

多物理场仿真为发电厂提供安全保障

瑞士 ABB 集团使用仿真技术提高发电机断路器的载流能力, 保护全球的发电厂免遭电涌破坏, 为不间断发电提供保障。

作者 ZACK CONRAD

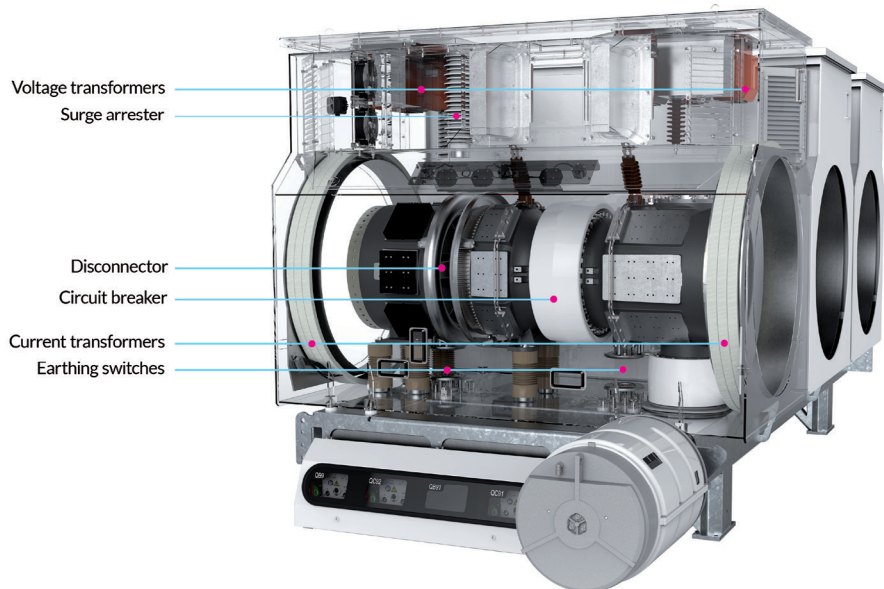


图 1. ABB 发电机断路器 (HEC10-210) 的内视图。图注: Voltage transformers - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Disconnecter - 隔离开关; Circuit breaker - 断路器; Current transformers - 电流互感器; Earthing switches - 接地开关; 图片来源: ABB。

发电厂是现代社会的支柱。发电系统的故障防护装置是其中不可或缺的重要部分。不管是核电、煤电还是水电, 发电厂都采用了同一种保险与防护措施: 发电机断路器(简称 GCB)。GCB 能够保护发电厂免受电涌的侵害, 在发电厂保护中起着关键作用。错误的布线或电网问题常会引起的短路故障电流具有潜在危害。即使是最小的故障, 也可能造成数百万美元的损失。而 GCB 能够在几十毫秒内切断电流, 保护重要的电力资产免遭损坏。ABB 集团在电气化产品、机器人、工业自动化和电网等多个领域都处于全球领先地位, 该集团研发的 GCB 被世界各地的发电站广泛采用, 为发电站的运行提供保护。

处理短路电涌的难点在于, 电网或发电机中出现这类电

流的时间完全是随机的。

基于这一原因, GCB 需要具备极高的可靠性和非同一般的有效性, 即使长时间处于休眠状态, 当电涌出现时, GCB 依然能够完美地完成。发电机正常运转时, GCB 只是电路中一个常规的低电阻零件, 用于连接发电机与变压器及电网。日常运行中以可靠的方式将产生的电能传输给高压输电系

统。但在紧急情况下, 它必须能够中断高于正常工况数倍的电流并将其消除, 从而保护其他元件不会受到损坏。

» 使用郁金香式接地开关实现系统接地

ABB 集团研发的 GCB 服务于全球数以千计的发电厂, 其使用寿命至少能达到 30 年, 因此能够为发电厂提供安全可靠的连接。但 ABB 的工程师 Francesco Agostini、Alberto Zanetti 和 Jean-Claude Mauroux 并不满足于现状, 他们认为只有不断改进现有设计, 才能跟上现代社会的需求。产品的升级版本研发完成后, 必须要经过大量的测试并满足相应标准才能进入商用。这些标准中有一部分是针对断路器系统中的关键安全组件——接地开关(图 2)提出的。Mauroux 解释说, 接地开关的任务是将系统的带电部分接地, 即与地面进行电串联, 同时也肩负着保护设备作业人员生命安全的责任, 所以不管处在多么恶劣的气候条件下, 接地开关都必须安全可靠。

