

「开关设备」

柱上开关套管中增加屏蔽网降低局放量的研究

文/江苏南瑞帕威尔电气有限公司 杭雅慧 陆军 刘进 印成

建立了柱上开关进出线套管模型，利用有限元分析套管在无屏蔽网、加环状屏蔽网和加改进后屏蔽网的电场分布情况，定性分析套管中局部放电情况。试验测得套管在无屏蔽网和加改进后屏蔽网的局放值，验证了有限元分析的正确性。最终确认套管浇注改进后的屏蔽网可有效降低局放量。

供电的安全性、可靠性对现代电力系统的稳定性有至关重要的作用。柱上开关作为户外电力设备，其绝缘材料长期受高温、潮湿和化学物质等作用，其绝缘性能不断恶化，同时局部放电又会加速绝缘的恶化。根据事故统计表明，绝缘老化占比较大，其中大部分是由于局部放电造成的。每一次局部放电对电力设备的绝缘介质都会有一些影响，轻微的局部放电对电力设备绝缘的影响较小；而强烈的局部放电，则会使绝缘强度很快下降。因此，降低设备局放，延缓电力设备绝缘强度的降低速度，可提高电力设备的安全性与可靠性，延长电力设备使用寿命。

局部放电的原理

局部放电是指当外加电压在电气设备中产生的场强，足以使绝缘部分区域发生放电，但在放电区域内未形成固定放电通道的放电现象。固体绝缘系统在安装过程中会存在小气隙，气隙在工作电压下承受的电场强度比正常绝缘部分大，从而发生局部放电。局部放电会产生热量，使绝缘介质发生老化，逐渐增大气隙，气隙的增大也会使得局放量增大。长时间的局部放电会使得绝缘层击穿。

所研究的是柱上开关进出线套管的局部放电现象，其进出线套管为铜棒外浇注环氧树脂而成，试品如图1所示。图1中铜棒与环氧树脂间通过浇注而成。环氧树脂套管安装在壳体上，壳体接地，在安装过程中，环氧树脂套管与壳体之间存在空气间隙。当外加交流电压增加到一定程度，存在的空气间隙电离，发生局部的和重复的击穿和放电熄灭。国内外学者通过大量研究提出了经典三电容模型，如图2所示。其中 C_v 是绝缘物之间放电间隙（如气泡）的电容； C_b 是与 C_v 串联的绝缘物部分的电容； C_s 是除了 C_v 和 C_b 以外的电极之间的电容。则最终的总电容 C 为

$$C = C_s + \frac{C_b C_v}{C_b + C_v}$$

模型比较简单，能大致描述部分放电规律。

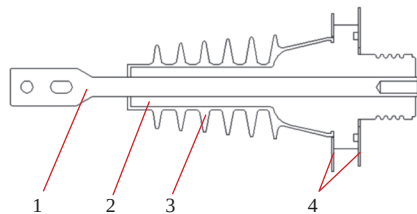


图1 套管结构图

1—进出线铜棒 2—环氧树脂套管 3—套管外套
4—套管安装壳体

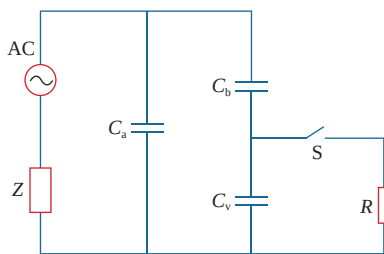


图2 经典三电容模型

Z—测量等效阻抗 S—放电开关 R—气隙等效电阻

局部放电在高压设备的长期运行过程中会逐步扩大，对设备绝缘部件影响较大，最终导致绝缘彻底损坏。局部放电量是设备绝缘部件质量和使用寿命的重要指标。目前常用的降低局部放电的方式有圆整零部件边缘、减少尖端，控制加工环境中的异物与粉尘，减少导电件表面的毛刺等。提出采用在环氧树脂绝缘套管中固封屏蔽网的方法降低局部放电，并采用模拟和试验两种方法验证采用屏蔽网的有效性。

