



1100 kV 气体绝缘金属封闭开关。图片由平高集团提供。

大型电气设备性能的仿真优化

平高集团使用 COMSOL 多物理场仿真软件提高了大型电气设备的研发效率, 并大幅减少了产品的研发成本, 并通过仿真 App 为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。

作者 **YUHAN QIN**

随着社会对电力能源需求的增加, 电力电网规模越来越大, 需要更多的电气设备投入电网。变电站是电力系统重要的组成部分, 与人们日常生活息息相关, 其主要作用是对电压进行变换, 以及接受和分配电能。为了减少电能传输线路上的损耗, 发电厂产生的电能长距离传输前需要在变电站将电压升高; 而为了确保用户的用电安全, 电能又需要在供给用户前在变电站内将电压降低。

常规的变电站中包含了大量的电气设备, 这些设备按照功能的不同被设置在多个配电室中。由于使用空气作为绝缘介质, 为了满足绝缘需求, 不同的设备间需要保持一定的安全间距, 这导致变电站的整体占地面积非常大。此外, 由于变电站中的许多配件暴露在自然环境中, 从而增加了变电站的维护工作。气体绝缘金属封闭开

关(Gas Insulated metal and enclosed Switchgear, 简称 GIS)是一种新型的高压配电装置, 通过优化设计以及使用特殊的绝缘气体, 可以将变电站中除变压器以外的各类设备合理、紧凑地组合成一个整体。相比于常规的变电站, GIS 具备结构紧凑、占地面积小、可靠性高、安全性强、维护工作量小等优点, 近年来获得了广泛的应用。

虽然 GIS 的可靠性高于传统变电站, 然而在长期的运行过程中, 会因绝缘子、绝缘操作杆等固体绝缘介质表面积聚的电荷导致绝缘失效, 造成严重的安全事故。GIS 的全封闭结构还会导致故障的定位和检修都十分困难。为了提升 GIS 组件的安全性、减少故障, 使 GIS 能够更稳定地运行, 平高集团有限公司开展了大量的研究工作, 致力于开发出高效、稳定的 GIS 设备。平高集团有限公司是国家电网公司直属单位, 是

中国电工行业重大技术装备支柱企业。

⇒ GIS 绝缘失效的仿真分析

相比于传统的变电站, GIS 在体积和集成度方面的优势得益于设备中不同组件之间良好的绝缘性。GIS 中的全部电气组件都被封闭在接地的金属壳体内, 并充入了合成惰性气体六氟化硫(SF_6)进行绝缘。由于 SF_6 的绝缘性能和灭弧性能都远高于空气, 所以 GIS 内组件间的距离可以大幅减小, 因此其体积可以远小于传统变电站。GIS 在长期运行过程中, 电荷会在 GIS 内部绝缘气体和固体绝缘介质的交界面聚集。当聚集的电荷达到一定的数量后, 过高的电压差会导致固体绝缘介质周围的气体被击穿, 并沿固体绝缘子表面放电。局部放电后, 被电离的绝缘气体以及金属部件等会产生分解物, 从而导致绝缘失效。

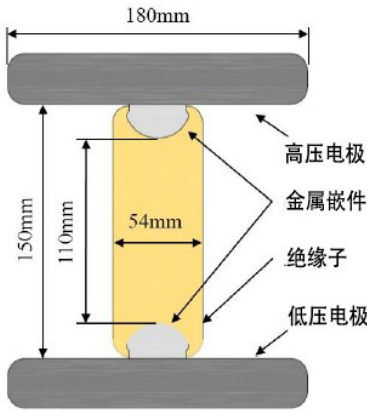


图 1. 左: GIS 绝缘系统组件截面几何结构示意图; 右: 施加 100 kV 高压后绝缘子及其周围的直流电场分布图。

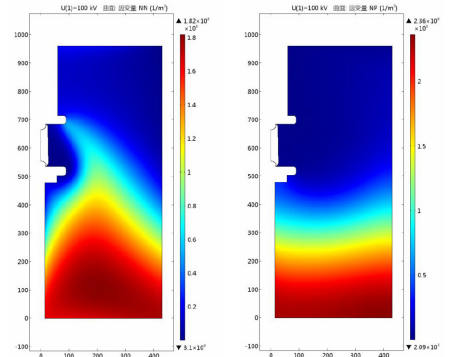
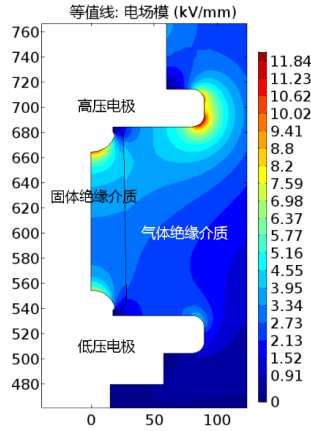


