

ABB 公司使用多物理场仿真优化变压器和传感器设计

为了保障电网免受系统故障的影响，ABB 公司通过多物理场仿真设计了可以承受快速瞬态过电压，及可用于地下电力系统的潜水型钳式传感器。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

停电有时会持续数小时、数天、数周甚至数月，无论停电时间持续多久，都可能会令人感到沮丧或造成混乱。在极端炎热或寒冷的天气，停电甚至会带来危险。为了保障电网的稳定性、安全性和财务可行性，ABB 公司使用多物理场仿真和仿真 App 对变压器和传感器设计进行优化。

» 互感器保障电网安全

仪用变压器 (Instrument Transformers) 又称互感器，是一种专业的高精度变压器，通过隔离、转换或降低高电压和大电流，最大程度地提高系统的安全性和可用性。互感器由连接高电压或大电流的初级线圈，和连接低电压或小电流的次级线圈组成。由互感器构成的仪表和继电器可用于监测、保护和控制电力系统。

ABB 基于罗氏线圈 (Rogowski coil) 原理设计了一款电流传感器 (图 1)。罗氏线圈由均匀缠绕在非磁性

铁芯上的线圈组成，其输出电压与电流的导数成正比。在中等电压情况下，传感器使用电阻分压器和电容分压器测量电压。

近年来，互感器和传感器行业发展迅速。基于标准技术制造的传统互感器已有一百多年的历史，主要用于仪表和继电器。传统互感器由一个铁磁回路组成，能够将电力从初级线圈传输到次级线圈，输出电流为

1~5 A，输出电压为 120~240 V。采用先进技术制造的智能电子设备仅出现了二十年。与传统的由铁磁材料制成的互感器不同，新型互感器由固态元件组成，由于其无法将电力从初级

线圈传输到次级线圈，因此能量输出较低。新型互感器 (如线型变压器) 适用于各种室内和户外环境 (例如空气或真空)。

ABB 的研发工程师 Nirmal Paudel 表示：“智能电子设备使用更加安全、用途更加广泛。它对各种输入信号都具有线性响应，并且与当今的电子设备和用户操作习惯相匹配”。

» 互感器的多物理场仿真设计

设计互感器时，必须考虑多物理场，这是设计的关键。一个成功的互感器设计应该包含焦耳热和感应加热、电感和电容耦合、磁饱和以及磁致伸缩等现象，同时还需要考虑流体流动、对流冷却、热膨胀、外部载荷和电路、噪声与振动，以及集肤效应等现象 (图 2)。

为了解决多物理场耦合问题，ABB 公司使用了 COMSOL Multiphysics® 软件进行模拟。他们模拟了在基本脉



图 1 基于罗氏线圈原理制作的传感器。

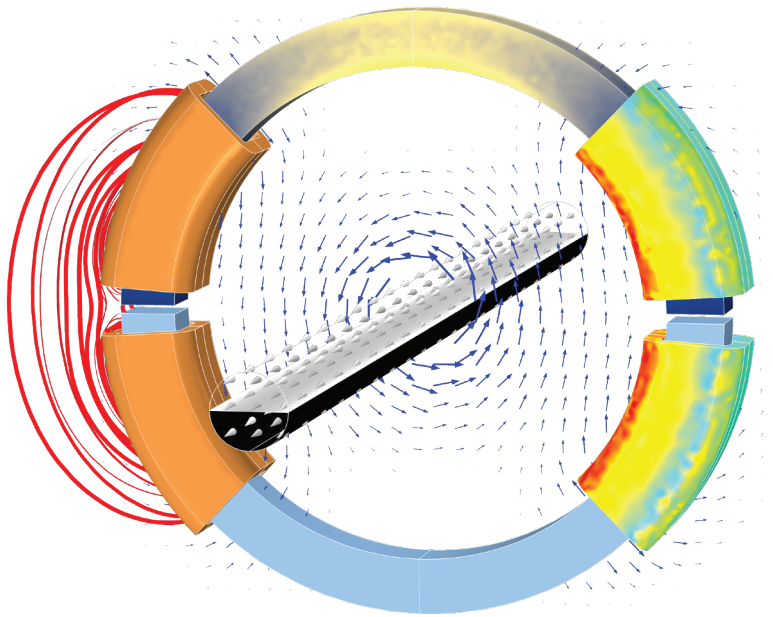


图2 互感器仿真设计中的多物理场效应。

冲水平 (Basic Impulse Level) 下, 由环氧树脂铸件的空隙影响的互感器电场。根据模拟结果, 研究人员可以了解绝缘层和介电材料对设备的防护作用。

