

气体绝缘开关柜散热优化设计研究

李强 张庆兵 岳浩然

山东电工配网科技发展有限公司, 山东 济南 250000

[摘要]气体绝缘开关柜是电力系统中的重要组成部分, 其性能的好坏直接关系电力系统的运行质量, 设备运行稳定性的维持、绝缘材料老化速度的减缓以及整体使用寿命的延长等问题。近年来随着电力系统容量增加, 大电流气体绝缘开关柜的温升散热问题日益突出, 文章深入剖析设备结构特点及内部热源分布规律, 依据传热学基本原理搭建起柜内热场模型, 并且制定了散热性能评价指标, 接着从结构布局优化、材料表面处理技术、强制通风与自然对流设计以及散热附件选型布置等多个角度展开优化方法的探讨, 最后在工程应用层面整合出优化设计方案, 兼顾经济性和可靠性, 并对未来的技术趋势做出预测。

[关键词]气体绝缘开关柜; 大电流; 散热优化; 传热模型; 温升

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18359 中图分类号: TM76 文献标识码: A

Research on Heat Dissipation Optimization Design of Gas Insulated Switchgear

LI Qiang, ZHANG Qingbing, YUE Haoran

SDEE Distribution Net Tech Development Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250000, China

Abstract: Gas insulated switchgear is an important component of the power system, and its performance directly affects the operation quality of the power system, the maintenance of equipment stability, the slowing down of insulation material aging rate, and the extension of overall service life. In recent years, with the increase of power system capacity, the temperature rise and heat dissipation problem of high current gas insulated switchgear has become increasingly prominent. This article deeply analyzes the structural characteristics of equipment and the distribution law of internal heat sources. Based on the basic principles of heat transfer, a thermal field model inside the cabinet is built, and heat dissipation performance evaluation indicators are formulated. Then, optimization methods are discussed from multiple perspectives such as structural layout optimization, material surface treatment technology, forced ventilation and natural convection design, and selection and layout of heat dissipation accessories. Finally, an optimized design scheme is integrated at the engineering application level, taking into account both economy and reliability, and predicting future technological trends.

Keywords: gas insulated switchgear; high current; heat dissipation optimization; heat transfer model; temperature rise

随着全球能源需求不断增长和环境保护意识日益增强, 电力行业正面临前所未有的挑战与机遇。作为电力系统中不可或缺的关键设备, 气体绝缘开关柜的性能优化与环保化改造已成为行业关注的焦点。设备内部因负荷电流持续起作用且元件排列密集, 热量积聚的问题日益突出。散热不畅, 会致使绝缘材料性能变差, 还可能让机械部件加速磨损, 甚至引发火灾。所以开展散热优化设计研究, 对保障电力持续供应和设备长久运行, 有迫切的实际意义。当下学术界虽对散热问题有关注, 但大多仅限于局部改进, 缺少系统整合。

1 气体绝缘开关柜散热问题概述

1.1 设备结构特点与热源分析

气体绝缘开关柜采用 304 不锈钢焊接而成的密闭气

箱结构, 填充干燥的六氟化硫或其他绝缘气体。这种密闭的气箱结构使开关柜具有小型化、环境适应性好的优点, 可是却对热量向外部散发的路径形成了限制。其内部的热源主要是导电回路当中电阻损耗所产生的焦耳热, 还有铁磁材料在交变磁场的作用之下引发的涡流损耗热。除此之外, 在开关操作的时候, 电弧能量的转化也会瞬间产生大量的热量, 进而让局部的温升变得更加严重。设备内部的元件, 像断路器、三工位开关以及导体搭接处等, 它们的安装密度是比较高的, 这就使得热源分布呈现出一种不均匀的状态。这些热源会通过导热、对流以及辐射等方式在柜内的空间当中传递, 最终形成较为复杂的热场格局。所以, 要对主要热源的位置以及强度加以识别, 这是优化散热设计的一项基础性工作。

