

充气柜极柱绝缘结构设计及可靠性分析

夏 琨 张罗锐 陈利民 申河庆 刘宏玉*

摘要: 本文围绕充气柜极柱绝缘结构展开研究, 首先阐述了充气柜的工作原理与结构特点, 为后续的设计和分析奠定基础。接着详细探讨了充气柜极柱绝缘结构设计的关键点, 包括固封极柱结构优化、气体绝缘结构优化以及模块化接口设计。然后提出了针对极柱绝缘结构可靠性的分析策略, 涵盖电气性能模拟分析、机械性能稳定性评估和环境适应性测试。通过全面深入的研究, 旨在提高充气柜极柱绝缘结构的设计水平和可靠性, 为充气柜在电力系统中的安全稳定运行提供保障。

关键词: 充气柜; 极柱绝缘结构; 设计关键点; 可靠性分析

引言

在电力系统当中, 充气柜是一种重要的开关设备被广泛地应用到变电站, 工业企业以及其他地方, 担负着对电路进行控制与保护的重要使命。极柱绝缘结构在充气柜中起着核心作用, 设计是否合理可靠直接关系到充气柜整体性能及运行安全。在电力系统日益发展的今天, 人们对于充气柜性能的要求日益提高, 同时对于极柱绝缘结构设计及可靠性有了更苛刻的要求。所以对充气柜极柱绝缘结构设计和可靠性分析进行深入的研究是有实际意义的。

一、充气柜工作原理与结构特点

(一) 工作原理

充气柜是将高压元件, 如母线、断路器、隔离开关、互感器等, 密封在充有较低压力(0.1~0.5MPa)的压缩气体(如六氟化硫(SF₆)、氮气(N₂)或其混合气体)的金属封闭壳体内的一种开关设备。其工作原理基于压

缩气体的优异绝缘性能和灭弧性能。当电路正常运行时, 压缩气体起到绝缘作用, 将带电部件与外界隔离, 保证设备的安全运行; 当电路发生故障需要切断电流时, 断路器元件动作, 利用压缩气体的灭弧特性, 迅速熄灭电弧, 切断故障电流, 防止事故扩大。

(二) 结构特点

充气柜主要是由铸铝合金和轧制钢板构成的柜体, 不同的制造商和型号在结构上有所不同, 例如西门子8DA10/8DB10型采用铝单相分相型, 而Areva的W1型则是钢板三相腔筒型。每个密封隔室都配备了独立的泄压通道, 这样在内部发生故障并产生压力时, 可以迅速释放, 确保人员和设备的安全。柜内的电气部件是通过焊接的套管连接到电缆线或母线的, 而气体的气密性则是通过安装在每个壳体上的泄漏检测设备进行常规检查的。为了确保操作功能从外部传递到内部, 我们选择使用波纹管进行连接。此外, 它还广泛地采用了电流/电压传感器、位置传感器和密度传感器等技术, 以确保设备的实时运行状态得到监控。断路器、母线以及三位置开关可以被安置在两个独立的隔间内, 而操作装置、脱扣器、辅助开关、电流变压器以及低压控制箱则可以安装在气室的外侧。真空断路器管负责执行开断功能, 其真空间隔只有10毫米, 电弧电压较低, 旋转和接触焊接都很小, 开关是通过固定在外壳壁上的焊接波纹管从外部启动的。动力装置使用了弹簧驱动结构, 这有助于节约电机的能量, 并且存储的能量可以应用于第二重合闸电路中。除了外壳的后壁, 所有的外壁, 包括加固的横梁、固定件和套筒, 都是通过激光自动焊接技术制成的, 而向内的拱形防爆模箱则是焊接在外壳的壁上。

作者简介:

1. 夏琨(1991.11——)男, 汉族, 本科学历, 高级工程师, 主要从事中低压配网产品研发设计方面的研究工作。
2. 张罗锐(1986.07——)男, 汉族, 本科学历, 高级工程师, 主要从事中低压配网产品管理方面的研究工作。
3. 陈利民(1986.05——)男, 汉族, 本科学历, 高级工程师, 主要从事研发管理方面的研究工作。
4. 申河庆(1989.04——)男, 汉族, 硕士学历, 中级工程师, 主要从事研发管理方面的研究工作。
5. 刘宏玉(1987.09——)女, 汉族, 硕士学历, 工程师, 主要从事生产管理方面的研究工作, 本文通讯作者。

