

介电应力仿真助力 ABB 智能电网分接开关的设计

ABB 的新型有载分接开关在田纳西州阿拉莫进行设计，这是电力行业同类设备中最快、最可靠的一款。强大的仿真技术和严格的测试有利于更高效地为市场提供安全可靠的开关。

作者：EDWARD BROWN

为 什么需要电源控制？对于任何电源，输出电压都会随着负载电流的升高而降低。对于低功率电源，电子器件可以自动调节这一过程；但对于几千千瓦量级的功率，需要不同的控制方法。在各种电源向电网送电的情况下，电压之间的不一致会破坏稳定性。电力消费者依靠稳定的电压，才能使电气设备可以正常工作。由于对能效的要求不断提高，调控市电的市场正在不断扩大。变压器是提供可靠和高成本效益配电的关键因素，因此有大量的工程正投入于将这些组件改造成支持智能电网。ABB 在田纳西州阿拉莫的变压器组件专家在其高功率测试实验室进行了详细的静电仿真和设计验证，以开发出全球最快、最精确的分接开关。

分接切换

极大功率应用中采用的控制技术为分接切换。它产生于这样一种事实，即为了最大程度降低电线的电阻损耗，电压需要升至数百千伏，然后通过变电站变压器进行降压，供消费者使用。输出电压与输入电压之比等于次级线圈匝数与初级线圈匝数之比。分接开关通过切换输入或输出电路的连接点（即，改变次级线圈匝数与初级线圈匝数之比）来改变该比率。自 1910 年以来，



ABB 的田纳西州阿拉莫设施中的真空电抗式负载分接开关。

ABB 就一直在制造分接开关，用以控制大量的电力传输。Bill Teising 是 ABB 在阿拉莫的研究和开发工程主管，正带领着一组研究人员使用现代化技术来改造这种令人惊叹的设备。谈到该团队的新型真空电抗式有载分接开关 (VRLTC™)，Teising 说：“‘切换’是个老概念，但将其应用于设计、操作和监视 VRLTC 的机电一体化则是全新的技术”。

分接开关内部

VRLTC 由三个主要组件构成。第一个是实际的分接切换组件：开关和真空断流器。第二个是操控这些组件的军规级数字伺服电机驱动系统。使用伺服驱动系统使 VRLTC 可以无需机械制动，以高于每秒一次分接切换的速度工作。通过提供极高的分接切换速度，VRLTC 可以为关键的需求响应型应用提供快速的电压调控。最后一个组件包括专有的分接逻辑

“‘切换’是个老概念，但将其应用于设计、操作和监视 VRLTC 的机电一体化则是全新的技术。”

监视系统 (Tap Logic Monitoring System, TLMS™) 和多圈绝对值编码器。TLMS 用于指挥、监视和控制整个分接切换操作。多圈绝对值编码器用于为 TLMS 提供角位置数据，从而可以免去不可靠的凸轮开关。带有抽头线圈的高电压变压器被安置在充满变压器油的箱体中，变压器油同时提供高电压绝缘和冷却的作用。VRLTC 分接切换机构装在一个充油小钢罐中，通过焊接或螺栓固定到变压器箱上。模塑环氧树脂隔板中具有一端连接到变压器分接头、另一端连接到切换机构的电极。VRLTC 的真空灭弧室用于中断负载电流，使选择器机构可以移到下一个分接位置。

在传统的有载分接开关中，在没有真空断流器的情况下进行切换会导致在油中产生电弧。



图 1: VRLTC 正视图。选择器装配配件安装在 G10 分隔板后面。

电弧产生的副产物会使油质劣化，增加额外的维护要求。在 VRLTC 中，电弧电流被限制在真空断流器中。

其结果是，VRLTC 可以执行 500,000 次分接切换，之后才需要进行检查。图 1 显示了 VRLTC 的正面。

分接开关绝缘仿真

有一项重要创新容易被忽视，但也许是最重要的。容纳连接电极的环氧树脂阻隔板和容纳开关与真空断流器的 G10 玻璃纤维增强型环氧树脂层压板需要不间断地承受数千伏的电压。不能让这些介质材料发生劣化：这些绝缘材料承受高电压的能力会严重影响分接开关的寿命。虽然可能不会立即发生问题，但绝缘材料可能会随着时间的推移而劣化。对于固体

