

输电线路的绝缘子设计

——仿真技术使输电线路性能最优化

高压输电线路的设计需要综合考量经济、电气、力学及环境等一系列限制因素,因此是一项十分复杂且耗时的工作。POWER Engineers 公司在进行新线路设备制造和高压测试之前,先利用仿真技术进行输电线路电晕性能的分析工作,从而节省了时间和资金。

作者 **ALEXANDRA FOLEY**

利用高精度仿真技术,以及过去数十年运行设备分析所得到的经验,如今工程师已经能够研究、建模和消除电晕放电的细微影响。但在几年前,想要得到这些结果,只能通过费用高昂、过程严格的测试来实现。如今仿真技术正在成功地应用于多个领域,其中就包括分析电晕放电对大功率容量输电线路及其相关设备的不利影响。

研究人员通常会利用高压实验室测试或评估运行设备的表现来进行这类分析工作,但全球咨询工程公司 POWER Engineers 公司(简称 POWER 公司)发现,有限元仿真软件是分析输电线路电晕性能的有效工具。例如,根据与中西部一家公用事业公司签订的合同,POWER 公司对 345 千伏输电线路设备的电晕性能进行了详细研究,旨在减轻风和冰载荷对线路造成的机械应力。通过这些仿真研究,工作人员可以在进实验室完成高压测试之

前,就对设备的电气性能有一个更好的认识。

复杂几何结构的电场计算

由于张力作用,高压输电线路会在水平方向产生巨大拉力,因此需要设计一种结构来承载这一巨大拉力,这就是终端结构。在这些终端结构上装有绝缘子,使得终端结构和带电导线虽然连接在一起,但却处于电隔离状态(图1)。这些高压导线和终端组件表面附近的电场可以电离周围的空气分子,进而产生电晕放电,从而产生能量损失、电磁(AM无线电)干扰、可闻噪声、可见光以及可能的材料侵蚀等一系列不良影响。

“如果你曾站在输电线路旁,很可能听到过它发出的嘶嘶声”,POWER 公司的高级项目工程师 Jon Leman 说道。

“当电压达到一定数值后,电场会电离空气分子并

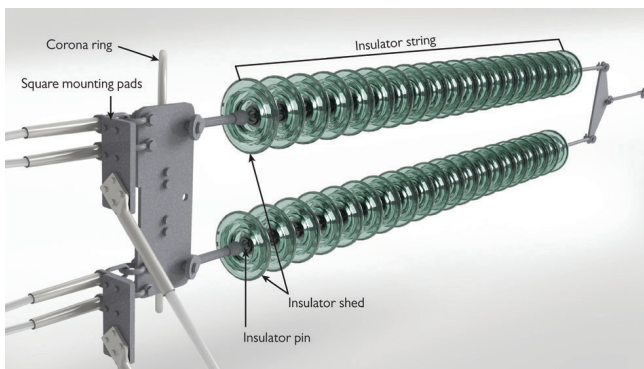


图 1. 上图:终端结构。下图:终端绝缘子的 CAD 绘图。图片来源: Danny Frederick 和 Charlie Koenig, POWER Engineers 公司。图注: Corona ring - 电晕环; Square mounting pads - 垫片安装; Insulator string - 绝缘子串; Insulator shed - 绝缘器; Insulator pin - 绝缘子脚

产生电晕放电。通常这就是我们听到噪声的原因。要将这种噪声和其他负面影响降到最低,就需减少电晕放电。”对输电线路导线来说,一定程度的电晕活动及其相

表面电压绘制成对数坐标图
(伏特 +1)

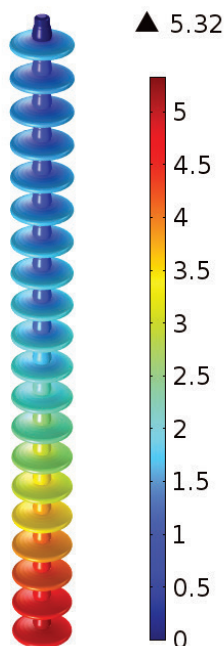


图 2. 展示绝缘子串电势分布的二维轴对称模型。

Dead End Assembly Surface Electric Field Magnitude (kV/cm)

