

文章编号: 1000-582X(2012)04-019-07

均匀场域中工频电场畸变效应分析

张占龙¹, 胡平¹, 李敬雄², 彭孟杰¹, 周军², 黄嵩¹, 唐炬¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 四川自贡电业局, 四川自贡 643000)

摘要:空间电场测量时,因电场传感器探头被引入到测量域中,探头附近的电场将发生畸变,而影响电场测量精度。以球形探头为研究对象,利用分离变量法分析了均匀电场中引起电场畸变的影响因素,具体分析了 10 kV 电压下,球形传感器探头尺寸、电极材质以及测量电极的极间耦合对电场畸变的影响。根据传感器感应电压与电场强度大小成线性关系,利用影响因子矩阵对电场畸变进行了校正分析。分析结果表明,在均匀电场中探头附近和主电极与副电极之间产生较严重的电场畸变,平均畸变率在 27% 以上;利用影响因子矩阵对电场畸变进行校正后平均误差为 4.47% 左右。通过对球形探头传感器在均匀场域中的工频电场测量的畸变效应分析,有利于降低畸变对电场测量影响,提高电场测量的精确性。

关键词: 电场测量;畸变;工频电场;三维球形探头;测量电极

中图分类号: TM935.24

文献标志码: A

Analysis of power frequency electric field distortion effect on uniform electric field

ZHANG Zhan-long¹, HU Ping¹, LI Jing-xiong², PENG Meng-Jie¹,

ZHOU Jun², HUANG Song¹, TANG Ju¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Zigong Electricity Power Bureau of Sichuan, Zigong, Sichuan 643000, P. R. China)

Abstract: The electric field sensor for the measurement of electric field in the space where the sensor probe will cause distortion in the vicinity, so it will affect the measurement of electric field accuracy. This paper uses the separation of variables method to calculate the electric field distortion caused by spherical sensor probe in uniform electric field, and detailed analysis of the 10 kV voltage, the spherical probe size, electrode material and the measuring electrode pole coupling caused the impact of electric field distortion. According to the induced voltage of sensor and the linear relationship between electric field strength, using the impact factor matrix to correct the electric field distortion. The result shows that the vicinity of the probe and the primary measuring electrodes and sub-electrodes measuring produce more serious distortion in the uniform

收稿日期: 2011-09-30

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)资助项目(2009CB724506);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2011jjA2000g);中国电机工程学会电力青年科技创新项目(QNXM08-24);重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设资助项目(No. S-09111)

作者简介: 张占龙(1971-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事电磁兼容与故障检测、数字仪器设备、计算机测量与控制研究。(E-mail)zhangzl@cqu.edu.cn.

electric field. The average distortion rate is more than 27%; however, after the impact factor matrix is used to correct the electric field distortion, the average error is about 4.47%. By analysis of the measurement of the electric field distortion with the spherical probe of sensor, it is conducive to reduce the impact of distortion on the electric field measurement and to improve the accuracy of field measurement.

Key words: electric field measurement; distortion; power frequency electric; three dimensional probe; measuring electrode

在电力系统中, 电场传感器具有广泛的应用, 如变电站工频电场测量^[1-2]、输电线路电场测量^[3]、故障诊断^[4,5]、电场环境测量^[6]等起着检测电气设备周围电场的分布及其变化的作用, 对电力设备的设计及安全运行具有十分重要的意义。目前, 电场测量常用方法采用电容式探头法^[7], 该结构的电场传感器具有测量方便、费用低、具有良好的抗过载保护等特点^[8]。在电容式探头法中, 有的采用光纤作为球形电场传感器传输媒介^[9], 虽然光纤的隔离作用使得采集信号不会产生较大畸变, 但其没有考虑到测量探头处于测量域中, 将会影响场域电场的均匀度和原场域电力线的分布变化, 从而产生畸变电场, 影响测量精度; 有的采用平行板三维电场传感器^[10], 通过对三维天线的极间耦合、三维场分量的合成与频率特性的分析, 提出了测试设备对被测场具有干扰作用, 而引起畸变电场, 但没有考虑畸变量对被测场的影响, 导致电场测量精度不高。

