

基于有限元和神经网络方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究

司马文霞¹, 杨庆¹, 孙才新¹, Shesha H. Jayaram², Edward A. Cherney²

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆市沙坪坝区 400044;

2. 滑铁卢大学电力与计算机工程系, 加拿大滑铁卢)

OPTIMIZATION OF CORONA RING DESIGN FOR EHV COMPOSITE INSULATOR USING FINITE ELEMENT AND NEURAL NETWORK METHOD

SIMA Wen-xia¹, YANG Qing¹, SUN Cai-xin¹, Shesha H. Jayaram², Edward A. Cherney²

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada)

ABSTRACT: A method to optimize the location and the dimensions of the corona ring is presented for EHV transmission line composite insulators. This method is used to handle the open boundary problem of the insulator model by means of the asymptotic boundary conditions. Then, in order to set the optimal goal, the finite element method is employed to calculate the electrical field distribution along the composite insulator with corona ring which is of various location and dimensions. Moreover, the neural network model is built to map the location as well as the dimensions of the corona ring and the optimal goal, which can avoid the tedious calculation caused by the method of exhaustion. The optimized corona ring makes the maximum E-field stress along the insulator surface and the one along the corona surface both below the corona inception level.

KEY WORDS: Composite insulator; E-field; Corona ring; Optimization; Finite element method (FEM); Neural network

摘要: 针对超高压输电线路合成绝缘子所用的均压环, 提出了一种优化其结构参数的方法。这种方法首先利用渐进边界条件解决了绝缘子电场模型的开域问题, 然后以有限元方法计算出均压环各个参数对绝缘子电场分布的影响, 并以此确定了均压环结构优化目标; 在此基础上, 利用神经网络拟合了均压环各结构参数与优化目标之间的关系, 并以此得出均

压环结构参数的最优解, 解决了穷举优化方法的计算时间冗长的缺点。优化后的均压环使得绝缘子和均压环的表面电场强度均小于电晕起始场强。

关键词: 合成绝缘子; 电场; 均压环; 优化; 有限元方法; 神经网络

1 引言

超高压输电线路外绝缘设计主要采用悬式瓷、玻璃绝缘子串和合成绝缘子。近年来, 由于合成绝缘子具有防污性能好、轻便、便于维护等优点在我国电力系统中得到了广泛的应用。但合成绝缘子在实际运用中也遇到一些问题, 诸如芯棒脆断^[1], 覆冰下电气性能严重降低^[2-3], 电场分布严重不均匀等。其中电场分布严重不均匀是合成绝缘子在超特高压线路上运用所面临的一个紧迫问题。通常情况下, 悬式绝缘子串在干燥条件下的电场分布一般由绝缘子串的结构参数和沿面电容分布决定, 因而绝缘子串的沿面电位有很明显的梯度分布, 避免了在高压端或高压端附近产生较高的电场^[4]。而合成绝缘子由于其外形特点、金具结构和硅橡胶材料的低电导率, 使得电位分布从高压端开始快速衰减, 这样的电位分布使得在邻近高压端和接地端处产生了较高的电场。如果绝缘子表面电场强度超过了电晕起始场强 (0.45kV/mm), 就会产生电晕放电。本文计算了具有 65 伞的典型超高压合成绝缘子沿面电场

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90210026)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(90210026).

的分布,结果如图1所示(图中 x 轴0点位置对应图3中的A点,即高压端金具与绝缘介质的联接点,如不加特殊说明,本文所有图例都按此对应),可以看出,在绝缘子的两端,电场强度已经超过了电晕起始场强。

均压环通过与绝缘子并联的方式来提高绝缘子的绝缘性能,通过调整高压端附近的电压分布从而降低绝缘子沿面电场强度以避免产生电晕,能减少由电晕引起的可听噪声,以及电晕噪声产生的无线电干扰和电视干扰,并能消除由电晕引起的非瓷材料的降解作用。图2为本文方法所计算的230kV合成绝缘子高压端带均压环时的高压端附近电场分布图。可以看出,绝缘子表面的电场强度小于电晕起始场强的临界值。