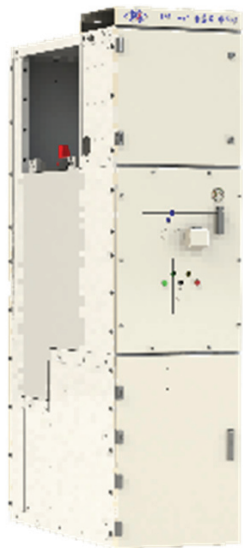


图1 充气柜示意

二、充气柜极柱绝缘结构设计的关键点

(一) 固封极柱结构优化

·材料选择：固封极柱的绝缘材料应具有良好的电气性能、机械性能和耐热性能。常见的绝缘材料有环氧树脂等，其具有优异的绝缘性能和耐化学腐蚀性。在选择材料时，需要考虑材料的纯度、密度等因素，以确保固封极柱的绝缘性能稳定。

·结构设计：固封极柱的结构设计应充分考虑电场分布的均匀性。通过优化极柱的外形尺寸和电极形状，可以减少电场集中现象，降低局部放电的风险。例如，采用圆角设计可以避免电场在尖角处过于集中。同时，合理设计固封极柱的内部结构，如设置屏蔽层，可以进一步改善电场分布，提高绝缘性能。

·制造工艺：固封极柱的制造工艺对其绝缘性能也有重要影响。在制造过程中，需要严格控制工艺参数，如浇注温度、压力等，以确保绝缘材料的均匀性和密实性。同时，要避免在制造过程中产生气泡、杂质等缺陷，这些缺陷可能会导致局部电场畸变，降低绝缘性能。

(二) 气体绝缘结构优化

·气体选择：目前，充气柜中常用的绝缘气体是 SF_6 气体，其具有良好的绝缘性能和灭弧性能。然而， SF_6 气体是一种温室气体，对环境有一定的影响。因此，在气体绝缘结构设计中，需要考虑采用环保型气体或混合气体来替代 SF_6 气体。例如，一些新型的氟化物混合气体具有与 SF_6 相近的绝缘性能，且对环境的影响较小。

·气体压力控制：气体绝缘结构的绝缘性能与气体压力密切相关。在设计过程中，需要根据充气柜的额定

电压和使用环境等因素，合理确定气体压力。同时，要设置气体压力监测装置，实时监测气体压力的变化，当气体压力低于设定值时，及时进行补气，以保证绝缘性能的稳定。

·气体密封设计：良好的气体密封是保证气体绝缘结构可靠性的关键。在设计中，应采用优质的密封材料和密封结构，如橡胶密封圈等。同时，要对密封部位进行严格的质量检测，确保密封性能良好，防止气体泄漏。

(三) 模块化接口设计

·标准化设计：模块化接口设计应遵循标准化原则，采用统一的接口尺寸和电气参数，以便于不同模块之间的互换和组合。这样可以提高充气柜的生产效率和维护便利性，降低生产成本。

·兼容性设计：模块化接口应具有良好的兼容性，能够适应不同类型的电气元件和设备。例如，接口应能够兼容不同规格的断路器、接触器等，以满足不同用户的需求。

·可靠性设计：在模块化接口设计中，要充分考虑接口的可靠性。采用可靠的连接方式和固定结构，确保接口在长期运行过程中不会松动或脱落。同时，要对接口进行防护设计，防止灰尘、水分等进入接口，影响电气性能。

三、充气柜极柱绝缘结构可靠性分析策略

(一) 电气性能模拟分析

·电场分布模拟：利用有限元分析软件，如ANSYS、COMSOL Multiphysics等，对充气柜极柱的电场分布进行模拟分析。通过建立精确的几何模型和材料模型，设置合理的边界条件和加载条件，可以得到极柱内部各点的电场强度分布情况。根据电场分布结果，找出电场强度集中的区域，对这些区域进行优化设计，如调整电极形状、增加屏蔽罩等，以降低电场强度，提高绝缘性能。

·局部放电模拟：通过模拟分析，可以预测极柱在不同电压等级和运行条件下可能发生的局部放电情况。例如，采用基于电场分布的局部放电模型，结合材料的放电特性参数，计算局部放电的起始电压和放电量。根据模拟结果，评估极柱的局部放电性能，为绝缘结构的设计和优化提供依据。

