

英国国家电网 模拟地下电缆线路

文/COMSOL公司

当住户高兴地为新购的娱乐设备或厨房电器接通电源时，问他们对家庭用电有何期望，答案很可能会包含这几个词汇：安全、可靠和便宜。

对电网运营者来说，管理电网意味着要满足全天候的用电需求，要将电网电压和频率维持在允许范围内，这是保证用电安全、可靠以及电价实惠的根本。在英格兰和威尔士，管理电网这一职责由英国国家电网公司承担，该公司拥有并负责建造、维护和运营高压输电网，保障家庭和企业用电。图1展示了电网中的一段高压地下电缆系统。

英国国家电网公司面临着不少挑战：提高规模庞大的电缆网络的热管理能力，优化新电缆的铺设路线，以及准确评估电缆额定值。有时在维修旧部件时会使用新材料，就会出现同一电缆线路中不同材料混用的情况，这时尤其要确保电缆安全额定值的准确性。应对这些挑战并不容易，运营者不仅需要全面了解周围土壤对电缆的影响、电缆使用年数及维修情况，还要考虑电缆对临近区域电缆性能的影响。

面临的挑战

在计算电缆的额定值时，大多数传输与配电网采用的是由国际电工委员会（IEC）颁布、并获得国际大电力系统委员会（CIGRE）认可的标准。所谓电缆额定值，是指在正常工作温度区间并且不会引起潜在损害的前提下，电缆所能承受的最大负载。



图1 一段穿过隧道（上图）和埋于地下（下图）的高压电缆系统

网络测绘工程师David Scott隶属于英国国家电网资产完整性部门，负责架空与埋地电缆性能的维护工作。他解释说：“测量高压系统电缆的额定值并非易事。这些高压电缆深埋于地下，最深可达50 m，随着电缆向前延伸，其周围泥土的温度可能会随电缆长度发生变化。而且这些电缆并不是孤立存在的，它们是大电力系统的一部分，因此附近还会有其他电缆，或者铁路电网电缆等。当周围电缆横穿过去，或者只是并排通过，但只要距离接近，就会改变所测电缆的热负荷。因此想获得有效的测量值非常困难。我们一直在寻找更准确的方法来测量电缆额定值。”

英国南安普顿大学（University of Southampton）的托尼·戴维斯高压实验室（Tony Davies High Voltage Laboratory，简称“TDHVL”）与英国国家电网公司合作开展了一系列创新项目。该实验室率先建立了不同电缆组件的模型，并使用仿真分析来理解电缆组件在环境变化与使用时长影响下的性能变化。

TDHVL与英国国家电网的研究合作始于经验模型的建立。双方密切合作，TDHVL的工程师使用COMSOL Multiphysics®软件进行有限元分析。研究人员将关注重点放到了热传递上。他们首先验证了特殊类型电缆的额定值，然后开始分析处在孤立状态或不同环境等特定状态下的电缆（如图2所示）。

土壤湿润时，热量消散得较快。干燥的土壤导热较慢，因为其中充满的微小气穴会阻碍热量的散失，这就会影响电缆的热性能（如图3所示）。在模拟铺设电缆的沟渠时，研究团队将土

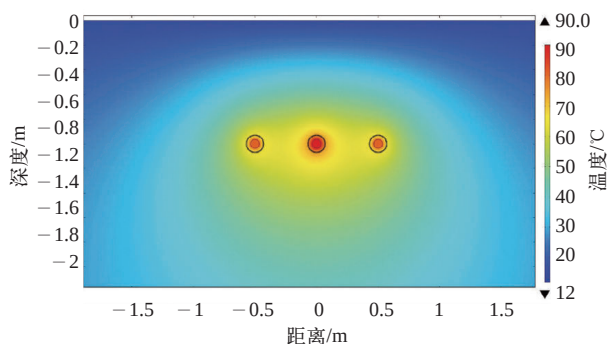


图2 仿真结果显示了土壤中电缆的热分布

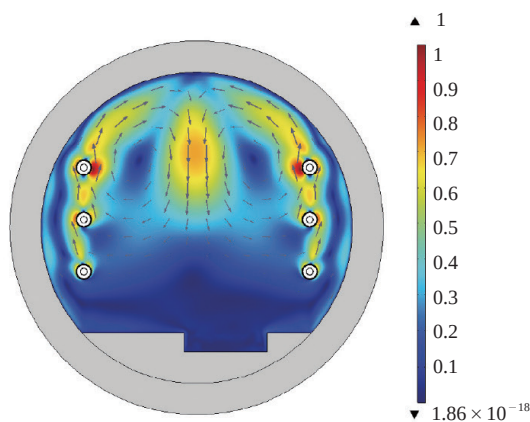
壤干燥度和开裂程度也考虑了进来。“对于模型中的土壤和专用回填材料，我们都有参数设置标准。不同的土壤参数会对模拟结果有较大影响，我们通常会选取一个最不利的数值，来代表土壤给电缆带来的负面影响。” Scott解释说。

热与电的分布

对于英国国家电网公司而言，建模工作的成果带来了崭新的前景，尤其是评估紧密布设电缆的额定值和优化新建电缆路线的配置时，仿真提供了全新的思路。例如，两根电缆距离过近会影响热量的消散，从而导致电缆的温度升高，载流能力下降。但有时也会遇到评估结果过于谨慎的情况。“我们发现，基于标准的各类方法在评估电缆额定值时，得到的结果通常较为保守。例如两根电缆实际相距100 m时，彼此之间的相互作用几乎可以忽略不计，所以我们可以用这类方法给出过热警告。” Scott表示。