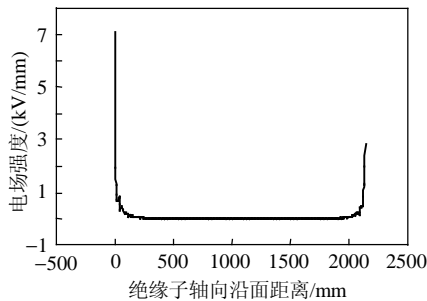


图1 230kV合成绝缘子沿面电场分布

Fig. 1 Electrical field distribution along a 230kV composite insulator

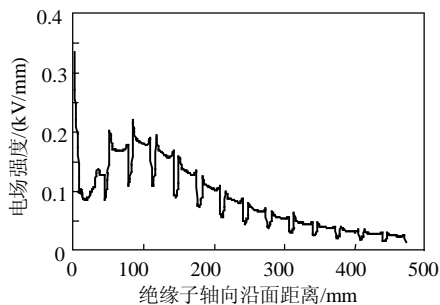


图2 带均压环230kV合成绝缘子高压端附近电场分布

Fig. 2 Electrical field distribution along a 230kV composite insulator with corona ring

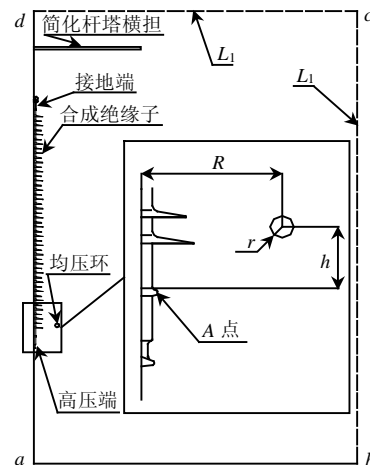
均压环在220 kV电压等级线路上通常仅安装在合成绝缘子高压端,当线路电压等级超过330 kV时,合成绝缘子的高压端和接地端均需安装均压环。然而,并不是任意结构参数的均压环都能均匀绝缘子沿面电位分布,从而降低绝缘子表面电场强度,均压环的结构参数及安装位置等因素将直接影响绝缘子表面的沿面电位分布;同时,当均压环自身的表面电场强度超过2.2kV/mm时,均压环自身也会产生电晕,这样反而使得绝缘子的绝缘性能降

低。因此,采用最优化技术研究最优结构的合成绝缘子均压环以改善合成绝缘子沿面电场和电位分布,具有重要的学术意义和工程应用价值。

2 带均压环合成绝缘子电场分布的计算

2.1 电场计算有限元模型的建立

合成绝缘子的电场分布并不是严格的轴对称场,但从工程近似的角度,本文对实际模型进行了简化,将高压电极和地电极视为轴对称,忽略均压环的支撑杆,计算场域为轴对称场,计算模型如图3所示。利用有限元方法,分别对考虑杆塔横担影响和不考虑杆塔横担影响两种情况下带均压环合成绝缘子沿面电场分布进行了计算,不考虑杆塔横担影响时,忽略图3中的简化杆塔横担。



注:abcd为矩形人工边界;ab段按工程实际设为地;ad段为对称轴; L_1 为人工截断边界; R 为均压环半径; r 为均压环管径; h 为均压环在垂直面上的抬高距;A点为高压端金具与绝缘介质连接点

图3 带均压环合成绝缘子计算模型

Fig. 3 The calculation model of composite insulator with corona ring

合成绝缘子电场求解是一个开域问题,而目前所用的商业有限元电磁场软件大都不具备处理开放边界的模块^[5-6],因此,本文采用渐进边界条件处理开域边界条件,将开域问题转化到有限域内,使得求解可以用有限元方法完成^[7-8]。最终,合成绝缘子电位分布是下列问题的解。

在求解域 W 内

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r e \frac{\partial j}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (e \frac{\partial j}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

在电极和简化杆塔横担边界上

$$j \Big|_{L_0} = f_0(P) \quad (2)$$

在对称轴上

$$\frac{\partial j}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

在介质分界面上

$$j_1 = j_2, \quad e_1 \frac{\partial j_1}{\partial n} = e_2 \frac{\partial j_2}{\partial n} \quad (4)$$

在人工截断边界 L_1 上

$$\frac{\partial j}{\partial n} + f_1(\mathbf{P})j = f_2(\mathbf{P}) \quad (5)$$

式(1)~(5)中 j 为电位; \mathbf{P} 为位置矢量。

其相应的变分问题为

$$\begin{cases} F(j) = \frac{1}{2} \int_w e(\nabla j)^2 dW + \int_{G=L_1} e(\frac{1}{2} f_1 j^2 - f_2 j) dG \\ dF(j) = 0 \\ j|_{L_0} = f_0(\mathbf{P}) \\ j|_{L_{ab}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

