站面积并降低电站投资、为减少 SF₆ 气体用量保护环境减少大气污染作出新贡献。

8 结论

1) 文中客观分析了中国各种有机绝缘母线的特点和存在的问题。

2) 指出: 以聚酯薄膜为主绝缘材料的电容式复合绝缘母线性能优异, 代表了中国有机绝缘母线技术的发展方向。

参考文献

- [1] 陈永武. 铜管屏蔽绝缘母线的特点和应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2007(6): 35-38.
CHEN Yongwu. Characteristics and application of copper tube shielded insulated busbar[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2007(6): 35-38.
- [2] 郭 非. 复合绝缘铜管型母线在水电站的应用[J]. 云南电力技术, 2013, 41(2): 93-95.
GUO Fei. Application of composite insulated copper bus type busbar in hydropower[J]. Yunnan Electric Power, 2013, 41(2): 93-95.
- [3] 关 芳, 杨益民. 管型屏蔽绝缘母线的应用[J]. 中国水能及电气化, 2011, 76(5): 59-62.
GUAN Fang, YANG Yimin. Application of pipe insulation shielding bus[J]. China Hydropower & Electrification, 2011(5): 59-62.
- [4] 郎进平, 田永彪. 全屏蔽绝缘管型母线在 10 kV 大电流输电线路的应用[J]. 电工技术, 2014(1): 72-73.
LANG Jinping, TIAN Yongbiao. Application of full screen insulated tubular busbar in 10 kV high current transmission line[J]. Electric Engineering, 2014(1): 72-73.
- [5] 田 柯, 马红东. 绝缘管形母线的研究与应用[J]. 华中电力, 2013(5): 16-18.
TIAN Ke, MA Hongdong. Research and application of insulated tubular busbars[J]. Central China Power, 2013(5): 16-18.
- [6] 张茜茹. 浅析绝缘式铜质管形母线在变电所中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(21): 287-288.
ZHANG Qianru. Analysis on the application of insulation copper-tube bus in the substation[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007, 17(21): 287-288.
- [7] 钟定珠, 孙 旭, 罗志昭. 变电站新型绝缘铜管母线[J]. 广东输电与变电技术, 2005(2): 69-70.
ZHONG Dingzhu, SUN Xu, LUO Zhizhao. New type of the substation insulation copper-tube bus[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2005(2): 69-70.
- [8] 王文霞. 浅析全绝缘屏蔽管母线在高海拔地区的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015, 5(21): 22-25.
WANG Wenxia. Analysis of the application of all insulated shielded busbar in high altitude area[J]. Theory of Urban Construction(E-Edition), 2015, 5(21): 22-25.
- [9] 宋邦申. 绝缘管型母线的性能优势及存在问题分析[J]. 电工电气, 2015(1): 60-61.
SONG Bangshen. Performance advantages and existing problems of insulated tubular busbar[J]. Electrical and Electric, 2015(1): 60-61.
- [10] 曾伟忠, 钟田勇, 朱瑞超, 等. 变电站屏蔽绝缘铜管母线运行中存在的问题及解决方案[J]. 电工技术, 2015(1): 64-65.

- ZENG Weizhong, ZHONG Tianyong, ZHU Ruichao, et al. Problems existed in the operation of shielded insulated copper tube busbar in substation and its solution[J]. Electric Engineering, 2015(1): 64-65.
- [11] 古 刚. 浅谈变电站设计中全绝缘屏蔽铜管母线的运用研究[J]. 电工技术, 2015(1): 116.
- GU Gang. Application research of brass busbar substation design fully insulated shield[J]. Electric Engineering, 2015(1): 116.
- [12] 国网新疆电力公司电运检函[2013]164号文附件 220 千伏末变 1 号主变 35 千伏侧管母外绝缘烧蚀分析报告[S]. 2013.
- State Grid Electric Power Company Xinjiang Transport Inspection Letter [2013] No. 164 Annex 220 kilovolt main transformer late become the 1st female outer side tube 35 kV insulation ablation analysis[S]. 2013.
- [13] 黎 斌, 王日新, 于 欣, 等. 创新型电容式复合绝缘母线及套管的研究、应用和发展[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 131-138.
- LI Bin, WANG Rixin, YU Xin, et al. Research, application and development of innovative capacitor composite insulated busbar and bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 131-138.
- [14] 严 璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technologies[M]. 2nd Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [15] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- LI Bin. SF₆ high-voltage electrical design[M]. 4th Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
- [16] 电工绝缘手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- “Electrical Insulation Handbook” Editorial Board. Electrical insulation manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1990.
- [17] 电气电子绝缘技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- “Electronics Insulation Technology Handbook” Editorial Board. Electrical and electronic insulation technical manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [18] 张北宁. 管形绝缘母线和矩形铜排母线性能比较及应用[J]. 水电与新能源, 2010(6): 60-64.
- ZHANG Beining. Comparison of characteristics of insulated tubular copper busbar and rectangular copper busbar and their application[J]. Hydropower and New Energy, 2010(6): 60-64.
- [19] 张真涛, 张 斌, 邢文涛, 等. 变压器绝缘管母护套烧损故障分析及处理[J]. 河南电力, 2012(3): 23-24.
- ZHANG Zhentao, ZHANG Bin, XING Wentao, et al. Analysis and processing of burning fault on transformer insulated tube generatrix sheath[J]. Henan Electric Power, 2012(3): 23-24.
- [20] 张星海, 刘凤莲, 邓元实, 等. 35 kV 绝缘管型母线运行异常分析及结构探讨[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 190-197.
- ZHANG Xinghai, LIU Fenglian, DENG Yuanshi, et al. Analysis on abnormal operation and structure of a 35 kV insulating tubular bus bar[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 190-197.
- 黎 斌(1939—), 男, 教授级高级工程师, 从事高压电器研发工作。