图 2. GIS 绝缘系统组件截面上的负离子(左)和正离子(右)的分布情况。

绝缘失效是 GIS 设备中的常见故障，严重制约了其在工程方面的应用。绝缘失效是一个复杂的物理问题，涉及了电场、温度场、结构等多个物理现象间的相互耦合。如果用实验来分析该问题，实验设计和测试都具有较大难度。此外，GIS 设备造价昂贵，导致每一次实验测试需要花费大量费用。平高集团的张博工程师表示，“仅以 1100kV 套管的测试为例，减少一次套管试验，可以节省加工及测试费用约 1000 万元。”为减少研发成本，同时提高研发效率，平高集团开始使用 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件对 GIS 设备的绝缘问题进行分析。

平高集团的工程师在 COMSOL 多物理场仿真软件中创建了适用于直流 GIS 气固绝缘电场分布和表面电荷积累计算的数值模型。如图 1 的左图所示，模型由高压电极、低压电极、绝缘子和金属嵌件组成，这些组件放置在绝对压力为 0.4 MPa 的 SF₆ 气体中，通过将 100 kV 高压电源加载至高压电极形成直流电场。研究团队对电场分布情况进行了模拟，图 1 的右图显示了加载电压后气固绝缘介质中的电场分布。

对于固体绝缘介质来说，电荷密度取

决于材料介电常数和电导率。在气体区域，由于气体中正负离子在电场作用下的漂移以及浓度梯度造成的扩散，其电导率呈高度非线性。由于气固介质界面存在电导率及介电常数的不连续情况，电荷必然在边界积聚，从而畸变了原有的电场，减弱了直流电场下绝缘子的绝缘性能。

随后，工程师对绝缘体中的正负离子的浓度分布进行了模拟(图 2)，得到了气体区域内不同区间的粒子浓度分布，以及气体电导率的非均匀空间分布，为提升系统绝缘效果提供了有力支持。

根据电导率仿真结果，工程师获得了表面电位和表面电荷随加压时间的变化(图 3)。可以看出随时间推移，电荷积聚增

多，在 10⁷ 秒(约 3000 小时)后达到稳定。

工程师根据上述仿真结果，进一步研究气体离子对产生率、固体绝缘介质体积和表面电导率对表面电荷极性和分布的影响规律。该研究将有助于通过减小关键区域电场和最小化局部表面电荷累积来改善 GIS 的绝缘设计，优化绝缘子的几何形状和材料特性，以及相关的验证设计变更。

仿真助力 GIS 设备的优化

温度控制是 GIS 优化工作中另一个需要重点关注的问题。GIS 设备在运行过程中，由于电流通过母线时会产生大量的焦耳热，造成内部温度升高，进而可能引起内

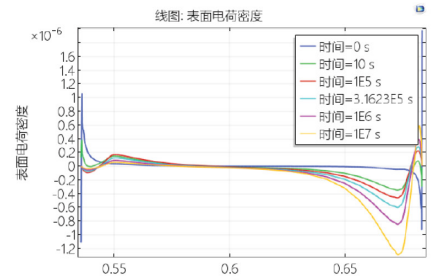
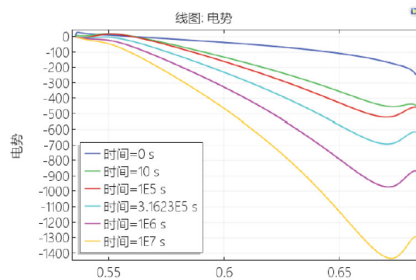