本文采用矩形人工边界 $abcd$ 将无限域截断为有限域, 如图 3 所示。在 L_1 上采用二阶渐近边界条件处理无限远处的边值问题, 式(5)、(6)中的 $f_1(\mathbf{P})$ 和 $f_2(\mathbf{P})$ 的具体表达式为^[7]

在 bc 边界上

$$f_1(\mathbf{P}) = \frac{3r^3}{2(2r^2 - z^2)(r^2 + z^2)} \quad (7)$$

$$f_2(\mathbf{P}) = \frac{r(r^2 + z^2)\partial^2 j}{2(2r^2 - z^2)\partial z} \quad (8)$$

在 cd 边界上

$$f_1(\mathbf{P}) = \frac{2z^4 - 5z^2 r^2 - r^4}{(r^2 + z^2)(4z^3 - 8zr^2)} \quad (9)$$

$$f_2(\mathbf{P}) = \frac{r^4 - z^4}{4z^3 - 8zr^2} \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial j}{\partial r} \right) \right] \quad (10)$$

2.2 计算结果

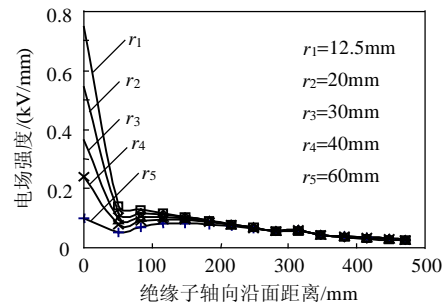
2.2.1 不考虑杆塔横担影响时均压环结构参数对绝缘子沿面场强的影响

本文以 230kV 合成绝缘子为例, 对其高压端均压环参数对沿面电场的影响进行了计算研究, 此绝缘子具有 65 个伞, 长 2175mm。以均压环环径 R , 管径 r 和均压环在垂直面上的抬高距 h 为参数, 分析均压环结构参数变化对绝缘子电场分布的影响, 各参数意义如图 3 所示。

不考虑杆塔横担影响时, R 、 r 和 h 三个参数中某一个参数独立变化, 同时保持另两个参数为常数值时的绝缘子沿面电场强度的计算结果如图 4~6 所示。所有的计算都是以 230kV 系统的最高运行电压 147kV 作为绝缘子高压端所加电压, 由于计算结果中最大电场强度总是出现在高压端附近, 图 4~6 仅给出高压端以上 14 个伞各伞沿面最大电场强度的连线, 且各图中数据标记所示为各伞沿面最大电场

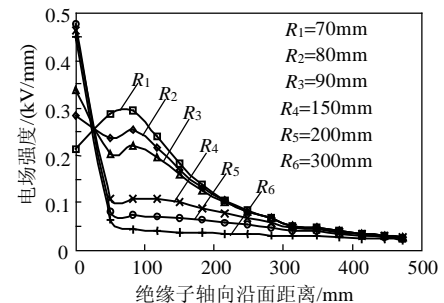
强度值及其所对应的绝缘子轴向距离。

从图 4 可以看出, A 点的电场强度随着 r 的增大而减小, 这是由于增加 r 相当于增加了绝缘子金具的曲率半径, 而电极的曲率半径越大, 在电极附近的电场强度将会下降; 如图 5 所示, A 点的电场强度随着 R 的增加而增加, 这是由于 R 的增加使得均压环远离了电极, 对电极附近场强的畸变作用减弱; 图 6 则表示出了绝缘子沿面电场强度随着 h 的变化而变化, 这是由于抬高距的变化使得均压环的电场畸变作用的主要位置也相应发生变化, 如果均压环在电极附近, 其电场畸变作用将主要针对电



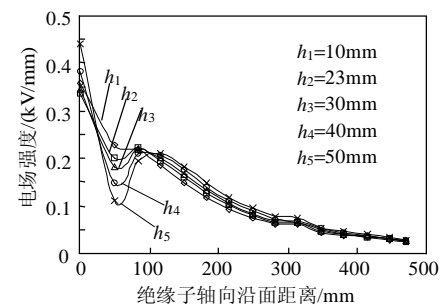
注: $R=150\text{mm}$, $h=23\text{mm}$

图 4 r 变化时的绝缘子沿面电场分布
Fig. 4 Electrical field distribution along the insulator with variation r



注: $r=24\text{mm}$, $h=23\text{mm}$

图 5 R 变化时的绝缘子沿面电场分布
Fig. 5 Electrical field distribution along the insulator with variation R



