

变压器与电抗器设计

——仿真推进电力变压器与并联电抗器的更新换代

变压器是电网中最重要的部件, 为满足当今社会对电力的需求, 变压器设计师将目光转向了计算机建模。

作者 **DEXTER JOHNSON**

在位于圣保罗州容迪亚伊市的西门子巴西分公司, 设计师们正在运用仿真确保电力变压器和并联电抗器的运行安全。在这之前, 公司设计团队成员一直在使用内部研发工具, 仿真工作的加入, 让他们在面对不断增加的电力需求时, 能够更加游刃有余地控制设备过热问题。

并联电抗器用于吸收无功功率, 提高传输系统的能效(图1)。电力变压器则通过将电力从一个电压转换到另一个电压, 有效地输送电力。这两种设备都可用于电网中从发电到配电给最终用户的各个阶段。不断发展的城市对电力的需求越来越大, 因此就需要建造更大型的设备来满足这些需求。但有时会有很多限制性的因素导致设备不能建造地太大, 比如运输时存在困难, 再比如客户工厂中放置设备的空间有限。

在不增加设备尺寸的情况下, 要得到更多的电不仅会给设备增加额外负荷, 也会增加热量损耗, 导致设备温度上升。虽然这些设备的主要部件(芯部和绕组)的设计方式已经很完善, 但次要部件(结构件)的设计结构并不十分明确, 需要进一步地研究。如果设计不精细, 设备就会有过热的危险, 最终有可能导致变压器绝缘油性能退化。

克服感应加热问题

西门子采用了COMSOL® 仿真软件来解决这些设计限制, 控制金属零件的感应加热。感应加热是处在变化的电磁场中的导体会发热的一种现象, 因为变化的磁场会在导体内部产生涡电流, 由于电阻的存在, 涡电流会导致材料产生焦耳热。

感应加热时导体中一些小区域的感应电流密度会非常高, 通常称这些区域为“热点”。通过对感应加热过程建模, 西门子的设计师消除了设备中的“热点”, 有效避免了设备出现高

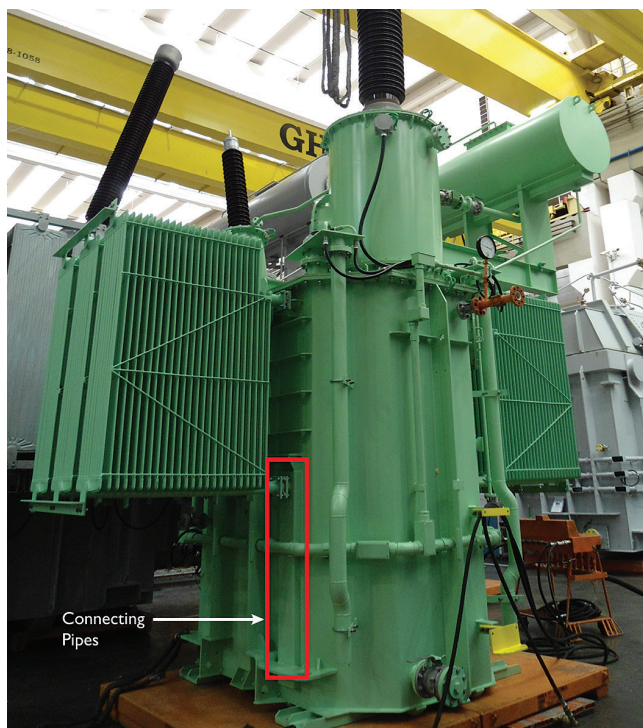


图1. 并联电抗器。电抗器外焊接着矩形盒子, 盒内有管道与电抗器箱体相连接, 在最初的油路设计中, 散热器就是通过这些管道与电抗器箱体相连。图注: Connecting Pipes - 连接管

温的情况。受变压器几何结构和材料的复杂性所限, 完全避免这些热点是非常困难的。油浸式变压器中的绝缘油是一种非常有效的电绝缘体, 同时还起着冷却液的作用。然而, 热点会导致绝缘油过热, 产生气泡。与绝缘油相比, 这些气泡的介电强度更小, 可能会引起放电现象, 因此存在损坏变压器的风险。

“我们可以利用COMSOL软件对这种行为进行仿真, 并对变压器设计提出修改建议, 以减少结构件的感应加热。”西门子高级产品开发人员Luiz Jovelli表示说。

在感应加热的仿真工作中, 西门子采用了COMSOL Multiphysics® 和AC/DC模块。仿真工作让设计团队作出的第一个改变是, 更改了金属结构的设计。例如, 改变并联电抗器原有的夹架结构(图2上), 使得该区域的油循环效果得到改善, 减少了感应加热, 并提高了冷却效果。这一结构变化带来的结果是, 热点的最高温度降低了约40°C。这样一来就不再需要在夹架上安装铜屏蔽, 从而节省了材料成本(图2下和图3)。