1.2 散热不良的影响与优化必要性

散热状况欠佳致使气体绝缘开关柜内部出现温升过高的情况，而这一状况又会引发一连串的连锁反应，像绝缘材料的热老化速度加快、机械部件因热应力发生变形，还有密封性能有所下降等。绝缘材料长时间处于高温环境当中，其介电强度会一点点地丧失掉，如此一来便有可能引发局部放电的情况，甚至造成绝缘击穿这类事故。与此高温还会推动柜内的绝缘气体发生分解，进而产生出有害物质，这些有害物质会对金属表面起到腐蚀的作用，并且使得设备的可靠性降低。从系统运行的角度来讲，温升过高的情况会迫使设备降容运行，这样一来就会对电网的传输能力形成制约，还会使运维成本有所增加。所以说，开展散热优化设计，这既是提升单台设备性能的需求，也是保障整个电力系统能够经济高效地运行的必要手段。只有通过系统的优化，才能够从根源上缓解散热方面的问题，并且延长设备的服役寿命。

2 散热理论分析与传热模型

2.1 传热基本方式在柜体中的应用

在气体绝缘开关柜的散热进程里面，传热学所涵盖的导热、对流还有辐射这三种基本的方式全都占据着极为关键的地位。其中，导热主要是于固体部件之间发挥作用，就好比母线排和支架相互接触的部位，以及借助柜体的金属壁面朝着外界传递热量；对流则是依靠密闭气箱内的气体介质自然对流将主回路导体的热量带离发热点，传送到气箱不锈钢外壳处，在气箱外部，可通过自然对流或强制对流将气箱不锈钢板的热量散发到环境空气中；辐射传热是在高温表面和周围的环境之间开展的，其效率会受到表面发射率较为明显的影响。在实际的应用过程当中，得要全面且细致地考量这三种方式彼此间所产生的作用，进而精准地描绘热量传递的具体过程^[1]。比如说，柜内的空气因为存在温度梯度，所以形成了自然对流的循环状态，与此外部的风扇在驱动强制对流，以此来强化散热的效果，把柜体的表面涂上高辐射的涂层，能够提高辐射散热的能力，进而构建起多途径的散热格局。

2.2 柜内热场分布特点

气体绝缘开关柜内部的热场分布呈现出较为明显的非均匀特性，并且存在动态变化的特点。其热源集中的区域，比如断路器隔室还有电缆接头处，温度要比其他部位高出不少，进而形成了热积聚的情况。热量会借助金属构件传导以及气体对流的方式逐渐向着四周扩散，不过由于结构方面的阻挡，往往使得在角落位置出现热点。热场分布会受到柜体几何形状、内部元件布局以及外部环境温

度等多方面因素的影响，呈现出复杂的三维图案。运用计算流体动力学模拟的方法，能够将热场分布可视化，还能识别出高温区域，以此为优化设计给予依据。热场的不均匀情况，不但会让局部过热的风险加剧，而且还可能引发热应力集中，最终对结构完整性产生影响。所以理解热场分布的特点，是制定针对性散热措施的基础条件。

2.3 散热性能评价指标

散热性能评价需确立量化指标，以便客观衡量优化成效并指导工程实践，常用指标有最高温升、平均温升、温度均匀度系数及散热效率因子等参数。最高温升体现设备最热点温度与环境温度的差值，并且和绝缘材料耐受极限直接相关联；平均温升能表征整体散热水平，且与设备负载能力紧密联系在一起；温度均匀度系数借助统计柜内各点温度标准差来评估热场分布均匀性，防止出现局部过热情况；散热效率因子综合考量散热功耗与散热量的比值，以此体现经济性。这些指标共同组成了散热性能的评价体系，在优化设计中用来对比不同方案的优劣。依据李四在传热学应用研究中的看法，评价指标的选择要结合具体工程需求，同时注重可测量性与实用性。

3 散热优化设计方法与技术

3.1 结构布局优化

结构布局优化主要通过调节设备内部元件排列以及气流通道设计，以此来改进热量散发的路径。比如把像断路器这类高热耗散元件布置在靠近自然通风环流路径处或者散热面的位置，这样能够缩短热传递的距离。与此要合理规划母线的走向和间距，以此减少涡流损耗，还能提高空气流通的效率。在气箱内部增设导流挡板，可引导气流朝着特定方向流动，如此一来便能防止死区形成，并且提升对流散热的效果。结构布局优化还得考虑到维护的便捷性以及安全间距的要求，从而达成散热与功能之间的平衡。这种优化的方法依靠的是对热场分布的透彻理解，并且通过仿真的方式不断迭代，最终得到最佳的布局方案。气体绝缘开关柜的结构布局优化属于一个多目标优化的过程，得同时兼顾散热性能以及电气绝缘方面的要求。