针对电场测量时传感器探头在场域中引起电场畸变问题, 笔者主要围绕均匀工频电场环境, 采用分离变量法计算了球形探头在均匀场域中引起的电场畸变量, 以及对三维球形传感器在测量中的不同探头大小、电极材质及测量电极的极间耦合等因素引起的畸变电场进行了仿真分析。依据传感器感应电压与电场强度大小成线性的关系, 采用影响因子矩阵校正法对测量场强进行了校正分析研究, 利于降低畸变对电场测量影响, 从而提高球形电场传感器测量系统的精确度。

1 测量探头模型

文献[7]给出了三维传感器探头模型, 如图 1 所示。探头由相互绝缘的六个对称电极构成。由于探头直径尺寸与场域覆盖截面尺寸相对比趋向于零, 从而使得探头电极表面上的感应电流密度易于精确计算。球形探头的三维电极分别与直角坐标系中的 3 个坐标轴相对应, 设探头的半径为 r_0 , 测量半球电极表面积为 S 。当传感器探头处于被测场域中, 由静电感应原理, 电极上产生感应电荷。根据高斯定理, 半球表面的电荷面密度为 σ 与电场强度 E 的关

系为

$$\oiint E \cdot dS = E \cdot \Delta S = \frac{\Delta S \cdot \sigma}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2)$$

即穿过闭合曲面 S 的电通量等于 S 曲面内所包含电荷总电量除以电介质常数, ϵ_0 为空气的电介质常数。所以测量电极上的感应电荷为

$$Q = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \sigma \cdot R^2 \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (3)$$

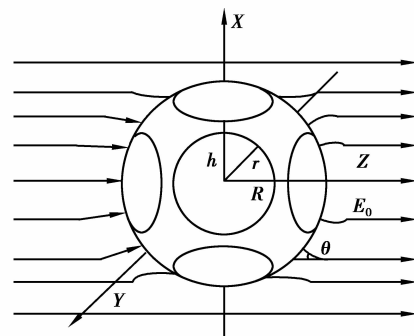


图 1 三维球形传感器模型

感应电荷将在极板上产生压降, 通过测量此电压信号, 根据电压与外电场的关系, 可获得被测场域的电场强度。

2 理论分析和计算

任何一种导体处在某一电场中, 电场就会引起该导体表面电荷的移动。同样导体上所带的电荷也产生一个场, 这个电场叠加在原来的电场上, 改变了导体附近的整个电场, 这时导体周围的场称为“畸变电场”^[11]。在电场测量中由于传感器的引入势必将引起电场的畸变, 假设有一无穷大的均匀场, 介电常数为 ϵ_1 , 电极的电介质为 ϵ_2 , 电场强度为 E , 将球形传感器置入均匀场中。此时传感器测量探头球内和球外电位由两部分的电位叠加而成^[12]

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_0 + U_{1a} \\ U_2 &= U_0 + U_{2a} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, U_1 、 U_2 分别为球内和球外电位; U_0 为无传感器时均匀电场的电位; U_{1a} 、 U_{2a} 分别为球内和球外的感应电场产生的畸变电位。因此对于电场畸变的分析主要是指求解畸变电位值 U_{1a} 和 U_{2a} [18]。

当传感器在测量电场中,球面上感应电荷分布不在变化时,导体中各处的电位达到稳定,外部空间电场的电势分布满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0. \quad (5)$$

设 Q 是球外空间的任意一点, r 为坐标原点到 Q 点的矢径, r 与 Z 轴的夹角为 θ , 则空间外任意一点电位的拉普拉斯方程形式为 [13]

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (6)$$

在球坐标系中感应电位的极限条件为: 1) 当 $r=0$ 时, 球内电位 $U_2 \rightarrow 0$; 2) 当 $r \rightarrow \infty$ 时, 球外电位为均匀场 $U_1 = -Er \cos \theta$; 3) 球面上电荷感应强度的法线分量连续, 球体分界面上电位相等, 即

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \\ \epsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial r} = \epsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial r} \end{cases} \quad (r=r_0).$$