COMSOL 软件还可以执行热分析。如对于一个线性串联电压互感器,

通过仿真可以计算出其初级线圈和次级线圈中的磁芯损耗和电阻损耗。另一个实例是计算互感器外部边界上的热通量和底板上的固定温度。通过仿真设计, 不仅能够获取互感器的温度变化, 还能深入了解环氧树脂的热固化过程及其在模具中的流动。第三个实例

是结构分析。ABB 的团队通过仿真的方法计算了结构应力分布以优化互感器的几何结构 (图 3)。他们还考虑了设备和组件的应力和位移, 以便在 3D 打印测试 (或批量生产) 之前对原型进行优化。建模不仅有助于提前考查设备的性能, 还能确定设备结构的完整性。

» 瞬态现象的快速仿真

在例如真空断路器之类包含开关的电网设备中, 瞬态现象是需要考虑的重要因素。当开合引起瞬态现象时, 会给绝缘系统造成压力, 并在变压器的初级线圈中引起内部谐振。当瞬态过电压的分布变得高度非线性时, 会导致内部故障。由于新电网发电、载荷增加、线路特性以及开合过程, 可再生能源 (如风能) 附近的快速瞬态过电压 (Very Fast Transient Overvoltage, VFTO) 现象的发生频率会更高。VFTO 曲线的陡度 (即过电压分布的速度) 可以高达 $3 \text{ MV}/\mu\text{s}$, 该速度比闪电还要快 (通