接地开关的设计需要达到一种微妙的平衡状态。ABB 集团所采用的接地开关设计是知名的郁金香式结构: 由表面镀银的固定桩以及可滑动的触指构成。这种设计提供了一种可分离的连接方式, 既能使电流顺利传输通过, 又能保证弹簧对

TYPICAL SINGLE LINE DIAGRAM

1. Generator circuit breaker
2. Series disconnecter
3. Capacitors
4. Starting disconnecter for SFC
5. Manual short-circuit connection
6. Earthing switches
7. Current transformers
8. Potential transformers
9. Surge arresters
10. Motorized short-circuit connection

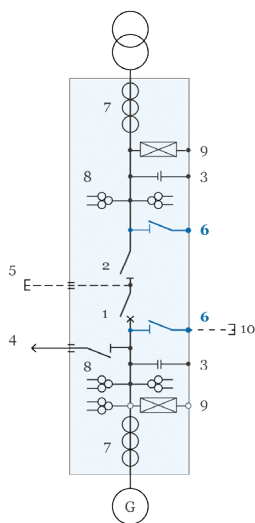


图 2. 典型的断路器系统单线图, 图中标注了接地开关的位置。图注: Generator circuit breaker - 发电机断路器; Series disconnecter - 串联隔离开关; Capacitor - 电容器; Starting disconnecter for SFC - 静态变频器 (SFC) 启动隔离开关; Manual short-circuit connection - 手动短路连接; Earthing switches - 接地开关; Current transformers - 电流互感器; Potential transformer - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Motorized short-circuit connection - 自动短路连接

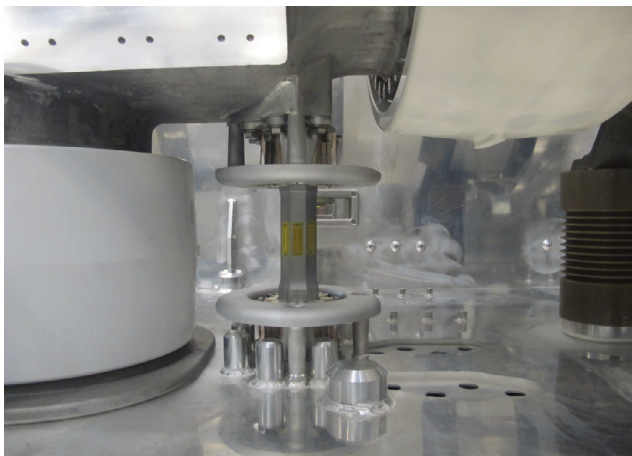


图 3. GCB 中处于闭合状态的接地开关。移动销连接了上下的郁金香式触头。图片来源: ABB。

每个触指施加静态压力。采用郁金香式结构主要出于两方面的考虑: 一方面, 根据国际电工委员会制定的标准, 触指闭合时, 接地开关必须能够承受短路故障时的全部电流 (图 3); 另一方面, 巨大

的短路电流会产生非常大的电磁力, 随之带来的负面影响必须得到控制。

尽管工程师们最终关注的是接地开关触头系统的载流能力, 但触头上的接触力会影响载流能力。为了解

“我们的设计轻松地通过了此类测试, 证明仿真和实验能够协同工作。”

—— Francesco Agostini, ABB 公司 GCB 技术开发与材料部负责人

触力对载流能力的复杂影响, Agostini, Zanetti 和 Mauroux 在多物理场仿真的帮助下对触头上的全部作用力进行了量化分析。他们利用 COMSOL 软件构建了一个接地开关的郁金香式触头模型, 借此模拟了触头上机电的耦合特性。