局部放电的有限元模拟

采用有限元分析方法，分别对无屏蔽网的试

品模型和有屏蔽网的试品模型进行电场分析。具体做法是定义套管安装壳体为零位点，对试品模型中进出线铜棒加载42 kV交流电压，分析其电场分布情况，从而定性分析模型的局部放电量。

电场的分布与材料的介电常数有关，绝缘材料的临界场强 E_0 与材料本体、加工工艺、电极形状、极间距离和电场的均匀程度等因素有关。因此绝缘材料的属性会影响到仿真结果，本模拟中套管模型中绝缘材料为环氧树脂。下表为部分绝缘材料的临界场强及其相对介电常数。

表 部分绝缘材料的临界场强及其相对介电常数

电介质	临界场强 E_0 /(kV/cm)	相对介电常数
空气	25~30	1.000 58
环氧树脂	200~300	4.5

无屏蔽网的试品模型如图1所示，其通电模拟后的电场分布情况如图3所示。从图3中可以看出在壳体靠近铜棒的部位电场强度最大，这是由于套管安装时与壳体之间存在空气间隙，铜棒、环氧树脂套管、空气间隙和壳体形成了经典三电容模型，空气间隙发生电离，从而产生较大电场，发生局部放电。长时间的局部放电，加快环氧树脂套管老化速度，从而使绝缘失效。

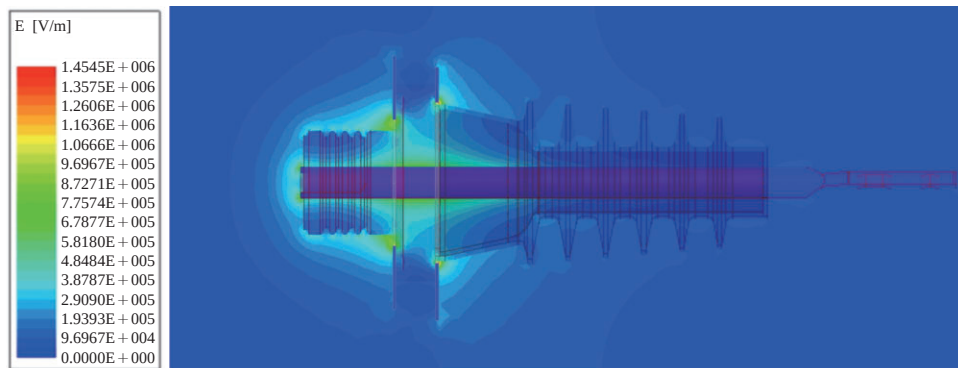


图3 无屏蔽网模型的电场分布

为减少铜棒对壳体的放电，减缓环氧树脂套管在使用过程中的放电损伤，拟在铜棒与壳体之间增加屏蔽网。

在环氧树脂套管中浇注环状屏蔽网，与铜棒同轴，并将屏蔽网与安装壳体连接，则安装后零位点从壳体变为环氧树脂套管内部的屏蔽网，其模型如图4所示。屏蔽网与铜棒之间的最小距离为150 mm，在10 kV柱上开关中应用有足够的绝缘裕度。利用有限元法对此模型进行电场分析，对进出线铜棒施加42 kV交流电压，同时定义屏蔽网