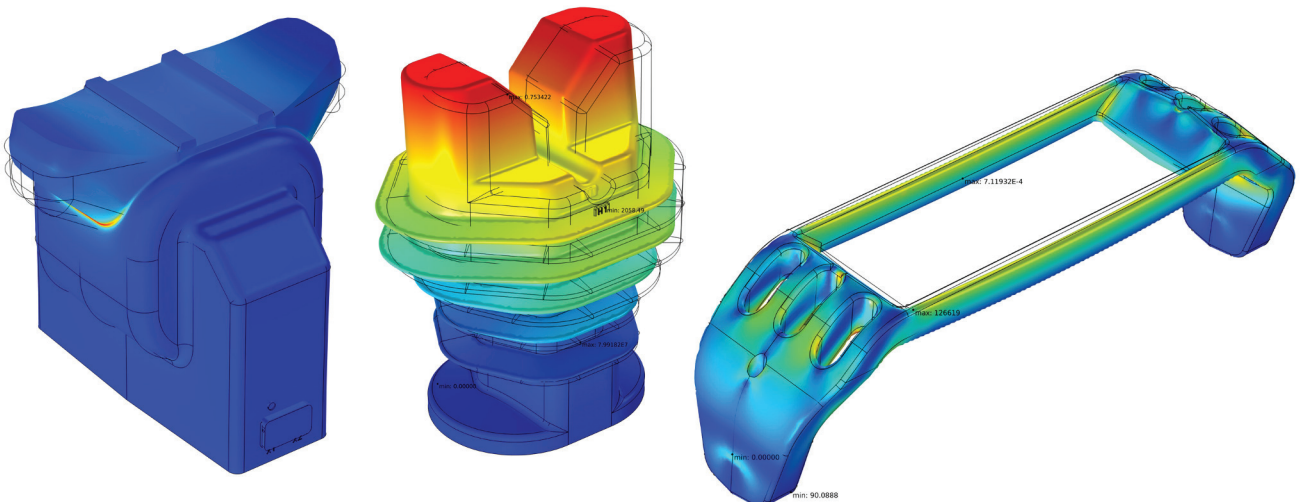


图3 使用结构模拟优化互感器的几何形状。

常突变会使绝缘系统崩溃)。

设计能够承受过高 VFTO 的传感器,需要在高频电压下对绕组进行大量的建模工作。而以前,几乎没有适合此类建模的软件。直到最近,ABB 公司与位于拉珀斯维尔的应用科学大学 (Hochschule für Technik) 合作,利用 COMSOL 软件对上述过程进行了模拟,并分析了互感器中电压的分布。他们发现新型设计和新的干燥绝缘材料可以减少 VFTO 对互感器的破坏。

» 钳式电流传感器的仿真设计

钳式结构是互感器设计中的一个重要特性。钳式互感器(传感器)可以进行电网维护而不受任何干扰。ABB 正在着手设计一种钳式电流传感器,用于高精度的电流测量。该互感器的转换过程由其他设备完成,并且通过智能电子设备来识别信号以评估转换需求。它具有防水功能,能浸入水中,并可以在地下使用(地下电缆已经成为行业标准,因为它们受到强风或恶劣天气的影响较小,尤其是在城市中)。钳式传感器的设计包括形状、尺寸、质量、线圈匝数、铁芯形状和铁芯尺寸等,因此具有一定的挑战(图 4)。此外,还存

“当钳式电流传感器等设备在任何条件下都能运行时,每个人都将受益。”

——NIRMAL PAUDEL, ABB 公司

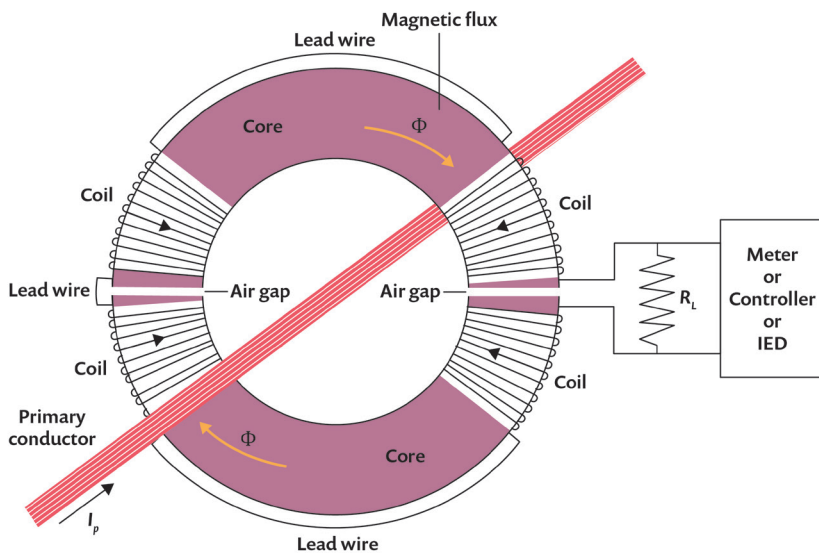


图 4 钳式电流传感器仿真模型。

图注:Coil - 线圈; Lead wire - 导线; Primary conductor - 初级导体; Meter or Controller or IED - 仪表、控制器或 IED; Magnetic flux - 磁通量; Core - 铁芯; Air gap - 气隙。

在电流串扰的风险,具体取决于设备的配置。最后,互感器在进行生产和使用测试之前其设计需要符合行业标准。“在实验室测试之前,互感器的设计必须满足各种 IEEE 和智能电子设备标准。” Paudel 说道。

为了在构建原型样机之前就能对钳式电流传感器进行优化,ABB 团队再次借助于 COMSOL 软件。Paudel 使用软件已经很长时间,并很喜欢其“容易使用的多种物理场接口,以及可以轻松耦合各种物理场”的特点。COMSOL 软件还内置了安培定律和麦克斯韦方程,可用于求解频域中的磁场(图 5)。由于线圈具有几何对称性,因此只需对线圈的 1/4 几何结构进行计算,以节省时间、精力和计算资源。建立一个特殊的线圈模型,需要将初级线圈