注: $R=90\text{mm}$, $r=24\text{mm}$

图 6 h 变化时的绝缘子沿面电场分布
Fig. 6 Electrical field distribution along the insulator with variation h

极, 而如果均压环在绝缘子中部, 则相应的电场畸变作用将主要针对绝缘子中部。

计算结果(图4~6)表明, 绝缘子沿面最大电场强度的位置不一定总在通常认为的A点, 当均压环的位置和结构参数变化时, 对应最大电场强度的位置也随之变化, r 、 h 和 R 对电场强度大小的影响程度也不同。因而, 均压环结构参数与绝缘子表面电场的关系不是单调函数, 这就使得优化目标函数变得比较复杂。因此, 以绝缘子沿面最大电场强度趋于最小, 且均压环表面最大电场强度小于均压环电晕起始场强作为优化的目标函数。

2.2.2 杆塔横担对带均压环绝缘子沿面电场分布的影响

将杆塔简化模拟为一个接地圆平面, 这样仍然能以二维轴对称场建立模型。此平面与合成绝缘子接地端相距150mm且此板半径为2500mm, 如图3所示。

图7所示为考虑横担和不考虑横担两种情况下带均压环绝缘子轴向沿面电场分布(均压环的结构参数为 $R=90\text{mm}$ 、 $r=24\text{mm}$ 和 $h=23\text{mm}$)。从图7可以看出, 考虑接地横担时绝缘子沿面电场强度最大值大于不考虑接地横担时沿面电场强度最大值, 此时绝缘子表面最大电场强度已超过绝缘子表面电晕起始场强, 而且均压环表面的电场强度已达到2.5kV/mm, 同样也超过了均压环电晕起始场强, 这就需要调整均压环的结构参数。因此, 针对均压环结构参数的优化过程, 文中分别以不考虑杆塔横担的影响和考虑杆塔横担的影响进行优化过程的计算。

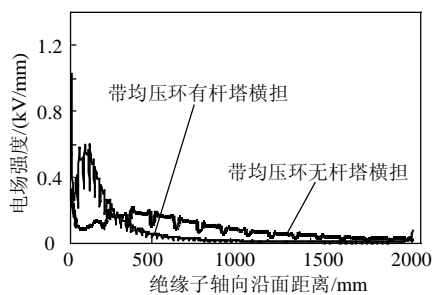


图7 有无接横担时带均压环绝缘子沿面电场分布

Fig. 7 Electrical field distribution along the insulator, with and without the ground plane

3 均压环结构优化

3.1 优化方法

绝缘子沿面最大场强以及均压环表面最大场强与均压环结构参数之间是一种映射关系 F

$$(E_1, E_2) = F(R, r, h) \quad (11)$$

式中 E_1 为绝缘子沿面最大场强; E_2 为均压环表面最大场强。

优化的目标就是求取一组 R 、 r 和 h 的值, 使得满足 E_2 小于 2.2kV/mm 条件下, E_1 取得最小值。然而, R 、 r 、 h 和 E_1 、 E_2 之间的关系是一种多维非线性映射关系, 这种映射关系很难用简单函数直接给出。通常的均压环设计优化方法是简单的让 R 、 r 、 h 在各自的定义域内变化而得到一系列的均压环结构参数, 利用电场计算模型分别计算这些结构参数下 E_1 和 E_2 , 最后比较这些场强值, 找出满足均压环不起电晕条件下, E_1 取最小值时所对应的均压环的结构参数, 这样得到的结构参数就是均压环最优结构参数^[9]。这种穷举算法虽然简单, 但计算量巨大, 耗时很长。以本文所做的优化问题为例, 每种结构参数下求取场强的计算时间约为半分钟, 如果让 R 、 h 和 r 在 [90, 255]mm、[-10, 30]mm 和 [10, 24]mm 范围内分别以 1mm 为步长变化, 则共需要计算 95284 次, 总的计算时长约为 800h, 可见这种耗时巨大的算法是不足取的。

近年来, 神经网络因其具有强大的多维非线性映射能力在各个工程领域内得到了广泛的应用。神经网络模型通过学习和训练输入/输出数据就可以获得网络的权值和结构, 从而得出隐含在输入/输出数据中的关系。这种关系隐含在神经网络内部, 不需要知道具体的精确模型, 只需用神经网络就能逼近输入和输出之间的多维非线性特性, 从而建立输入与输出之间的关系。本文利用神经网络建立了 R 、 r 、 h 和 E_1 、 E_2 之间的映射关系, 利用有限元方法计算出一些样本供神经网络训练和验证使用, 再由已建立的神经网络模型计算出各结构参数变化下的 E_1 和 E_2 , 从中找出满足优化目标的均压环的最优结构参数。这样的优化过程, 神经网络的计算时间基本上可以忽略不计, 只需用少量的时间计算一些样本供神经网络训练和验证使用, 大大缩短了优化过程的时间。