若均匀电场 E_0 与球坐标的极轴 Z 方向相一致, 则由对称性知 U 与 φ 无关, 式(6)简化为

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) = 0. \quad (7)$$

将函数 $U(r, \theta)$ 分离变量, 设 $U(r, \theta) = R(r)\Theta(\theta)$, 代入(7)式可得

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \Theta \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \left(R \sin^2 \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) = 0. \quad (8)$$

将上式两端同时除以 $R(r)\Theta(\theta)$, 则可分为以下两个方程 [14]

$$\frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin^2 \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \mu \Theta = 0. \quad (9)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \mu R = 0. \quad (10)$$

其中的 μ 为常数。

令 $x = \cos \theta$, $y(x) = \Theta(\theta)$, 则(9)式可化为勒让德方程 [15]

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dy}{dx} \right] + \mu y = 0, \quad -1 \leq x \leq 1. \quad (11)$$

其中 μ 满足在有限区域内电势处处有限的条件为 $\mu = n(n+1)$, $n=1, 2, \dots$ 这时方程(10)和式(11)可化为

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - n(n+1)R = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dy}{dx} \right] + n(n+1)y = 0 \quad (13)$$

上面两方程的通解分别为

$$\begin{cases} R(r) = Ar^n + B \frac{1}{r^{n+1}}, (A, B \text{ 为任意常数}). \\ y(x) = P_n(x), \text{ 或 } \Theta(\theta) = P_n(\cos \theta), n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (14)$$

因此, 方程(7)式在有限区域 ($r_0 < r$) 中有界的特解为

$$U_n(r, \theta) = \left(Ar^n + B \frac{1}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos \theta), n = 0, 1, 2, \dots. \quad (15)$$

将同时满足式(15)条件的所有特解叠加, 得电势分布的通解

$$U(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n r^n + B_n \frac{1}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos \theta), \quad n = 0, 1, 2, \dots. \quad (16)$$

其中 A_n 、 B_n 是待定常数。根据感应电位的极限边界条件, 可有求得

$$U_1 = -\frac{3\epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} Er \cos \theta. \quad (17)$$

$$U_2 = -Er \cos \theta - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \frac{r_0^3}{r^2} E \cos \theta. \quad (18)$$

其中球外电位 $\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \frac{r_0^3}{r^2} E \cos \theta$ 为球形传感器在测量场中引起的畸变电场而产生的畸变电位。可见对于测量时引起的电场畸变主要与传感器探头的大小、测量距离以及电介质系数等因素有关。

3 电场畸变计算分析

根据上述分析可知在均匀场域中的工频电场所产生的电场畸变主要与传感器测量探头的大小、探头电极的材质有关, 此外由于极间耦合效应影响与传感器探头极间耦合有关。主要以 40 kV/m 的均匀工频电场中测量为例, 着重分析上述三个方面引起的电场畸变情况。

3.1 探头空间占位性的畸变分析

传感器探头在场域中引起的电场畸变主要是由于探头的空间占位性而产生的。当传感器置于被测场域中时, 将会影响场域电场的均匀度和原场域电力线的分布变化, 使传感器探头周围电场发生畸变。图 2 为电场传感器测量时在场域中的电场畸变, 图 3 和图 4 分别是直径为 30、100、200 mm 的探头在均匀电场中横向和纵向不同距离处的电场畸变曲线分布图。在探头的横向距离 2 cm 处场强都在

46 kV/m 以上,而在纵向处的最小场强只有 0.5 kV/m 左右。在探头横向上探头越大,距离越近引起的电场畸变增加量越大;在探头纵向上探头越大,距离越近引起的电场畸变减小量越大。三种不同大小的探头在空间均匀电场的最大场强和平均畸变率如表 1 所示^[18]。