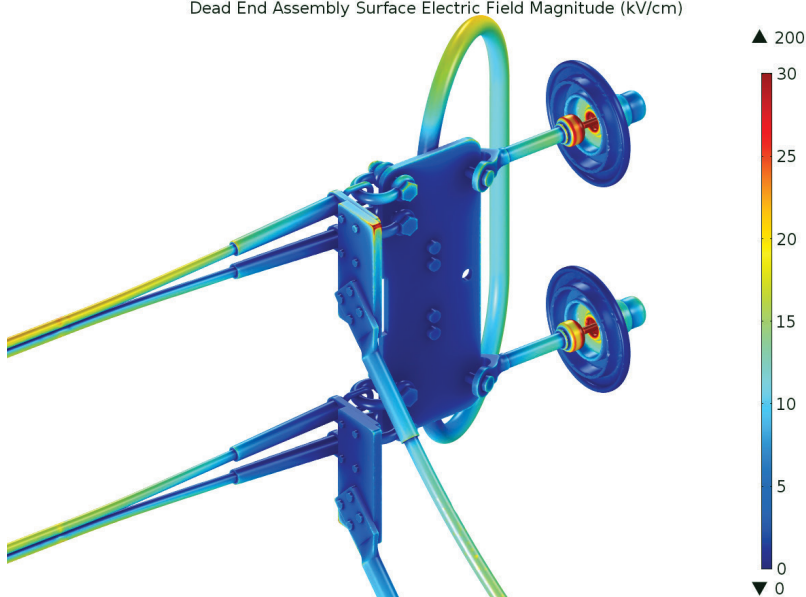


图 3. 终端绝缘子的表面电场强度。高电场区域出现在绝缘子单元的引脚和方形安装垫片上。

关影响是可以承受的，但对与导线相接触的器件来说，则不应出现明显的电晕活动。Leman 采用了 COMSOL Multiphysics® 来确定通电器件表面附近的电场强度，并估算出高电场位置发生电晕放电的概率。

“为了降低仿真计算的工作量，我们选取了三相输电线路其中一相的绝缘子，并且只对绝缘子串的最后一个单元进行了建模，” Leman 表示说。之后，POWER 公司的研究人员将完整的绝缘子串作为二维轴对称模型，从而确定了最后一个绝缘子串单元盖上的悬浮电位（见图 2）。得到边界电压后，就可以

建立一个相当精确的三维模型。这种建模方法无需考虑绝缘子串复杂的重复几何结构，同时减少了计算总量。

预测输电设备的电晕性能

电晕放电是一种复杂的物理现象，受电场强度、器件几何形状、大气条件及导体表面条件的综合影响。Leman 将根据经验得出的、与空间相关的方程输入 COMSOL 软件中，对电场结果进行自定义后期处理，以估算高电场区域附近的空气电离的净数量。这种处理方法可以估算出电晕活动的概率。

结果表明，有两处区域

的电场强度足以导致电晕放电：一处是绝缘子单元的通电引脚，另一处是较上方的方形安装垫片的一角附近（图 3 中红色区域）。

“我们的结果表明，方形安装垫片的外角易受电晕放电的影响，但只是轻微的影响，” Leman 解释说。“然而，绝缘子脚可能会出现明显的电晕放电。”绝缘子脚处电场

强度的详细分布见图 4。

除电晕噪声和无线电干扰外，剧烈的电晕放电还会使绝缘子单元随着时间出现劣化，进而可能导致其强度和绝缘能力变差。Leman 表示：“现在我们已经确定了硬件上可能出现问题的位置，因而可以在测试前对设计进行修改。” Rob Schaerer 是 POWER 公司的一名项目