3.2 均压环结构优化神经网络模型

图8为建立的均压环结构优化神经网络模型, 网络类型采用最常用的BP神经网络^[10-12], 输入向量为均压环结构参数 R 、 r 和 h , 输出向量为 E_1 和 E_2 。

由于作为人工神经网络的输入和输出应该选取无量纲的向量, 所以把输入的均压环参数和输出的场强值归一化到 [0, 1] 区间里, 归一化处理按如下方式进行。

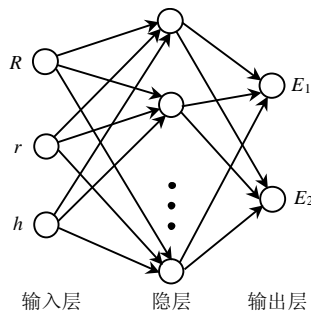


图 8 均压环优化神经网络模型
Fig. 8 Optimization of the ANN model for the corona ring design

设 f 为均压环某一结构参数, f_{\max} 和 f_{\min} 为此参数的上下界, 那么对于任意的 $f(x)$, 按以下方式进行处理:

(1) 如果此结构参数与 E_1 正相关, 则归一化后的结构参数 $f_n(x)$ 为

$$f_n(x) = \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (12)$$

(2) 如果此结构参数与 E_1 负相关, 则归一化后的结构参数 $f_n(x)$ 为

$$f_n(x) = \frac{f_{\max} - f(x)}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (13)$$

由 2.1 节可知, r 与 E_1 负相关, 所以其归一化按式(13)进行, R 与 E_1 正相关, 所以归一化按式(12)进行. 由于 h 与 E_1 既不正相关也不负相关, 按式(12)和式(13)处理均可, 本文采用的是式(13). 作为输入向量的各均压环参数 $[f_{\max}, f_{\min}]$ 如表 1 所示. 对于输出场强值的归一化处理, 按式(12)处理, 其 $[f_{\max}, f_{\min}]$ 由通过有限元方法得到的用于训练的样本所对应的 E_1 及 E_2 来确定, 其中 E_1 的变化区间选为 $[0.1, 2.5]$ kV/mm, E_2 的变化区间选为 $[0.1, 3.1]$ kV/mm.

表 1 均压环结构参数变化区间
Tab. 1 The range of the parameters of the corona ring

结构参数	不考虑杆塔横担	考虑杆塔横担
R /mm	[90, 255]	[90, 120]
r /mm	[10, 24]	[30, 38]
h /mm	[-10, 30]	[-10, 10]

由于将均压环的参数和输出场强值归一化到 $[0, 1]$ 区间里, 因此, 隐层和输出层的激活函数选为 Sigmoid 函数

$$f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad (14)$$

隐层神经元的个数按 $2N+1$ 规则选取 (N 为输入层的节点数), 文中隐层神经元个数为 7 个. 网

络的训练算法选为 LM (Levenberg-Marquardt) 学习算法, 实践证明, 采用 LM 算法速度可以较原来的梯度下降法提高几十甚至上百倍^[13], 同时, LM 算法也优于高斯-牛顿法^[13].

为获得包含最大信息量的神经网络训练和验证样本, 需要对这些样本的获取方法进行设计, 本文选用的是中心组合试验设计 (又称为 Box-Wilson 设计)^[14] 方法. 对考虑杆塔横担和不考虑杆塔横担的神经网络分别选取了 200、100 个训练样本和 30、20 个验证样本进行训练和验证. 结果表明, 在训练情况下, 网络均能良好收敛, 最大训练误差分别在 10^{-5} 和 10^{-4} 以下, 网络验证结果的最大误差分别为 0.8% 和 1.0%, 可见, 此网络可用于各均压环参数下 E_1 和 E_2 的计算.

3.3 优化结果

利用训练和验证后的神经网络对各参数以 1mm 为步长计算出均压环各参数下的 E_1 和 E_2 , 找出满足 E_2 小于 2.2kV/mm 条件下, E_1 趋于最小时对应的结构参数, 此结构参数就是均压环结构参数的最优方案. 优化结果为:

(1) 不考虑杆塔横担影响时, 均压环结构参数最优方案是分别取 $R=90$ mm、 $h=23$ mm 和 $r=24$ mm. 此时, E_1 为 0.3362kV/mm, 小于绝缘子表面电晕起始场强; 而 E_2 为 0.857kV/mm, 此值亦在均压环的电晕起始场强 2.2kV/mm 之下.