绝缘材料，存在两种不同的破坏模式：穿透材料的分解，这称为刺穿或击穿；以及沿绝缘材料表面的分解，这称为蠕变。表面破坏可能需要一段时间，伴随着一种称为树枝化的现象，您可以看到沿着表面形成裂痕，最终导致介质破坏。通过设计防止此类破坏模式是非常困难的。传统方法采用了一组经验法则，在绝缘材料厚度和组件间距方面采用了过度防护。即使如此，未来的行为仍难以预测。一种更严谨的高电压设计方法是通过仿真来计算绝缘材料表面和内部的介电应力。与绝缘体接触的导体之间的电势会在绝缘体材料（介质）中产生电场。任意给定位置的电场强度是电压差大小和结构几何形状的函数。每种介质材料都有最大承载能力，超出它时将会发生破坏——它会开始传导电流。这称为材料的电介质强度。VRLTC 设计团队通过在 Creo™ Parametric 中构造几何模型，然后将它导入 COMSOL Multiphysics 来解决介质应力问题。然后，研究人员可以定义电势和介质属性，并运行迭代

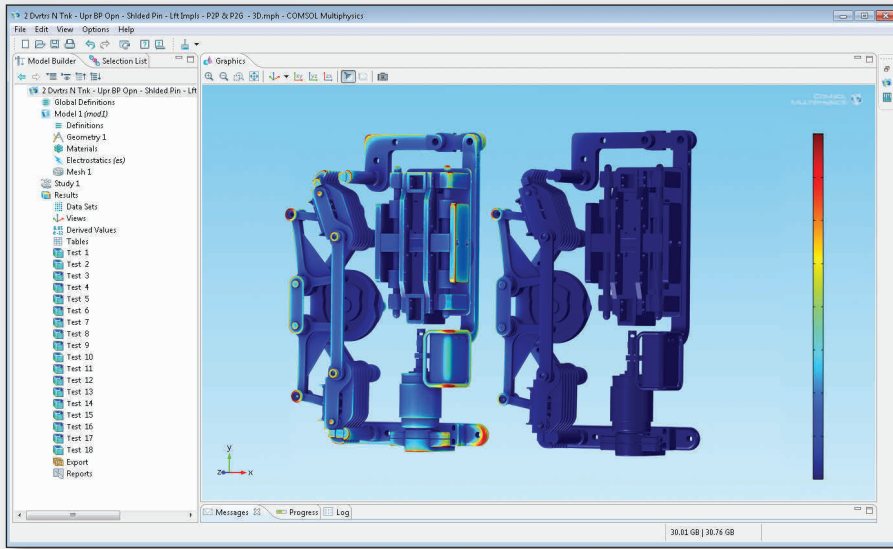


图 2：使用 COMSOL Multiphysics，在两个相邻相上施加电压时，旁路开关（处于开路位置）和真空断路器装配体的介电应力仿真。右边的装配体设置为接地。

