

特高压交流套管尾部均压球结构优化研究

刘鹏, 冯勇, 张施令, 彭宗仁

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对套管尾部均压球表面电场分布不均匀、容易发生电晕及绝缘介质击穿的问题,应用三维有限元法,对特高压交流套管的电位电场分布进行了仿真计算,得出套管尾部均压球表面的电场分布不均匀,上、下段弧面的场强较高,中间区域的场强较低.分析了均压球的结构参数对其表面电场分布的影响,并以此确定了均压球结构优化的目标函数.在此基础上,利用神经网络拟合了均压球结构参数与优化目标之间的关系,得到了均压球结构参数的最优解.通过对特高压交流变压器套管尾部均压球结构优化,均压球表面最大电场强度降低了20%,均压球表面电场分布更加均匀,提高了套管尾部闪络电压,且结构简单、易于生产.

关键词: 特高压;均压球;电场分布;神经网络;优化

中图分类号: TM854;TM726.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0088-05

Optimization for Ultra-High Voltage AC Bushing Screening Electrode Structure

LIU Peng, FENG Yong, ZHANG Shiling, PENG Zongren

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the uneven electrical distribution on screening electrode of ultra-high voltage AC bushing, hence often leading to corona and dielectric puncture, the electric field and voltage distribution of ultra-high voltage AC bushing are evaluated with 3D FEM. It is found that the field strength on the upper and lower arcs of the screening electrode gets higher, but on the intermediate region gets lower. By changing the structure parameters of screening electrode, the influences of shape of the electrode on electric field distribution are analyzed, and the optimization objective function is established accordingly. The neural network model is constructed to map the structure parameters of screening electrode on the optimal goal. As a result, the maximum electric field strength decreases by 20%, electric field distribution becomes more uniform, and the flashover voltage of bushing is heightened. The structure of the optimized screening electrode is simple and easy to be produced.

Keywords: ultra-high voltage; screening electrode; electric field distribution; neural network; optimization

高压套管是电力系统中关键的电气设备,当高压载流导体需要穿过与其电位不同的金属箱壳或墙壁时,使用套管可以降低电场集中程度^[1].按绝缘结构的不同,高压套管分为单一绝缘套管(纯瓷套管)、复合绝缘套管(充油套管、充气套管)和电容式套管.

电容式套管是目前超、特高压系统中最常用的形式,在导杆和法兰之间加一个电容芯子做为内绝缘,电容芯子中有多层金属极板,以强迫控制套管内部和表面的电场均匀化^[2].

电容式高压套管是一种典型的绝缘结构,若设

计不合理,容易产生闪络放电. 为了防止套管尾部连接金具的电晕放电,需要安装均压球来屏蔽电场. 目前,高压套管的内、外绝缘结构设计的基本方法和原理是相同的,但是高压套管及均压球的形状和尺寸有较大的差别. 在设计时,希望套管的均压球具有最佳的电极形状,使其表面的电场强度小于局部放电的电场强度值. 同时,为了便于工程制造,均压球结构应尽量简单.

由于均压球形状因素对电场分布影响的随机性和复杂性,很难建立起确切的模型和算法来研究均压球形状改变对其表面电场分布的影响. 针对以上问题,本文应用有限元数值计算和人工神经网络方法,研究了高压套管均压球结构参数与其表面电场分布的关系,并给出了合理的均压球结构参数.

1 高压套管电场计算

1.1 有限元方法在高压套管电场计算中的应用

有限元方法是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法. 它首先利用变分原理把所要求解的边值问题转化为相应的变分问题,也即泛函的极值问题,最后归结为一组多元代数方程组,求解该方程组即得待求边值问题的数值解.