由于Jovelli及其同事与

COMSOL 一起进行了仿真工作, 因此他们能够对这些设备的设计提出多个改进建议。

“有时候设备的制冷装置可能会非常大, 因此整个设计中会无法避免地出现一些热点,” Jovelli 表示说。

“借助 COMSOL, 我们能够控制这些热点。” Jovelli 注意到, 这么微小的一个改变, 居然能够解决感应加热问题, 同时还能降低与制冷装置相关的成本。

“COMSOL 是一个强大的建模和仿真软件,” Jovelli 表示说, “我们可以通过对其进行数值实验来提高计算的准确性。它同时也帮助我们战胜失败。我们可以快速完成设计检测, 从而保证设备在服役期的性能。”

更高效地冷却芯核

从热的角度来看, 并联电抗器的芯核相对于其绕组的热损耗要高于电力变压器, 也就是说, 电抗器的芯核损耗与绕组损耗之比高于变压器, 因此可能会产生过热。所以设计方案必须保证芯核的有效冷却 (图 4)。

在此情况下, 西门子仿真了并联电抗器内的油循环和热传递, 以此了解绝缘油的性能, 并提出了一个优化设计方案。在新的设计中做了一个微小的调整, 使得芯核的冷却效果不仅得到了提高, 结构也比之前更加简洁, 因

而不仅能够减少维护工时, 还可以节省材料。

另一处变化是针对焊接在电抗器箱体上的管道 (图 1)。

新方案中将设计更改为图 5 所示, 减少了材料的用量并降低了制造成本, 同时还改善了电抗器箱底的油分布。

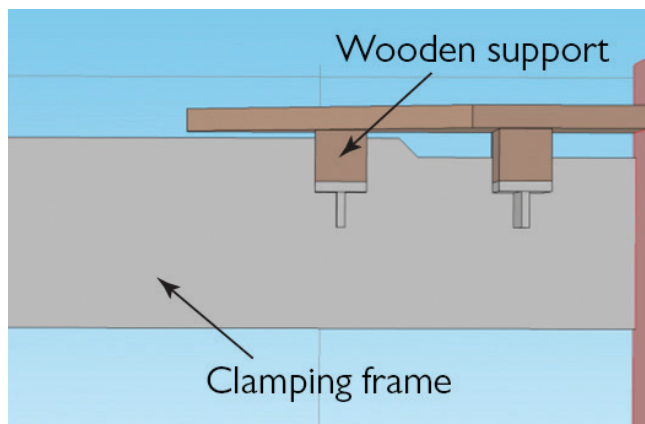


图 2. 上图: 最初带铜屏蔽的夹架设计。下图: 使用更少材料的优化后的夹架设计。图注: Wooden support - 木支架; Clamping frame - 夹架

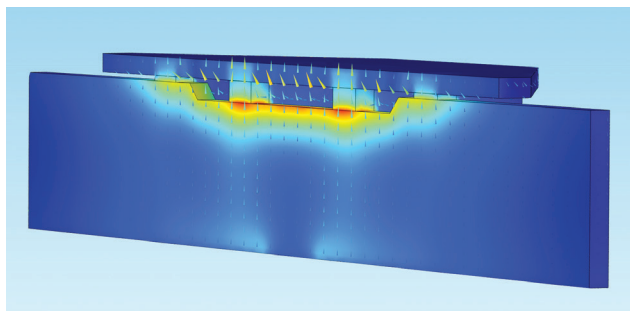


图 3. 夹架的优化设计 (后视图) 图中显示了温度 (面图) 和油流场 (箭头)。

将一维、二维和三维模型耦合到一个全油路仿真中

Jovelli 及其同事也对电力变压器内部绝缘油自由对流的三维热工水力行为进行了建模 (图 4)。在对变压器的流体动力学 (CFD) 进行仿真时, 需要将变压器的所有部件表示为三维模型, 因此通常对计算能力有很高的要求。

COMSOL 软件允许研发人员将变压器中的管道或通道简化为一维模型进行高效仿真。这样做的一个特别优势就在于, 可以将管道和通道的一维模型与大型实体的二维和三维模型进行无缝耦合。

“如果要对整个变压器油电路大量细节部位进行逼真的三维流体动力学仿真, 就需要大量的计算机资源。” Jovelli 解释说。 “因此有时候根据研究目标的不同, 必须对某些细节进行简化, 因此得到的结果不会太可靠。但借助 COMSOL 软件, 我们可以轻而易举地将任何物理量的一维、二维、二维轴对称和三维模型耦合在一起, 在一个平台上开展仿真工作, 从而保证得到的结果非常可靠。”