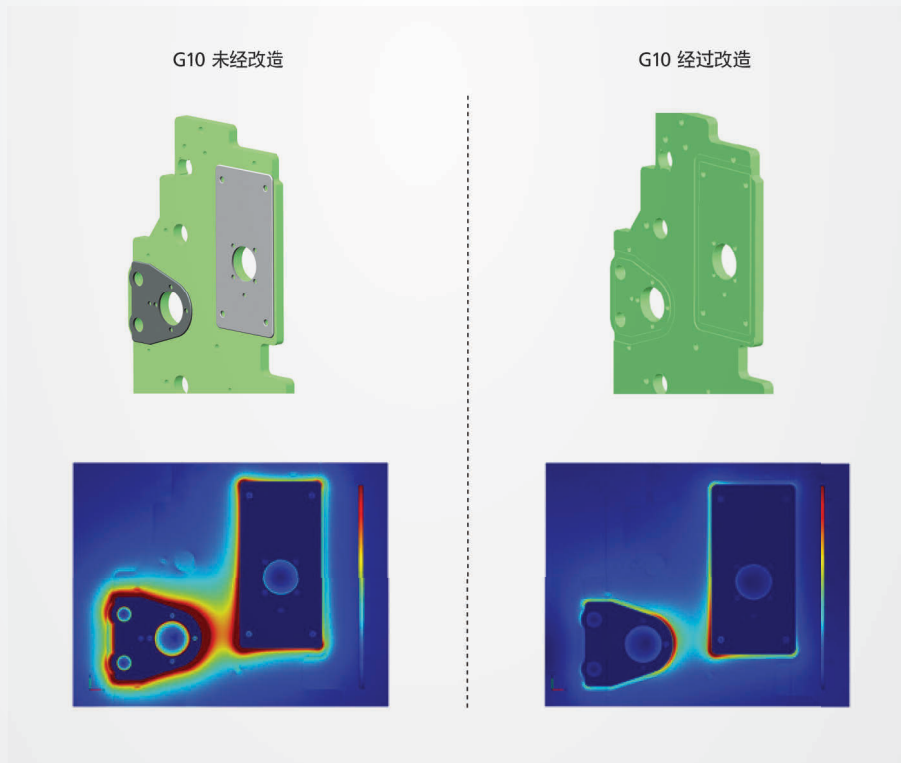


图 3：带有用于切换装配件固定片的 G10 板的介质应力仿真。在分接切换期间，固定片之间会存在高电压。仿真图显示了 G10 板进行几何改造和未进行改造的结果。这些改造可以显著降低板上的介电应力，如右边的仿真所示。

仿真来显示电压应力在整个电介质中的模式和大小。可以将仿真结果与他们长期研制的分接开关中获得的介电应力信息进行比较，从而精确地预测 VRLTC 的工作寿命。起初在处理大型 CAD 装配体（在此例中超过 500 个配件）时，对团队提出了挑战。如何分析此类复杂的几何结构？他们在 LiveLink™ for Creo™ Parametric 中找到了所要寻找的工具。通过其双向链接功能，他们可以将 Creo Parametric 中的几何数据信息，无缝同步到 COMSOL 中的相应几何，然后生成网格。在检查网格剖分的结果之后，他们可以回到 Creo Parametric，直接在其中对几何进行适当的更改。经过几次调试之后，他们获得了能在功能强大的工作站上进行大规模批量仿真时使用的高质量网格。“LiveLink™ for Creo™ Parametric 让我们可以将大型 CAD 装配体无缝导入 COMSOL 进行分析，从而显著减少整体的仿真设置时间。” Teising 说。在 COMSOL Multiphysics 中导入分接开关几何之后，着重点变为介电应力仿真（见图 2、3 和 4）。他们研究了许多不同的装配体，包括终端基板、轴传动锥齿轮、分接选择器、旁路开关和真空断路器装配体。仿真确认了几何设计和组件装配体之间间距的重要性。“通过运行这些大型仿真，我们可以快速直观地显示几何变化对三维空间中电场大小的影响”，Teising 说。

“在 COMSOL Multiphysics 中，我们采用增大测试电压来确定介质分解临界值”，Teising 说，“然后，根据 ABB 内部关于允许的短期和长期蠕变与击穿场大小的介质设计规则，对这些仿真结果进行评估。Tommy Larsson 和 ABB 在瑞典卢德维卡的介质专家团队制定了这些设计规则，以建立 LTC 产品安全和可靠性标准。COMSOL 是连接卢德维卡和阿拉莫设计团队的共同仿真平台，使他