在静电场计算中,各相同性、线性、均匀的介质,其电位 φ 满足泊松方程或拉普拉斯方程. 在不同介质的分界面上,场量之间应满足如下边界条件

$$\varphi_1 = \varphi_2 \tag{1}$$

$$\epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{n}} = \epsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{n}} \tag{2}$$

式中: φ_1, φ_2 为电位函数; ϵ_1, ϵ_2 为电介质的相对电容率; $\mathbf{n}$ 为交界面的外法线方向. 此时在整个计算场域内,静电场的边值对应的变分问题就是求泛函的极小值

$$F(\varphi) = \sum \left[\frac{1}{2} \int_{\Omega} (\epsilon |\nabla \varphi|^2 - 2\rho\varphi) d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \epsilon f_1(P) \varphi^2 d\Gamma + \int_{\Gamma} \epsilon f_2(P) \varphi d\Gamma \right] \tag{3}$$

式中: Ω 为 φ 的定义域; Γ 是定义域的闭合边界. 根据高压套管的电场分布特点,其求解又可归结为二维轴对称静电场的边值问题,即

$$\left. \begin{aligned} \min F(\varphi) &= \pi \epsilon \iint_S \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz \\ \varphi|_{l_1} &= U \\ \varphi|_{l_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中: S 为高压套管的轴截面.

利用剖分插值方法把变分问题离散化为一多元函数的极值问题,从而导出有限元方程. 然后,对平面域 S 进行剖分,并在每个单元内把电位的函数用插值多项式近似表示,则式(3)的变分问题在整个场域内可表示为

$$F(\varphi) \approx F(\tilde{\varphi}) = \sum_{i=1}^m F_i(\tilde{\varphi}^e) = \sum_{i=1}^m \pi \epsilon \int_{S_i} r \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_{i=1}^{n_0} N_i^e \varphi_i \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\sum_{i=1}^{n_0} N_i^e \varphi_i \right) \right)^2 \right] dS \tag{5}$$

令 $F(\varphi)$ 对 φ 的导数等于 0,由式(5)可得到 φ_i 的线性代数方程组 $\sum_{j=0}^{n_0} K_{ij} \varphi_j = 0 \ (i=1, 2, \dots, n_0)$,其中系数矩阵 $\mathbf{K}$ 又称为刚度矩阵,再利用边界条件,就可以求出每个节点的电位,进而求得电场^[3-6].

1.2 电场计算

特高压交流油纸绝缘电容式套管的有限元计算模型如图 1 所示,由中心导电杆、电容芯子、保护层、变压器油、瓷件以及均压球和连接附件组成.

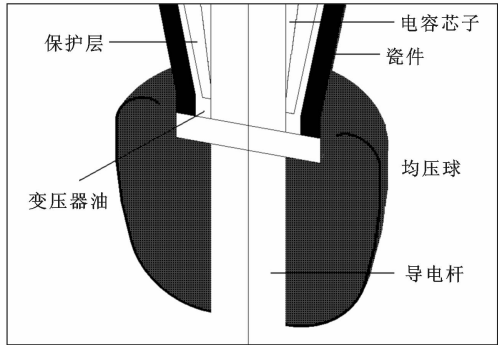


图 1 有限元计算模型

计算时,加载电压为 1 000 kV,交流系统最高运行相电压的有效值为 $1\ 100\ \text{kV}/3^{1/2} \approx 635.085\ \text{kV}$. 通过仿真计算,得到了特高压交流套管尾部和均压球表面的电场分布规律,计算结果如图 2、图 3 所示.

图 2 给出了套管尾部电场分布情况,根据计算结果可得套管端部金属底座、载流端子板等结构处于均压球形成的低场强区域内,受到了良好的屏蔽. 结合均压球表面电场分布(见图 3),横坐标起止表示从均压球上弧面端部至下弧面端部)可以看出:特高压交流套管尾部均压球附近的电场分布比较集中,其电场强度极大值点出现在均压球上弧面外侧,场强值约为 4.5 MV/m,均压球下弧面外侧的电场强度也较高,均压球中部弧面的场强相对较低.