» 触指、磁场与作用力

郁金香式触头的触指将受到双重电磁力作用: 一种是由于接触位置存在电接触点而产生的霍尔姆力 (Holm force), 具有排斥作用; 另一种是洛伦兹力 (即载流体在磁场中所受到的力), 具有吸引作用。问题就在于要保证吸引力远远大于排斥力。如果触指之间的排斥力过大, 就会导致接触力减小, 从而可能造成触指分离。此时触头的电阻值会显著增加, 电阻损耗也会升高, 随之出现的情况是触头急剧升温。而高温可能将触头焊接在一起, 最终损坏 GCB 和接地开关。因此触头的接触力必须足够大。遵循洛伦兹定律所揭示的物理原理, 研究人员采用郁金香式触头从本质上解决了这一问题。焊接电流承载能力进一步证明了维持强大接触力的必要性。郁金香式结构设计在获得足够大的焊接电流承载能力和消除排斥电磁力方面起着至关重要的作用。因为能够承受很高的焊接电流, 所以郁金香式触头在消除大电流荷载时 (图 4), 并不会被焊接到一起, 从而确保了整个 GCB 结构在极端条件下能够安全可靠地运行。Mauroux 解释说, 郁金香式结构不仅仅是一种分离触头结构, 这种设计还能使平板弹簧向触指施加静态径向压力。这是因为洛伦兹力的增大有助于增加接触力, 从而达到更高的焊接电流承载能力。

计算触点上的总力需要耦合多种类型的物理场: 如电流在通过每个触指时, 都会产生磁场, 每个磁场又会对其他带电触指产生不同大小的作用力。借助多物理场仿真, 该团队利用多种方式对力进行了计算。计算结果的鲁棒性和可信度经过了实验的验证。团队基于断路器系统的对称性, 简化了模型, 只需模拟单个触指 (图 5 和图 6) 即可捕获整个郁金香式触头的特性, 从而将计算成本减少到全模型的 1/8。利用麦克斯韦应力张量公式, 研究人员计算了触指所受到的洛伦兹力。计算结果证实了触指受到的吸引力大于霍尔姆排斥力, 从而保证郁金香式设计可以有效防止触指分离。在此基础上,

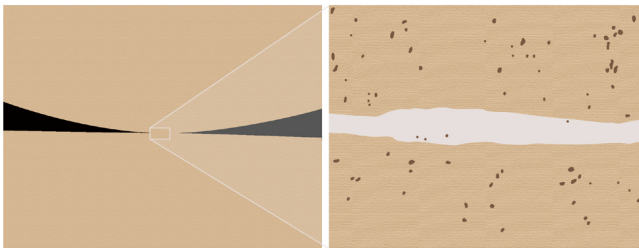


图 4. 焊接区域。左：焊接尖端(上)伸进销(下)的横截面。右：焊接区域局部放大图显示了用于形成合金的熔融金属的生成和凝固过程。图片来源:ABB。

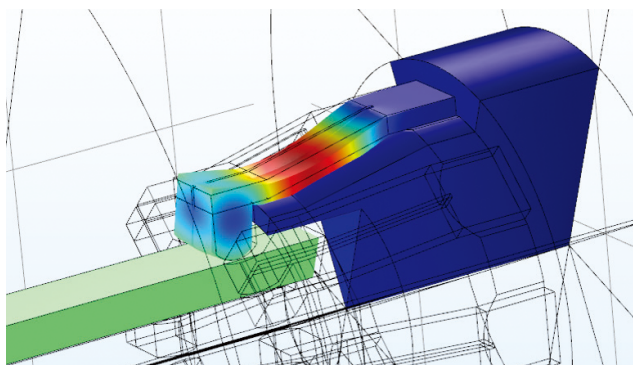
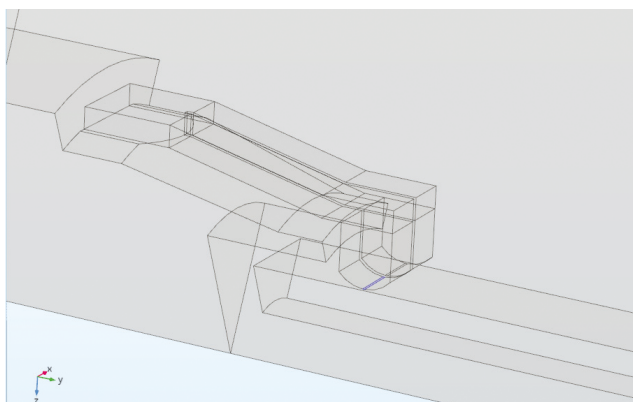