(2) 考虑杆塔影响时, 均压环结构参数最优方案是分别取 $R=100$ mm、 $h=30$ mm 和 $r=38$ mm, 此时 E_1 为 0.43kV/mm, 小于绝缘子表面电晕起始场强; 而 E_2 为 1.84kV/mm, 此值亦在均压环的电晕起始场强 2.2kV/mm 之下.

4 结论

(1) 本文采用渐进边界条件处理 230kV 合成绝缘子沿面电场计算的开域问题, 利用有限元方法分别计算出考虑杆塔影响与不考虑杆塔影响时合成绝缘子均压环结构参数与绝缘子沿面电场分布的关系, 以此确定均压环结构参数的优化目标为绝缘子沿面最大电场强度趋于最小, 且均压环表面最大电场强度小于均压环电晕起始场强.

(2) 采用神经网络方法处理均压环结构参数的优化问题, 建立均压环优化神经网络模型, 解决了穷举法计算时间冗长的问题, 并分别得到考虑杆塔影响与不考虑杆塔影响时的均压环最优结构参

数。计算结果表明,优化后的均压环使均压环表面场强和绝缘子沿面场强均小于电晕起始场强。

(3) 合成绝缘子均压环结构参数优化过程表明,这种方法还可以运用到更高电压等级合成绝缘子均压环结构参数最优方案的求取过程中。

参考文献

- [1] 梁曦东, 戴建军, 周远翔, 等. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 110-114.
Liang Xidong, Dai Jianjun, Zhou Yuanxiang *et al.* Ultrasonic detection on crack of FRP rod in brittle fracture of composite insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 110-114.
- [2] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.
Sun Caixin, Shu Lichun, Jiang Xingliang *et al.* AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120.
- [3] 司马文霞, 蒋兴良, 武利会, 等. 低气压下覆冰染污 10kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 122-126.
Sima Wenxia, Jiang Xingliang, Wu Lihui *et al.* DC electric performance of icing and polluted 10kV composite insulator at low atmospheric pressures[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 122-126.
- [4] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] 张国强, 张元录, 崔翔. 高压套管均压球电极形状优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 37-40.
Zhang Guoqiang, Zhang Yuanlu, Cui Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 37-40.
- [6] Chen Q, Konrad A. A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems [J]. IEEE Trans. on Magn., 1997, 33(1): 663-676.
- [7] 王颖, 马西奎, 邱关源. 渐近边界条件在轴对称无界高压静电场计算中的应用[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 37-40.
Wang Ying, Ma Xikui, Qiu Guanyuan. The application of the asymptotic boundary condition technique in the numerical analysis of axisymmetrical unbounded high-voltage static field[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 37-40.
- [8] 韩社教, 戴栋, 马西奎, 等. 应用有限元法计算氧化锌避雷器电位分布[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 105-108.
Han Shejiao, Dai Dong, Ma Xikui *et al.* Calculation of potential distribution for zinc-oxide surge arrester by finite element method [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 105-108.
- [9] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 39-42.
Mao Fenglin, Wang Xuesong. Effects of grading ring of polymer insulator on the field distribution[J]. High Voltage Technology, 2000, 26(4): 39-42.
- [10] Ahmad A S, Ghosh P S, Aljunid S A K *et al.* Modeling of various meteorological effects on contamination level for suspension type of high voltage insulators using ANN[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Asia Pacific, IEEE/PES, 2002, 2: 6-10.
- [11] 张国江, 邱家驹, 李继红. 基于人工神经网络的电力负荷坏数据辨识与调整[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 104-107.
Zhang Guojiang, Qiu Jiaju, Li Jihong. Outlier identification and justification based on neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 104-107.
- [12] 谢开贵, 李春燕, 周家启. 基于神经网络的负荷组合预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 85-89.
Xie Kaigui, Li Chunyan, Zhou Jiaqi. Research of the combination forecasting model for load based on artificial neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 85-89.
- [13] Hagan M T, Menhaj M B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm[J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1994, 5(6): 983-993.
- [14] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

收稿日期: 2005-03-20。

作者简介:

司马文霞 (1965-), 博士, 教授, 博士生导师, 从事高电压输电技术、外绝缘技术及电力系统过电压研究。