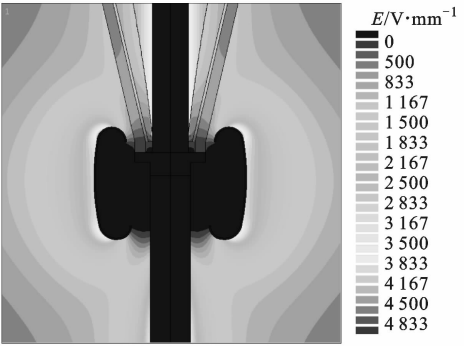


图 2 套管尾部电场分布

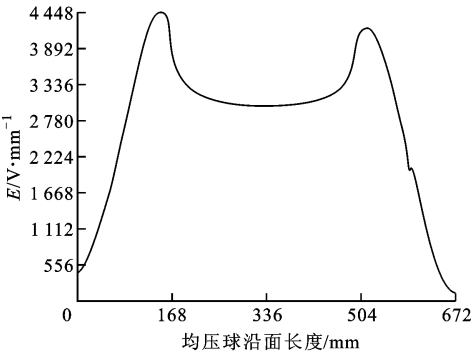


图 3 均压球表面电场分布

根据以上分析发现,均压球表面电场分布不均匀,这样会导致均压球表面有缺陷时可能发生局部放电.此外,由于均压球外侧油中的径向场强较高,变压器油中杂质容易沿场强较高的路径上定向极化,形成杂质“小桥”,从而引发油中的局部放电,严重时会导致均压球和换流变压器升高座之间油隙的击穿.因此,为了防止均压球表面电晕,提高变压器油的击穿电压,有必要对均压球结构形状进行优化,降低其表面电场强度,改善其电场分布情况.

2 均压球结构优化

高压套管均压球电极形状优化属于随机性优化问题.目前,随机性优化方法有遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、禁忌算法以及人工神经网络算法等.这些优化算法各有特点,本文采用人工神经网络算法来对均压球电极结构进行优化.

2.1 人工神经网络

人工神经网络(ANN)简称神经网络,它用大量简单的处理单元广泛连接组成的复杂网络,主要采用并行和自适应的信息处理方式,是对人脑神经网络的某种简化、抽象和模拟.这种网络依靠系统的复杂程度,通过调整内部大量节点之间相互联系的

关系,从而达到处理信息的目的.人工神经网络具有自学习和自适应的能力,可以通过预先提供的一批相互对应的输入、输出数据,分析两者之间潜在的规律,最终根据这些规律,用新的数据来推算输出结果.

人工神经网络所应用的领域与其本身所具有的能力,特别是其所具有的计算机能力密切相关.神经网络的计算能力很明显有以下两个特点:一是大规模并行分布式结构;二是神经网络学习能力以及由此而来的泛化能力.目前,神经网络的主要应用领域有模式识别、最优化问题计算、自动控制、信号处理、图像处理、人工智能等.

本文研究中选取了目前发展比较成熟、应用较为广泛的反向传输(BP)神经网络算法对高压套管均压球形状进行优化. BP 算法的学习过程有信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成.正向传播时,输入样本从输入层传入,经各隐含层逐层处理后,传向输出层.若输出层的实际输出与期望的输出不符,则转入误差的反向传播阶段.误差反传是将输出误差以某种形式通过隐含层向输入层反传,并将误差分摊给各层的所有单元,从而获得各层单元的误差信号,此误差信号作为修正各单元权值的依据.这种信号正向传播与误差反向传播的各层权值调整过程是周而复始地进行的,权值不断调整的过程也就是网络学习训练过程.学习过程一直进行到网络输出的误差减少到可接受的程度,或进行到预先设定的学习次数为止^[7-10].

2.2 数学模型

高压套管均压球的典型结构如图 4 所示.为了便于制造和减少待优化变量,均压球的形状采用上下对称的形式.设计中,均压球直径不变,上弧面的高度已知,即点 A 和 C 的坐标是给定的,点 B 的纵坐标已知,横坐标在点 A 和 C 之间变化.曲线 ABC 即为待优化的均压球形状,它由有限个圆弧段构成.

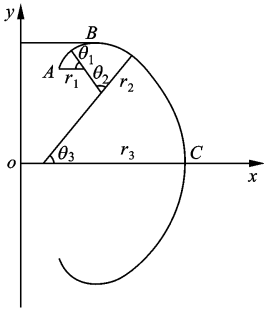


图 4 高压套管均压球典型结构

均压球形状优化的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \min f(x), \quad x &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s. t. } h_j(x) &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: x_k 为第 k 个设计变量, 表示各段圆弧尺寸。

如图4所示, 由于上下对称, 所以只取均压球的上半部分作为研究对象。假设均压球上半部分由 n 段规则圆弧组成, 每段圆弧半径为 r_i , 每段圆弧圆心角为 θ_i 。起始点 A 的坐标为 (x_1, y_1) , 均压球轮廓上每段元素的几何尺寸 (r, θ) 变换成直角坐标系上的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + r_i \left(\cos \left(\sum_{j=1}^{i-1} \theta_j \right) - \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right) \\ y_i &= y_{i-1} - r_i \left(\sin \left(\sum_{j=1}^{i-1} \theta_j \right) - \sin \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