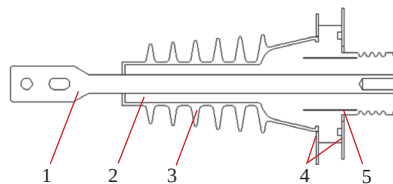


图4 加环状屏蔽网的套管结构图

1—进出线铜棒 2—环氧树脂套管 3—套管外套
4—套管安装壳体 5—屏蔽网

为零位点，模拟电场分布情况如图5所示。铜棒与零位点之间的绝缘层仅为环氧树脂层，且没有空

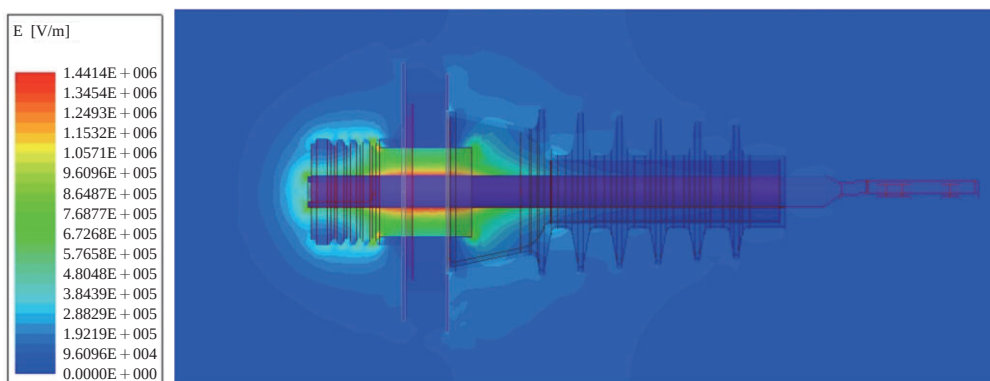


图5 加环状屏蔽网模型的电场分布

气间隙，因此铜棒对零位点的放电量较少。从图5中可以看出由于屏蔽网的存在，铜棒对安装壳体的放电为零，因此对环氧树脂套管表层不会造成损伤，可以有效保护绝缘层。由于环状屏蔽网的两端存在尖端，因此铜棒对此尖端存在放电现象，这会使浇注的环氧树脂套管内部发生老化，降低环氧树脂套管的绝缘性能。

为了避免尖端放电，对屏蔽网的形状进行优化，则优化后的套管结构图如图6所示，优化后的屏蔽网端部为圆弧状，外壳与屏蔽网之间通过铜螺母连接。同样对进出线铜棒施加42 kV的交流电压，并定义屏蔽网为零位点，其有限元模拟电场分布如图7所示。从图7中可以看出，屏蔽网端部也存在较强的电场，这是由于铜棒与圆弧状的屏蔽网之间的电场是不均匀的，存在局部放电现象。但这种放电是逐步变化的，比环状屏蔽网的尖端放电要小很多，因此，优化的屏蔽网对套管整体降低局放，且减少对环氧树脂绝缘层的破坏具有较大优势。

通过有限元法分析各套管模型的电场分布，发现不使用屏蔽网的套管对壳体的局部放电量较大，

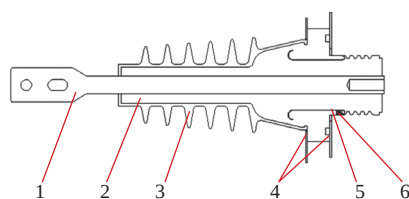


图6 加优化屏蔽网的套管结构图

- 1—进出线铜棒 2—环氧树脂套管 3—套管外套
4—套管安装壳体 5—屏蔽网 6—铜螺母

易对套管表面的环氧树脂绝缘层产生破坏，逐渐降低绝缘效果；使用环状屏蔽网，则会大幅降低套管对壳体的局部放电，但由于环状屏蔽网存在尖端，易对环氧树脂绝缘层内部产生尖端放电，破坏绝缘层；使用优化的屏蔽网，则既可以降低套管对壳体的放电，也缓解了对屏蔽网的尖端放电。因此在套管中浇注优化的屏蔽层，可降低套管整体的局放量，提高套管性能。

试验验证

为验证屏蔽网的有效性，对不使用屏蔽网的
(下转第63页)