·绝缘老化模拟：绝缘材料在长期运行过程中会受到电、热、机械等多种因素的影响而发生老化，导致绝缘性能下降。通过绝缘老化模拟分析，可以预测极柱绝缘材料的老化速度和寿命。例如，采用阿伦尼乌斯模型，

结合材料的热老化试验数据，计算绝缘材料在不同温度下的老化寿命。根据模拟结果，合理安排设备的检修周期，提前发现潜在的绝缘故障隐患。

（二）机械性能稳定性评估

·机械强度分析：充气柜极柱在运行过程中会受到各种机械力的作用，如短路电流产生的电动力、操作机构的操作力等。因此，需要对极柱的机械强度进行评估，确保其在各种工况下都能安全可靠地运行。利用有限元分析软件，对极柱进行机械强度分析，计算其在不同载荷作用下的应力和变形情况。根据分析结果，判断极柱的机械强度是否满足设计要求，对强度不足的部位进行加固设计。

·振动分析：振动是影响充气柜极柱机械性能稳定性的重要因素之一。在运输、安装和运行过程中，极柱可能会受到振动的影响，导致零部件松动、损坏等问题。通过振动分析，可以预测极柱在不同振动条件下的响应情况。例如，采用模态分析方法，计算极柱的固有频率和振型，分析其在外界振动激励下的共振情况。根据分析结果，采取相应的减振措施，如增加减振装置、优化结构设计等，提高极柱的抗振动能力。

·机械寿命试验：通过模拟极柱在实际运行中的操作次数和操作条件，对其进行机械寿命试验，检验其在规定操作次数内的机械性能是否满足要求。例如，对断路器的极柱进行机械寿命试验，按照规定的操作次数和操作频率进行分合闸操作，观察极柱的机械部件是否出现磨损、变形、松动等问题，评估其机械寿命。

（三）环境适应性测试

·温湿度测试：高温会加速绝缘材料的老化，降低绝缘性能；高湿度会导致绝缘表面凝露，降低绝缘电阻，增加局部放电的风险。因此，需要对极柱进行温湿度测试，评估其在不同温湿度条件下的绝缘性能。例如，将极柱放置在温湿度试验箱中，模拟不同的温湿度环境，测量其绝缘电阻、局部放电量等参数，分析温湿度对绝缘性能的影响。

·盐雾测试：模拟沿海等盐雾环境，检测极柱金属部件的耐腐蚀性；进行霉菌试验，评估其在潮湿温暖易

滋生霉菌环境下的性能；进行沙尘试验，检验其在沙尘天气中，密封结构对沙尘的阻挡能力，确保极柱在各类恶劣环境稳定运行。

·振动与冲击测试：在运输和安装过程中，充气柜极柱可能会受到振动和冲击的影响。通过振动与冲击测试，可以评估极柱在振动和冲击条件下的机械性能和电气性能。例如，将极柱安装在振动与冲击试验台上，按照规定的振动和冲击参数进行试验，观察极柱的机械部件是否出现松动、损坏等问题，测量其电气参数是否发生变化。

结论

总之，通过对充气柜工作原理和结构特点的了解，明确了极柱绝缘结构在充气柜中的重要作用。在极柱绝缘结构设计方面，从固封极柱结构优化、气体绝缘结构优化和模块化接口设计三个关键点进行了探讨，提出了一系列的设计原则和方法。在可靠性分析策略方面，从电气性能模拟分析、机械性能稳定性评估和环境适应性测试三个方面进行了研究，为评估极柱绝缘结构的可靠性提供了有效的手段。未来的研究可以关注新型绝缘材料的应用、环保型气体的研发以及智能化监测技术的应用等方面，以推动充气柜技术的不断进步。

参考文献

- [1] 闫秀章, 段友涛, 李德阁. 12kV 空气绝缘环网柜隔离断口电场分析[J]. 电气技术, 2023, 24(08): 61-64+69.
- [2] 吴昊, 赵瑞影. 环保型气体在充气柜中应用分析与研究[J]. 电工电气, 2023, (06): 55-59.
- [3] 王广先, 马赫然. 12kV 环保气体绝缘开关柜的设计[J]. 电工电气, 2023, (03): 60-65.
- [4] 李勇, 蔡尔何, 辛道越, 等. 66 kV 充气柜母线电气联接系统设计[J]. 机电工程技术, 2022, 51(09): 232-237+272.
- [5] 马骏. 中压开关柜绝缘技术探析[J]. 电子技术与软件工程, 2016, (12): 233-234.