本文优化的目标函数

$$f(x) = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) \quad (8)$$

式中: $f_1(x)$ 为均压球表面的最大电场强度, $f_1(x) = E_{\max}$; $f_2(x)$ 为均压球表面电场强度的平均值,

$$f_2(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i|, \quad n \text{ 为均压球表面的单元数, } E_i$$

为第 i 个单元的电场强度; ω_1, ω_2 为权系数, 用以表明上述两个场强值对绝缘设计的影响程度。一般来说, 优先考虑降低最大场强, 以有效避免均压球表面起晕, 进而引发油中击穿。降低平均场强可以改善其附近电场的畸变程度, 有利于提高油的击穿电压。

ω_1, ω_2 的选取来源于设计经验和各类试验结果, 本文中 $\omega_1/\omega_2 = 0.7/0.3$ 。

本文优化的约束条件:

(1) 当 $\sum_j \theta_j = 0$ 时, x_A, y_A 为给定值;

(2) 当 $\sum_j \theta_j = \frac{\pi}{2}$ 时, $x_A < x_B < x_C, y_B$ 为给定值;

(3) 当 $\sum_j \theta_j = \pi$ 时, x_C, y_C 为给定值。

2.3 基于 BP 神经网络的均压球形状优化

为了减少优化变量, 套管尾部均压球采用上下对称结构, 因此只需研究均压球上半部分形状对其表面电场分布的影响。

从理论上说, 由多段不同曲率半径的圆弧光滑过渡而形成的均压球, 其表面电场强度的均匀性更好。在其他研究中, 作者曾对 500 kV 电压等级的套管及尾部均压球进行过设计计算与试验, 结果表明: 由 8~10 段圆弧光滑过渡形成的均压球, 球表面起晕电压均较高; 虽然增加多段圆弧, 其表面场强的均

匀性会进一步提高, 但对于提高球表面起晕电压贡献较小, 且显著增加设计计算时间及增大了均压球的加工难度。结合文献[1]中提到 6 个圆弧段可以达到较好的效果, 又考虑到本文研究的均压球上下对称, 因此选取了 3 段圆弧。

均压球上半部分由 3 段圆弧组成, 半径分别为 r_1, r_2 和 r_3 , 圆弧角度分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 , 利用坐标变换方程式(6)和约束条件可以求出满足条件的解。通过编程, 给定相应的圆弧角的度数就可以自动地计算出圆弧段的半径。另外 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \pi$, 所以 6 个优化变量可简化为 2 个。

图5为建立的特高压交流变压器出线套管尾部均压球形状优化 BP 神经网络模型, 以 θ_1, θ_2 作为输入变量, 以式(7)所示的目标函数作为输出变量, 即用于均压球形状优化的 BP 神经网络有两个输入、一个输出。

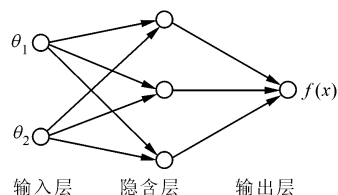


图5 均压球优化 BP 神经网络模型

为了获取包含最大信息量的神经网络训练和验证样本, 本文选用中心组合试验设计方法获取样本。选取根据有限元仿真计算得到的 70 组数据作为 BP 神经网络训练样本和 20 组验证样本进行训练和验证。根据训练样本, 神经网络进行学习训练, 当误差代价函数达到预期的目标值或者预先确定的学习迭代时, 网络就终止训练。结果表明, 在训练情况下, 网络能良好收敛, 最大训练误差在 10^{-3} 以下, 网络验证结果的最大误差为 1.5%, 由此可见 BP 神经网络用于计算各均压球参数下电场强度的有效性。

因此, 利用经过训练的神经网络, 计算所有满足条件的数据, 得到最优解

$$\begin{cases} r_1 = 477 \text{ mm}, & \theta_1 = 6^\circ \\ r_2 = 11 \text{ mm}, & \theta_2 = 123^\circ \\ r_3 = 267 \text{ mm}, & \theta_3 = 51^\circ \end{cases}$$