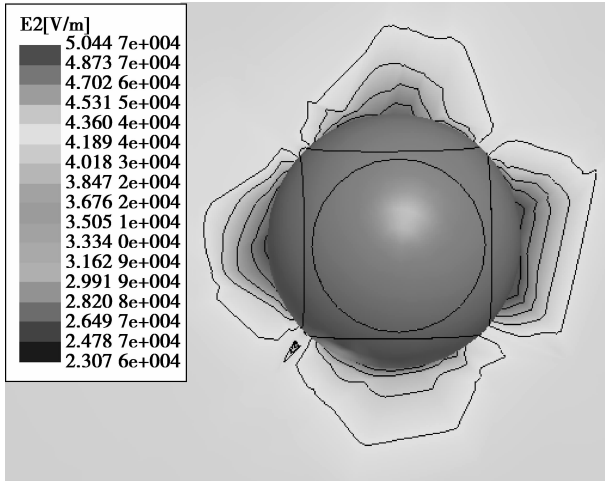


图 2 传感器测量的电场畸变

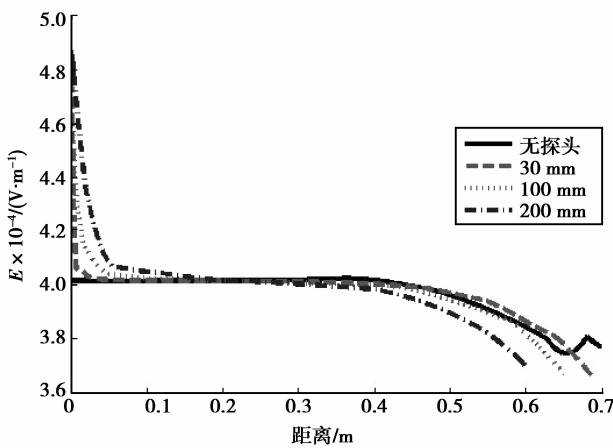


图 3 不同距离的横向电场畸变

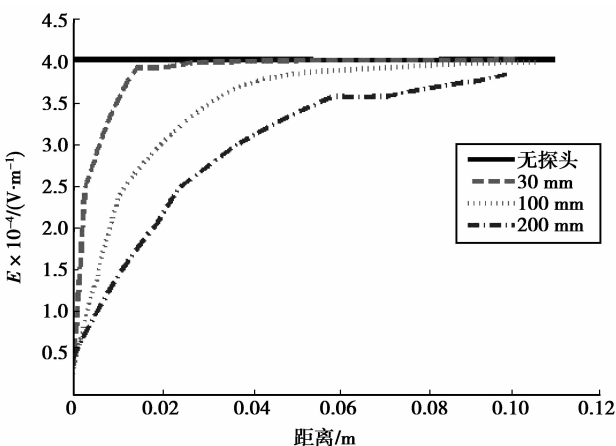


图 4 不同距离的纵向电场畸变

表 1 三种探头的最大场强和平均畸变率

探头直径大小 /mm	最大场强 / (kV · m ⁻¹)	平均畸变率 /%
横向	30	46.810
	100	48.776
	200	49.921
纵向	30	2.787
	100	2.44
	200	4.278

3.2 不同材料球体的畸变分析

不同电介质系数的材料所感应的电荷以及在电场中引起的极化不同,造成的电场畸变程度将不一样。在高压电场测量中,介质将发生极化,产生空间电荷。空间电荷的存在对周围电场产生畸变,从而导致电场分布发生改变,将对局部电场起到削弱或加强的作用。在强电场的作用下,介质球在均匀电场 E_0 中的极化强度为^[16-17]

$$P_0 = X_e \epsilon E_0 \quad (19)$$

其中 X_e 为比例因数, ϵ 为电介质。

为了分析不同的电介质系数对产生电场畸变的影响,采用铜球、塑料球和树脂球在均匀电场中进行仿真分析。结果如图 5 所示。

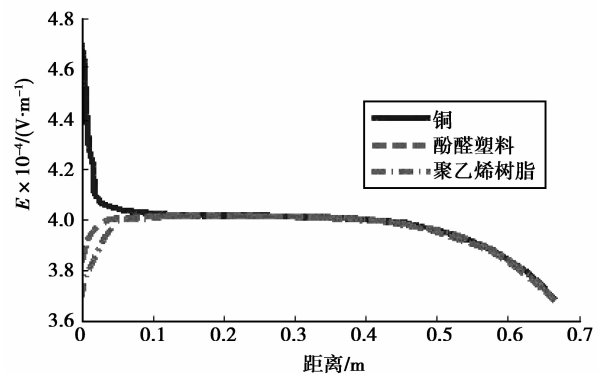


图 5 不同材料球体引起的电场畸变

从图中可知,铜球由于电阻小,且表面上具有感应电荷,在铜球体附近电场增大量大,最大电场强度约为 47 kV/m,电场畸变较严重;对于塑料球体和树脂球的电阻抗高,在球体附近电场变化不明显。