他的团队利用相关的COMSOL模型来确定在现有线路基础上铺设新电缆时，是否能够符合

表面：归一化空气流速，面上箭头：速度场



表面：归一化速度大小，面上箭头：速度场

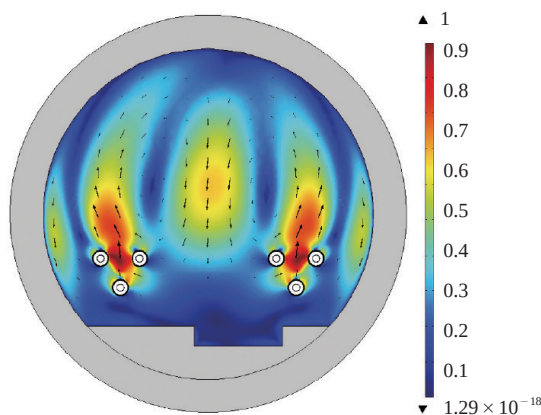


图3 水平铺设的长隧道横截面内归一化的气流分布仿真结果

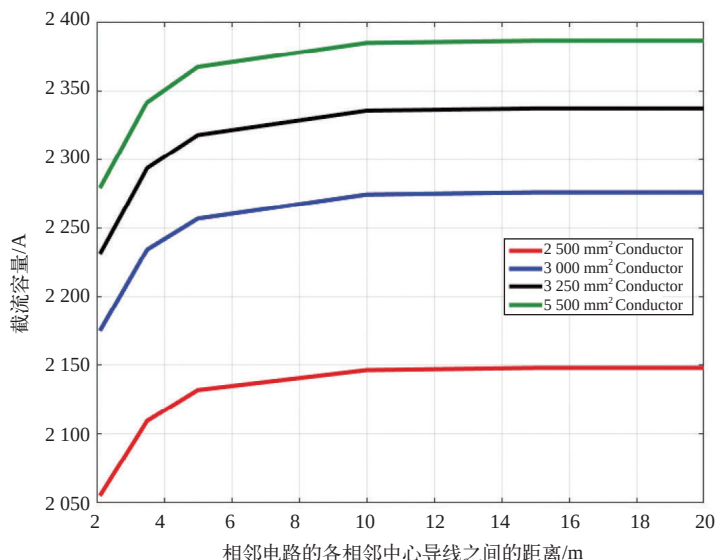


图4 COMSOL®模型显示了4个相同载流能力的电路,区别仅在于它们与相邻电路的距离不同

安全标准,以及电缆铺设的最佳位置(如图4所示)。“仿真让我们受益良多,现在我们能够为新系统的设计及其对现有网络的影响提供准确的反馈。”Scott评价道。

据Scott介绍,他们以前只能采取一些特定的措施以减小电缆干扰,通常是要求第三方将电缆铺设得更远一些或埋得更深一些。但埋得太深会让电缆的性能大打折扣;若想把电缆铺设得远一些,就会对土地面积提出很高的要求,这会使电缆的安装成本变得相当高,对于土地有限的城市来说,这一要求也非常不现实。借助仿真,他们可以更清楚地了解电缆铺设后的真实情形、实际的电缆额定值,以及可能出现的状况。

旧电网系统的维护工作还向运营者抛出了另一个难题:旧备件毕竟有限,维修时始终使用旧备件不现实。如果使用新备件,就可能造成一个系统中不同材料的混用(如图5所示)。许多旧电缆采用铅制的外护套,新电缆却往往使用铝制的。Scott表示:“为了控制维修成本,我们自然愿意只更换损坏的零件。然而,许多电缆系统在设计时都力求感应电流降到最小,从而保障电缆载流量最大化。如果在维修过程中混入了不同的材料,可能就无法达到设计之初的要求了。现有的工业标准并没有考虑使用不同导体的情况。我们可以使用COMSOL计算电缆损耗,根据具体的材料组合,判断需要采取怎样的对策。”

可靠结果,明智决策

Scott向大家公开了新建传输电缆的费用:

400 kV的埋地电缆每公里的铺设费用约为2 000万英镑(约1.8亿元人民币)。听到这个数字,仿真的价值瞬间明晰起来。如果一项即将动工的工程涉及到安装电缆,那么精简资产设计和最大化电缆容量便是降低成本的首要任务。“利用仿真获得的信息,我们可以放心地选择那些埋得更浅一些、但布线更复杂的埋设方案。”对于那些建在类似伦敦市中心这样拥挤地带的电力传输系统来说,因为基本没有可以水平延伸的空间,因此通过仿真所获得的信息就更有价值了。

未来可以在考虑高压设备(包括地上电缆)的生命周期、兼容性和连接性的基础上,利用建模制定与之相关的决策,类似的创意层出不穷。

“如果可以模拟高架电线周围的风和空气温度,并在给定时间内加上系统负荷,我们就拥有了尽早发现潜在问题的有效方法,例如预测线路表面污染物的凝结位置。”Scott解释道。仿真还可以用来排查电缆接头由于疲劳循环或机械损害而产生的问题,并预测此配件可能出现的故障模式。



图5 将分段电缆连接在一起的安装接头

Scott补充道:“我们能够专注于实际的物理问题,而不必陷于复杂的数学计算中。使用TDHVL创建的仿真模型,我们可以调整关键参数,探讨不同的设计方案,而且能够确信得到可靠的仿真结果。事实证明,只要确保输入参数是准确的,仿真结果的可靠性就毋庸置疑。在电缆铺设和维修方面,仿真总能帮助我们做出明智的决策。”EA