图 3. 绝缘子表面电位(左)和电荷密度(右)随时间的变化。

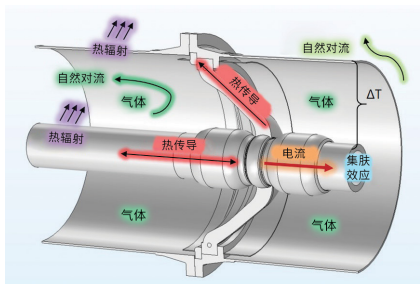


图 4. GIS 中母线传热仿真模型结构示意图。
图注：gas - 气体

部各类组件的过热故障。针对母线温升及散热性能的优化是提升 GIS 设备性能的有效手段。

平高集团的研发团队在 COMSOL 软件中建立了模型,用于研究 GIS 中母线的温度变化(如图 4 所示)。仿真模型中考虑了传导、对流和辐射三种散热模式,可以根据设备中的电阻热以及设备的散热情况,计算出设备在稳态运行时的内部温度分布。

温升仿真结果可以帮助产品研发人员在 GIS 设计阶段实现准确预估产品在运行过程中的温升状况,进而优化材料类型、产品尺寸、结构布局等多项参数,避免 GIS 设备因温升问题造成的各类过热故障。

⇒ 让整个企业受益于仿真分析的强大力量

平高集团的 GIS 产品设计人员在研发过程中经常需要调整设计参数,因此会求助于团队内的仿真工程师。即便是一个常用参数的调整,仿真工程师也需要针对每一个需求调整底层模型的设置,这造成了大量的重复工作,时常导致仿真分析结果的延误。

为了提升仿真分析的效率,平高集团的工程师使用 COMSOL 软件中的 App 开发功能,将 GIS 温升模型封装成了仿真

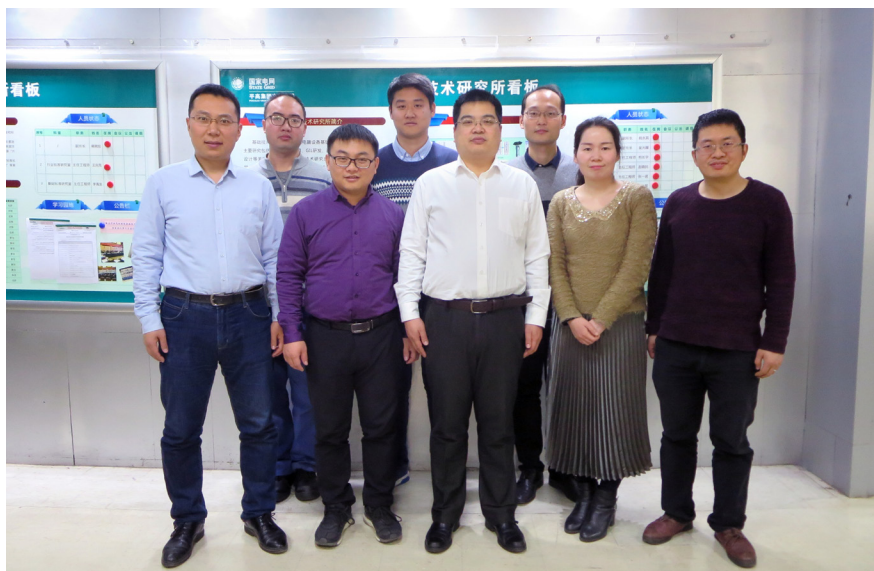
App。所有设计人员都可以利用图 5 所示的仿真 App 方便地计算不同参数带来的功率和温度变化,并使用分析结果对产品进行优化。现在,平高集团的产品设计人员、工程设计人员和运维服务人员都可以借助简单易用的仿真 App 进行 GIS 的开发和维护工作,为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。张博表示:“仿真 App 的出现,

极大地促进了经验的传承和知识的分享,现在整个企业都可以受益于仿真分析带来的优势。”

目前,平高集团正在开展基于云计算的高压开关仿真 App 开发研究。平高集团的仿真团队希望能够通过更加深入地开展高压开关多物理场仿真研究,帮助产品设计人员研发出性能更优的 GIS 产品。❖



图 5. GIS 温升仿真 App。



平高集团技术中心的仿真团队,从左到右依次为:张豪、王刚、王之军、刘亚培、郭煜敬、张博、郝相羽、姚永其