图 5. 上：触头的几何图形。下：郁金香式设计的单个触指的变形情况。图片来源:ABB。

研究人员利用模拟得到的合力数值，进一步计算出了理论焊接电流值，从而证明郁金香式断路器系统能够承受更大的焊接电流。

» 仿真与实验携手并进

完成仿真后，实际设计结果还需要经历多个测试流程。这些测试包括防止电

气故障的介电测试、机械耐久性测试和工作温度测试，还要经过最后一关，可能也是最重要的一关：KEMA 功率测试。这项测试会通过实验验证产品的理论电流值，从而确保产品符合国际电工委员会规定的载流量标准。为了确定焊接电流的测量值，测试人员对设计进行

了实物测量，他们将断路器开关暴露于类似发电厂的环境中，只有可传输的峰值电流超过 500kA 的开关才能获得认证。“我们的设计轻松地通过了此类测试，证明仿真和实验能够协同工作。”Agostini 说道，“COMSOL 软件是一款可以与实证检验强强联合的优秀工具。我们能够在直观的用户界面中有序地添加不同的物理场。”

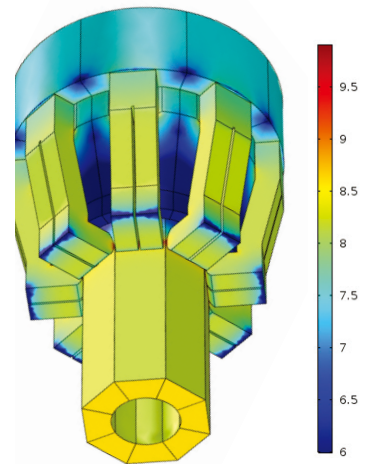
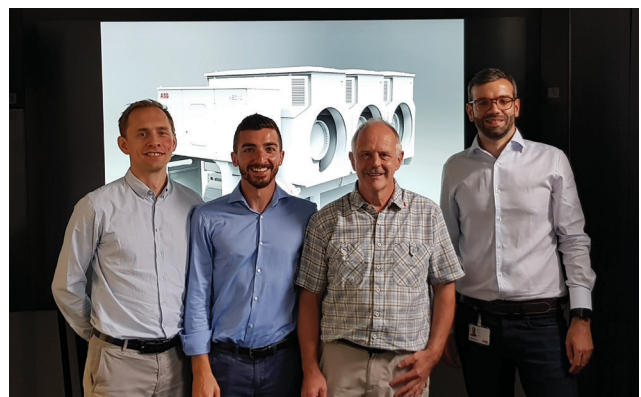


图 6. 郁金香式触头的电流密度对数分布情况。图片来源:ABB。

» 完整的电-热-力学模型

团队的最终目标是创建一个完整的电-热-力学模型，从而模拟更复杂的结构设计，全面理解接地开关中的物理特性。他们还计划详细分析触头焊接机制背后的物理与化学过程。Mauroux 表示：“材料选择和改进方面的持续进步，是提高产品性能和可靠性的根基。仿真工具变得越来越成熟，应用也将越来越广泛。我们相信，即使未来面对的模拟场景更为复杂，COMSOL 也一定能够胜任各种挑战。”



从左到右：Markus Bujotzek, GCB 技术经理；Francesco Agostini, GCB 技术开发与材料部负责人；Jean Claude Mauroux, GCB 技术开发部首席工程师；Alberto Zanetti, 材料研发工程师。