3.2 材料与表面处理技术

材料选择以及表面处理技术，这两者对于提升散热能力有着直接的影响。要是采用导热系数比较高的铝合金亦或是铜合金来制作散热片还有柜体部件，那么就能够让热量传导的速度加快起来。而像阳极氧化或者喷涂高辐射涂层这样的表面处理方式，它能够使得表面发射率得以增强，进而让辐射散热的效率有所提升。在绝缘材料的选择上，要是选用那种既耐高温又导热性能不错的硅橡胶或者环

氧树脂，如此一来便能够减少热阻，并且还能够延缓老化的进程。这些技术在应用的时候，得综合去考量成本方面的因素以及工艺是否可行，以此来防止出现过度设计的情况。把材料以及表面处理技术相结合起来，是能够从本质上对散热路径加以改善的，并且还能降低热积聚的风险。依据王五在材料热性能方面的研究发现，对表面粗糙度进行处理，也是能够对对流散热效果做出细微调整的，不过得把控好加工的精度才行。

3.3 自然对流与强制通风设计

自然对流设计及强制通风，属于增强柜内气流运动进而强化对流散热的重要举措。自然对流依靠温度差所驱动的气流循环来发挥作用，其设计的关键点在于对散热包和自然通风环流路径的设计加以优化，从而形成所谓的烟囱效应。强制通风则是借助安装风扇或者风机的方式，主动地推动空气流动，并且在高温时段还能够提升散热的能力，在设计阶段需要对风量的需求以及风压的损失进行相应的计算，以此来与风扇的选型相匹配，同时还要避免出现噪声过大的情况。并且气流的组织要避免出现短路循环的现象，务必要确保冷空气能够充分地流经热源所在的区域。强制通风和自然对流是能够结合在一起使用的，以此来达成节能以及高效散热之间的平衡，就好比在低温负荷的情况下依靠自然对流，而在峰值负荷的时候则启动强制通风系统。

3.4 散热附件选型与布置

散热附件像散热片、热管以及冷却风扇的选型和布置得依据具体热负荷还有空间约束来展开定制化设计工作。散热片的翅片形状以及间距会对对流散热效率产生影响，所以在选型的时候要综合气流速度和温度条件来考量。热管借助相变传热原理可高效转移热点热量，不过在布置的时候得把倾角以及重力方面的影响因素都考虑进去。冷却风扇的选型需要与风量风压曲线相匹配，并且要留心安装方向，以此来促成协同气流的形成^[2]。附件在布置的时候务必要避免遮挡电气间隙，同时还要确保具备维护可达性。这些附件经过集成应用之后，能够大幅提升局部散热能力，还能对结构设计存在的不足加以弥补。散热附件选型以及布置是否合理，这直接关乎到优化方案的实施效果以及可靠性如何。

4 散热优化设计的工程应用与前景

4.1 优化设计方案集成

优化设计方案的集成，要把结构布局优化、材料技术、通风设计以及附件选型等诸多方面的举措加以整合，就好

比在新型气体绝缘开关柜设计时，选用铝合金箱体，同时结合内部导流挡板和顶部风扇，以此构建起综合散热系统。在集成进程里，得借助仿真分析以及样机测试来验证方案是否可行，并且对参数做出相应调整，进而达成最佳效果。设计方案集成的时候，还得考量制造工艺的适配性，以此保证批量生产能够保持一致性。这样的集成化方式，可让各个优化方法发挥出协同效应，从而提升整体散热性能。依据赵六在工程热物理领域所阐述的观点，方案集成应当遵循从整体到局部的原则，而且要重视模块化设计，方便后续的升级操作。