根据神经网络优化参数, 并考虑到工艺中便于均压球的加工制造与安装, 特高压套管尾部均压球选取 $r_1 = 480 \text{ mm}, \theta_1 = 10^\circ, r_2 = 15 \text{ mm}, \theta_2 = 120^\circ, r_3 = 260 \text{ mm}, \theta_3 = 50^\circ$ 。

利用有限元方法进行仿真计算, 均压球电场分

布如图6所示,优化后的均压球沿面电场强度分布如图7所示.从计算结果可以看出,优化后的特高压套管尾部均压球表面最大场强约为3.6 MV/m,最大场强位置出现在均压球的顶部弧面与底部弧面,与原设计方案最大场强4.5 MV/m相比下降了20%.同时,均压球中部表面电场强度约为3.3 MV/m,与顶部、底部弧面的场强比较接近,与优化前相比,均压球表面电场分布均匀化,优化效果明显.

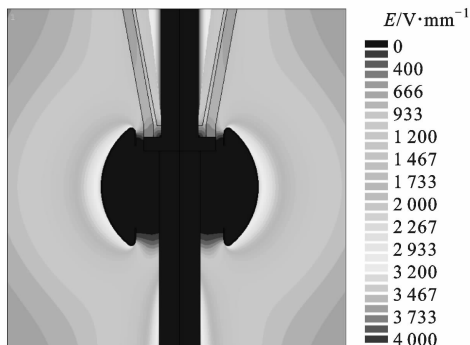


图6 均压球结构优化后套管尾部电场分布

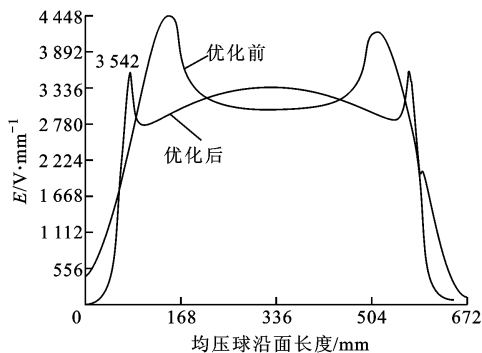


图7 优化后均压球表面电场分布

采用本文方法优化设计的均压球,已经在我国1100 kV油纸电容式变压器套管和1100 kV油气套管的设计中应用,并配合特高压套管顺利完成了型式试验的全部项目.

3 结 论

通过对交流1100 kV特高压油纸电容式套管的电场计算和分析,应用神经网络对套管尾部均压球结构形状进行优化,得到以下结论:

(1)特高压交流变压器套管尾部,特别是均压球附近的电场分布比较集中,可能引起局部放电,甚至导致绝缘介质的击穿;

(2)套管尾部均压球表面的电场分布不均匀,

上、下段弧面的场强较高,中间区域的场强较低;

(3)采用人工神经网络方法处理均压球结构参数的优化问题,建立了均压球优化的神经网络模型,结果表明,优化后的均压球表面电场分布更合理.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理:下册[M]. 北京:机械工业出版社, 1992: 88-108.
- [3] 杨喜乐,盛剑霓,居季春. 高压套管尾部的优化设计[J]. 高压电器, 1988(1): 8-13.
YANG Xile, SHENG Jianni, JU Jichun. Optimal design on the end of high voltage bushing[J]. High Voltage Apparatus, 1988(1): 8-13.
- [4] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 19-30.
- [5] 江汛,王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-21.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-21.
- [6] 徐建源,路璐,林莘. 1100 kV GIS隔离开关的电场数值计算与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2102-2106.
XU Jianyuan, LU Lu, LIN Xin. Numerical analysis of electric field of 1100 kV disconnector in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2102-2106.
- [7] OKUBO H, OTSUKA T, KATO K, et al. Electric field optimization of high voltage electrode based on neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 12(4): 1413-1418.
- [8] KIM E S. Electric field optimization using NURB curve and surface[J]. Trans of IEEJ, 1993, 113(10): 1081-1087.
- [9] RUMELHART D E. Learning representations by back propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(9): 533-536.
- [10] MALIK N H. A review of the charge simulation method and its application[J]. IEEE Trans on Elect Insul, 1989, 24(1): 3-20.

(编辑 杜秀杰)