利用 COMSOL 软件将数据从边界 (一维) 耦合进表面 (二维和二维轴对称) 和体积

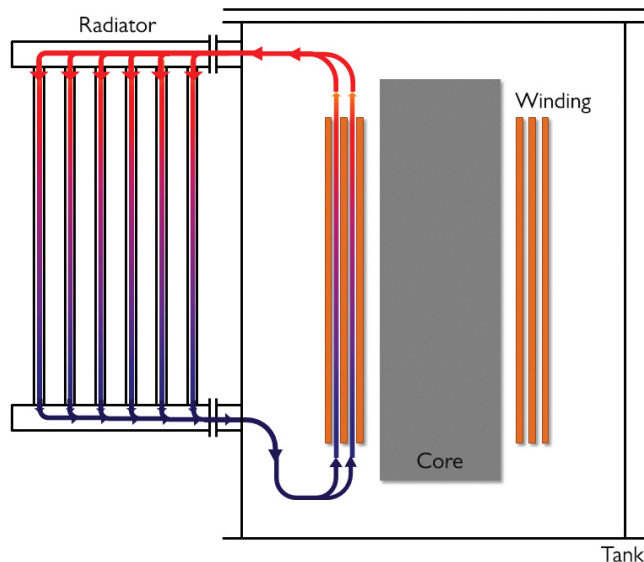


图4. 并联电抗器和电力变压器的新型油路设计原理图。图注：Radiator - 散热器；Winding - 线圈；Core - 芯核；Tank - 水槽

（三维）的独特能力，Jovelli 能够使用二维轴对称模型对变压器绕组进行建模。此外，变压器箱体和进出口管道都采用了三维建模，换热器采用了一维建模。硅钢芯也是一种热源，对其采用了三维建模。由于变压器硅钢芯是由硅钢薄片组成的，因此其各向异性的热性能也被考虑在内。

多物理方法推动现实结果

对 Jovelli 及其同事来

说，COMSOL 由于具备多物理场特性，从而可以对设备进行更真实的仿真。

“将物理场结合起来的能力，使我们能够以一种高效计算方式，对现实世界的物理场进行精确建模。”

Jovelli 和西门子研发经理 Glauco Cangane 表示说。

“通过使用 COMSOL 并运用其多物理场耦合的能力，西门子建立了世界首个真正的 3D 变压器模型。甚至我们也许是有史以来首家成就此番事业的变压器制造商。”

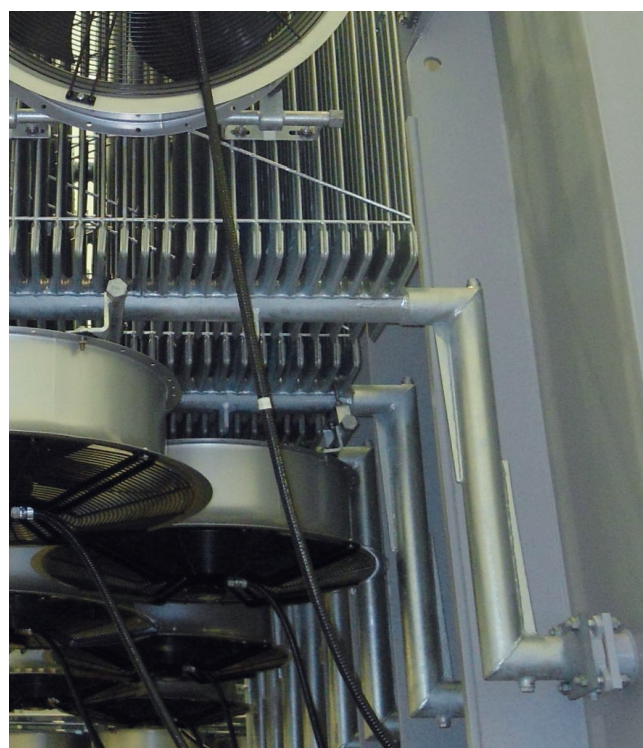
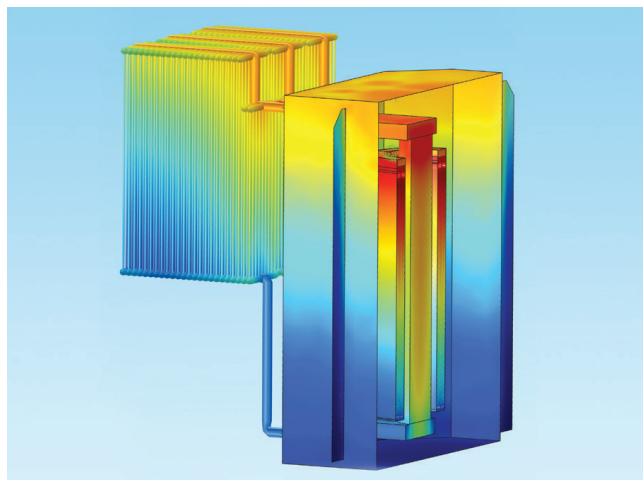


图5. 上图：新型集水管的热流体动力学仿真。下图：新型集水管设计。在新的设计中，管道由原来环绕在电抗器外部，变为直接从冷却风扇进入电抗器中。

通过使用 COMSOL 并运用其多物理场耦合的能力，西门子建立了世界首个真正的 3D 变压器模型。

—— 西门子高级产品开发人员 LUIZ JOVELLI 以及西门子研发经理 GLAUCO CANGANE