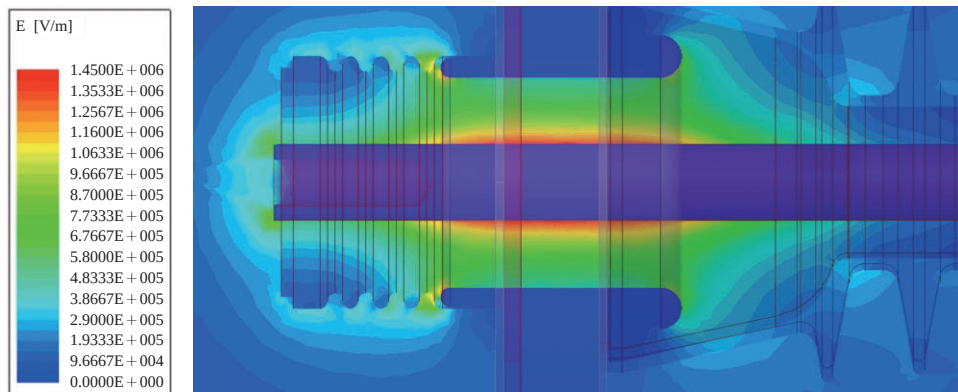


图7 加优化屏蔽网模型的电场分布

统计值视图		
统计值	拟合: Beta	预测值
试验次数	---	2,000
基本情况	---	17,604,970
平均值	13,787,166	13,787,166
中间值	13,611,932	13,544,520
模式	13,097,974	---
标准偏差	2,692,299	2,692,972
方差	7,248,472,830,138	7,252,098,879,578
偏斜度	0.2924	0.2922
峰度	2.53	2.53
变异系数	0.1953	0.1953
最小值	7,639,887	7,936,045
最大值	23,605,702	21,922,276
平均标准误差	---	60.217

图4 净现值统计表

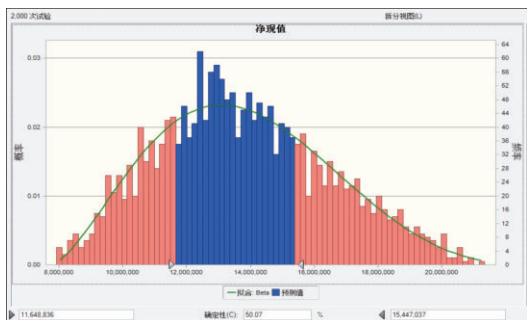


图3 净现值预测模型

最大值为2 192万元，最小值为794万元，但是发生的可能性都不大。另外，净现值小于0的发生概率为0。根据对上述模拟结果的分析，该项目投资风险较低，收益较好。

结束语

配电网的建设在整个电网建设中占据着重要地位，合理的配电网规划投资已成为电网投资建设的关键环节。对配电网投资项目进行风险分析，利用Crystal Ball软件建立投资决策模型；提出影响配电网项目投资的关键类别要素及各要素所服从的概率分布；通过净现值预测模型、净现值统计表等方式对预测结果进行具体分析。通过算例论证，该模型科学有效，该模型对配电网规划投资效益进行全面综合评价，为配电网的规划投资提供可靠的指导依据。EA

(收稿日期：2017.12.19)

(编辑：刘群焱)

(上接第60页)

套管和使用优化屏蔽网的套管进行局放试验。

试验采用的设备为德国Power Diagnostix Systems GmbH公司的ICMcompact局部放电检测器。它可以用来独立评估中高压绝缘的条件，也可以与计算机连接捕捉截面图或远程控制，也可以增加部分配件以适应特定的测试应用和噪声环境。

试验中套管铜棒连接高电压，安装套管的壳体接地。两种套管测量结果如图8所示。未加屏蔽网的套管在施加8.42 kV的电压时，局放值达到6.42 nC，局放值较大。在套管中浇注改进的屏蔽网后，其局放值为9.49 pC，相较于无屏蔽网的套管大幅度下降。

比较两个试验结果，可以发现使用屏蔽网可降低套管局放，与有限元分析结果一致。

结束语

利用有限元和试验两种方法分析柱上开关进出线套管的局部放电现象。首先利用有限元法对比分析套管在没有屏蔽网和浇注屏蔽网两种情况下的电场分布，发现使用屏蔽网可有效降低壳



(a) 无屏蔽网



(b) 加屏蔽网

图8 套管局放测量值

体、套管和空气3种介质交汇处的电场强度。其次利用有限元法改进屏蔽网的形状，减少极不均匀电场分布现象。最后采用试验方法，测量套管在无屏蔽网和浇注屏蔽网2种情况下的局放值，验证有限元分析的正确性，即套管中浇注屏蔽网可有效降低其局放量。EA

(收稿日期：2017.08.12)

(编辑：刘群焱)