COMSOL 软件结合了我们所必需的工具，为客户提供了拟建传输线路性能的精确定分析，从而能够减少在高压测试之后可能发生的设计迭代现象。

— POWER ENGINEERS 公司高级项目工程师

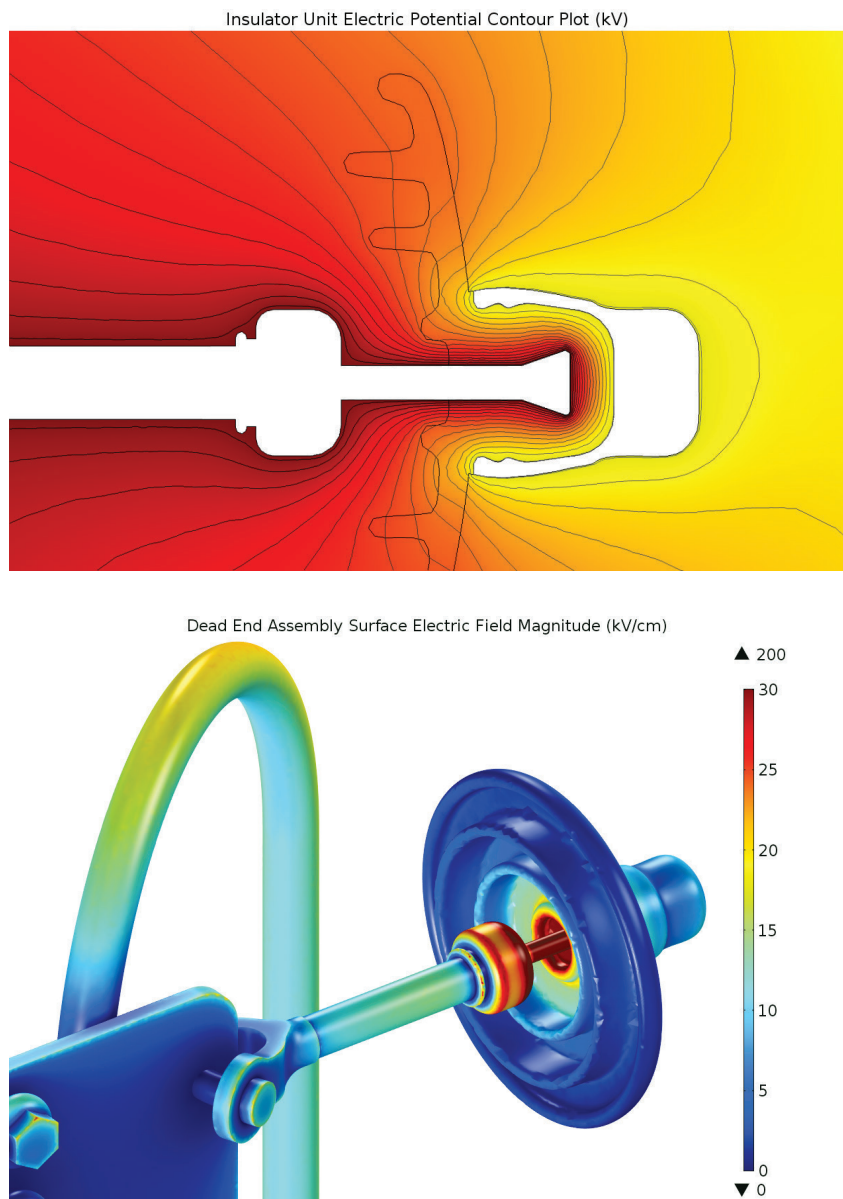


图 4. 上图:绝缘子脚周围空气的电势截面。下图:绝缘子脚的电场分布。

工程师,他也参与了这个项目,负责协调程序并为客户全程监督高压电晕测试的结果。他表示说:“实验室测试属于新硬件设计的重要组成部分,但可以通过预先的分析工作来节省测试费用,尤其是对需要复测的项目。预约一次高压实验室测试需要

等待很长的时间,因此在测试前进行合理的设计审查,就不太可能出现在第一轮测试中就发现设计存在不足的情况,从而降低对项目的不良影响。

精确仿真驱动真实结果

仿真工作可以在设备组

装之前就得出其运行情况。结合实证检验的结果,工程师可对新设计设备的性能做出合理预测。“我非常敬佩那些不利用现代计算就建造出电网的工程师。但重要的是,我们可将前辈们的精巧构思与先进工具的使用结合起来,从而高效开展未来电



Jon Leman, POWER 公司高级项目工程师



Rob Schaerer, POWER 公司项目工程师。



Charlie Koenig, POWER 公司可视化及动画领域专家

网的设计工作。”Leman说道。“COMSOL 软件结合了我们所必需的工具,为客户提供了拟建传输线路性能的精确分析,从而能够减少在高压测试之后可能发生的设计迭代现象。”诸如此类的例子表明,仿真可以降低设备设计的成本并更快速地优化解决方案,从而改变设备设计的过程。▲