设置为实心导体,次级线圈设置为均匀缠绕的线圈;将磁场的切向分量和表面电流密度为零的区域作为理想磁导体的内部边界条件;将外部边界设置为磁绝缘体。软件内置的求解功能可以帮助团队轻松调整实心导体与均质导体,以及实心导体与电线之间的设置。

» 仿真 App 减少设计时间

在互感器设计中,由于非线性磁化曲线(B-H 曲线,直流磁化)和等效 H-B 曲线之间的转换通常比较耗时。因此,ABB 团队使用了 COMSOL 软件案例库中的仿真 App 来执行这些计算。在仿真 App 中找到等效 H-B 曲线后,他们使用该数值对钳式电流传感器的磁芯进行了建模。仿真结果表明,磁通密度的降低导致整个磁芯的磁导

率几乎是线性的。因此, 研究小组认为应使用均质的各向异性电导率和磁导率。

通过观察磁通量和电流密度的仿真结果, ABB 团队发现他们设计的传感器的磁通量非常小, 适合测量中等电压。此外, 该团队还发现了一些有趣的现象。当次级线圈上的匝数增加时, 断路电压也会增加, 这与他们之前的一项研究结果吻合 (电压从 130 V 增至 196 V)。但是, 当次级线圈连接载荷时, 电压并不总是增加, 有时甚至会降低。

ABB 公司的最终设计目标是对钳式电流传感器设计查看不同配置下的三相串扰。他们发现串扰取决于次级线圈与初级线圈之间的距离。

» 设计流程与最终产品的优化

ABB 最终设计的潜水型钳式传感器最终达到了 IEEE 和智能电子设备的要求 (图 6)。当被问及他们未来的计划时, Paudel 表示, 他的团队正在致力于开发能推进 VFTO 和互感器分析的新工具。该工具能将分析时间从数周缩短至数天, 它可以借助 MATLAB®, 也可以通过 LiveLink™ for MATLAB® 接口与 COMSOL® 软件进行连接。他们的最终研究结果与最初的计划一致, 新工具的使用优化了 ABB 的工作流程和设计过程。目前, 他们正在努力优化该传感器以增加电网的适用性。当钳式电流传感器等设备可以在任何条件下运行时, 正如 Paudel 所说, “人人都将受益”。

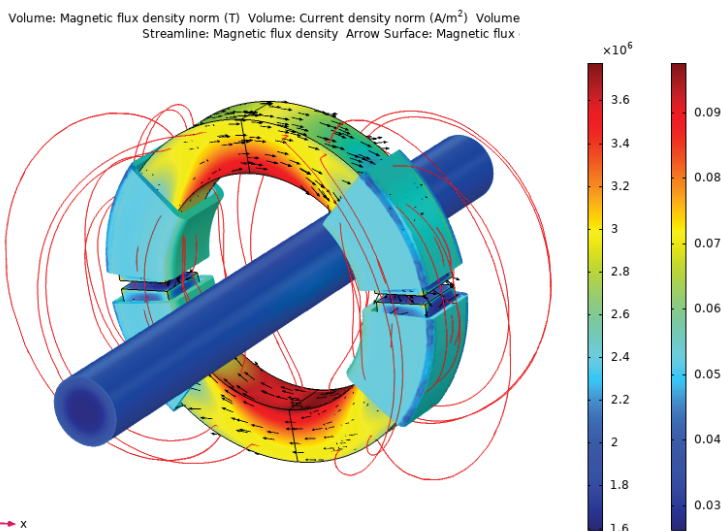


图 5 钳式传感器的磁通量和电流密度仿真结果。

“我喜欢 COMSOL 的易用性, 它在同一个界面集成了多个物理场接口, 可以轻松耦合多种物理场。”

— NIRMAL PAUDEL, ABB公司



图 6 潜水型钳式传感器。



ABB 团队, 从左至右: Vivek Siddharth, Steve Shaw, David Raschka 和 Nirmal Paudel。