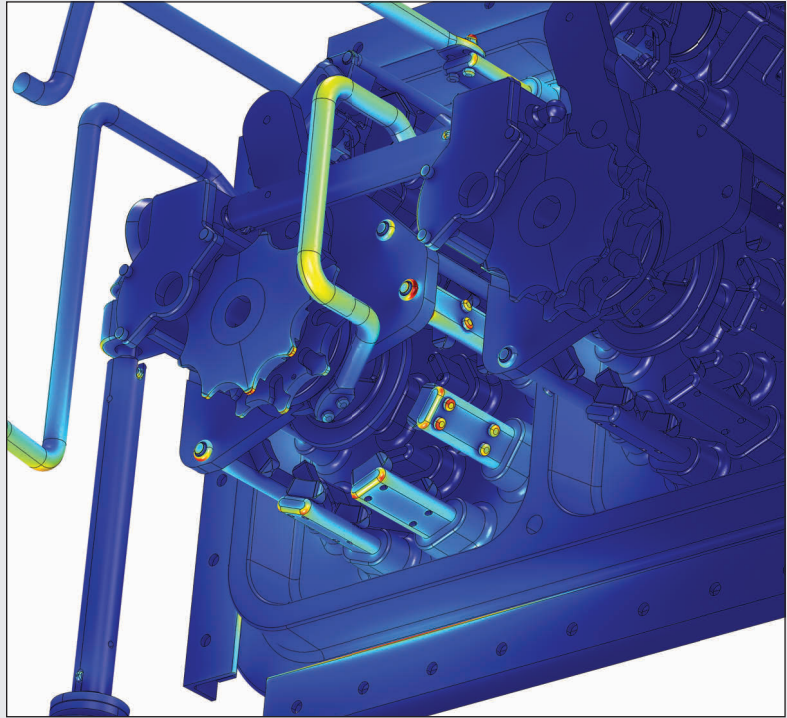
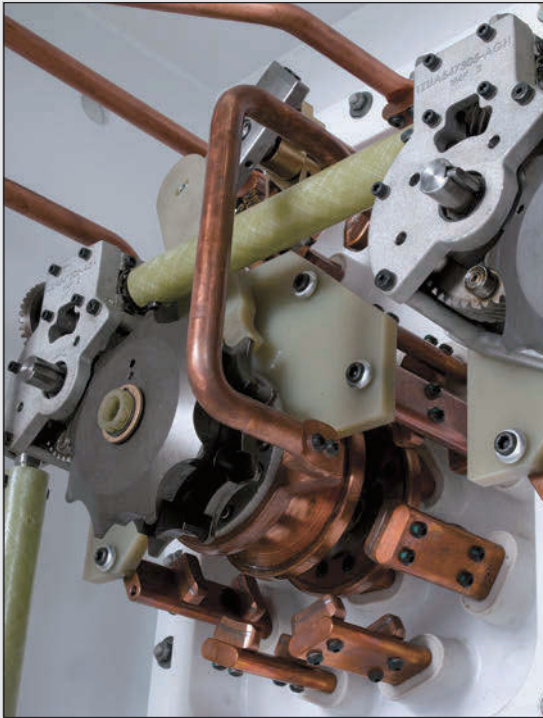


图 4：上面的照片显示了选择器装配件。可视化图显示了在两个相邻部位上施加电压时，选择器机构的介电应力仿真。

们可以在整个 ABB LTC 产品组合中一致地应用这些规则。几何设计不断进行调试，直到 COMSOL 的结果达到或超过 ABB 内部设计要求。然后，在高电压实验室中执行电介质测试，以确定设计的电介质性能的上限。这使我们可以将实际雷电冲击与仿真的 1 分钟、60 Hz 高电压测试结果进行比较。该数据的相关性使我们确信，COMSOL 提供的结果与测试相符。这让我们相信，我们可以依赖 COMSOL 结果，实现对产品的寿命预测。”

结果

通过使用 COMSOL 仿真，ABB 研究团队能够开发出基于实际现场条件下精确计算结果的分接开关。通过仿真实现优化设计，使设备可以经济可靠地工作三十多年，执行 100 万次操作。



VRLTC 型分接开关设计团队。从左到右：Tommi Paananen（设计工程师）、David Geibel（工程经理）、Bill Teising（开发工程主管）。不在照片中的设计工程师：Mårten Almkvist、Jon Brasher、Josh Elder、Bob Elick 和 Chris Whitten。