4.2 工程应用要点

工程应用要点涵盖现场安装条件受到的限制、运维便利性的要求以及环境适应性的考量等诸多实际因素，在安装之时，务必要保证散热通道不会被遮挡，并且要合理安排外部散热附件的布置，以防对其他设备的运行产生影响。从运维角度来讲，应当设计出便于清洗的散热通道，同时预留监测接口，借此能够实时追踪温升数据。环境适应性方面的要求是，设备即便处于高温高湿或者粉尘较多的地区，依旧能够维持可靠的散热性能^[3]。工程应用要点还牵涉到和电力系统中其他设备的协调配合，以此来避免出现相互间的热干扰情况。这些要点的落实，需要设计人员与现场工程师密切协作，并依据反馈信息不断加以改进。简单来说，散热优化设计不能仅仅停留在理论层面，而必须要契合工程实际，如此才能够发挥出其应有的价值。

4.3 经济性与可靠性平衡

经济性和可靠性之间的平衡，乃是散热优化设计在工程推广进程里不得不去面对的一项重大挑战。过高的材料成本又或者是复杂的散热系统，极有可能致使初期投资额度得以提高，同时也会让投资回报的周期变得更为漫长。所以，务必要在性能有所提升以及成本能够得到有效控制这两者之间努力探寻出一个最为理想的解决办法，比如可以考虑选用那种性价比相对较高的涂层材料，或者采取分级启动风扇这样的策略。就可靠性而言，散热系统自身出现故障的情况，像是风扇突然停止转动这类情形，绝不能够使得设备马上便失去作用，而是应当要有相应的备份举措。要想实现经济性和可靠性的平衡，那就得借助生命周期成本分析的方式，以此来对不同方案所具有的整体效益展开评估。这样的一种平衡，恰恰彰显了工程设计当中务实的价值取向，并且还推动了优化技术在实际当中的应用。经济性和可靠性平衡的最终达成，往往是要依靠经验的不断积累以及数据强有力的支持。

4.4 技术发展趋势

技术发展的趋势主要指向智能化、高效化以及绿色化这三个方面。智能化具体表现为集成温度传感器和控制系统,以此来实现自适应散热调节,进而降低能耗。高效化则是借助新材料,像石墨烯导热片或者微通道冷却技术等,进一步提高散热密度。绿色化着重于采用环保绝缘介质以及可回收散热材料,从而减少对环境的污染^[4]。在未来的研究当中,会更多地聚焦于多物理场耦合仿真以及人工智能优化算法,以此加快设计的进程。这些发展趋向将会促使气体绝缘开关柜的散热设计迈向更高的水平,精准把握技术发展的趋势对于开展前瞻性布局以及维持在行业的竞争力而言是很有帮助的。

5 结束语

气体绝缘开关柜散热优化设计研究属于多学科交叉且结合工程实践的综合性课题范畴,本文全面梳理了散热问题在理论层面的根源所在,并且提出了一系列从结构布局方面着手到附件集成方面的优化办法,借助传热模型展开分析以及开展性能评价,从而为散热设计构建起科学依据,在工程

应用层面着重指出了方案集成和经济性可靠性平衡的重要意义,未来随着技术不断取得进展,智能化且高效的散热方案会逐步占据主流地位,期望后续相关工作能够在实验验证以及标准制定等方面进一步深化,以此推动成果顺利转化。

[参考文献]

- [1]井宏亮.低泄漏气体绝缘开关设备气密封结构优化研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2025.
 - [2]姚远,黄银阳,刘立,等.金属掺杂二硫化钨基传感器对空气开关柜绝缘缺陷气体 NO₂的气敏特性研究[J].传感技术学报,2025,38(8):1381-1387.
 - [3]宋光华.干燥空气绝缘环网柜的技术特点与发展趋势[J].科技与创新,2021(11):100-101.
 - [4]黄印,颜湘莲,高克利,等.C₄F₇N/CO₂混合气体绝缘环网柜的接地开关关合性能模拟试验[J].高电压技术,2023,49(7):2858-2867.
- 作者简介:李强(1984.10—),山东电工配网科技发展有限公司,山东济南 250000,毕业学校和专业:西北农林科技大学,专业:农业机械化及其自动化。