3.3 测量电极间耦合的畸变分析

对于三维球形探头的电场传感器,若将探头的

电极分别与坐标系的坐标轴相对应。如果入射电场只有 Z 轴方向上有电场,在理想情况下感应场也只存在于 Z 轴方向的电极上,其他两个方向上的感应电场都为零。实际情况下不仅 Z 轴方向上电极有感应场, X、Y 轴方向上的电极也有感应电场产生。

将球形传感器的每个电极看作是一个点,两点之间的直线表示相间的电容。由于极间耦合效应,相邻的电极间也构成一个极间电容,整个传感器的探头就构成了一个复杂的电容网络,如图 6a 所示。以 X-X' 是主测量电极, Y、Y'、Z、Z' 节点的电位将是相等的,可以得到相应的简化的等效电容网络模型,如图 6b 所示。假设主电极间电容为 C, 相邻电极间电容为 C₁, 则以 X-X' 为主电极测量时, 测量探头的固有等效电容 C_e = 2C₁ + C, 从而有 $U = \frac{Q}{C} +$

$\frac{Q}{2C_1}$, 测量电势增大了 $\frac{Q}{2C_1}$ 。

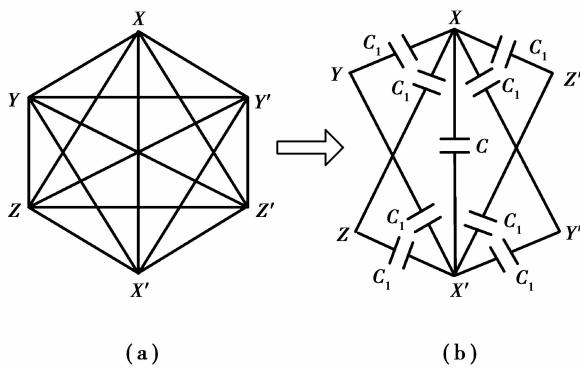


图 6 探头的等效电容网络模型

图 7 为测量电极间畸变的电场分布,图 8 为主电极与副电极、副电极与副电极间的电场曲线分布。由于极间耦合效应主电极与副电极间产生的电场畸变较大,最大畸变率可达 35%;副电极与副电极之间由于电极所感应的电荷量较少,产生畸变量相对较小。

4 电场畸变校正研究

在电场测量试验中,传感器探头的三维电极分别与直角坐标系中 X、Y、Z 轴相对应。在测量中得到三个方向的感应电压 U_x、U_y、U_z 分别对应 E_x、E_y、E_z。在实际测量中的值 U_x、U_y、U_z 每一个元素都包含有三个部分即探头在该方向上的基本单元自身的感应电压和其他两个基本单元的影响电压。由于探头所测得的感应电压与外界电场强度的大小成

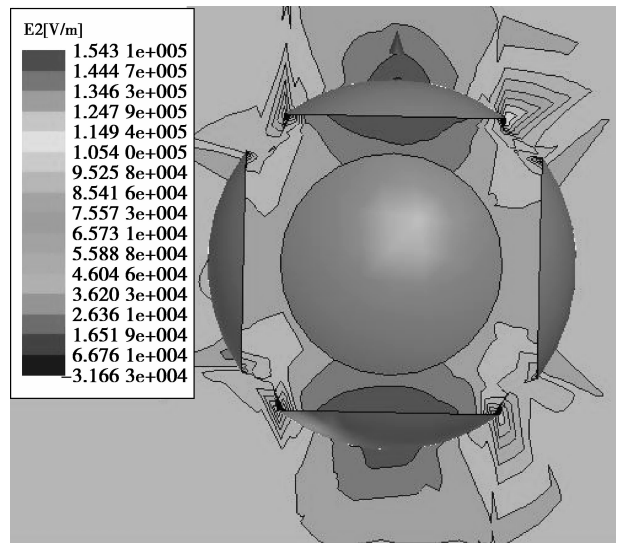


图 7 探头电极间畸变电场

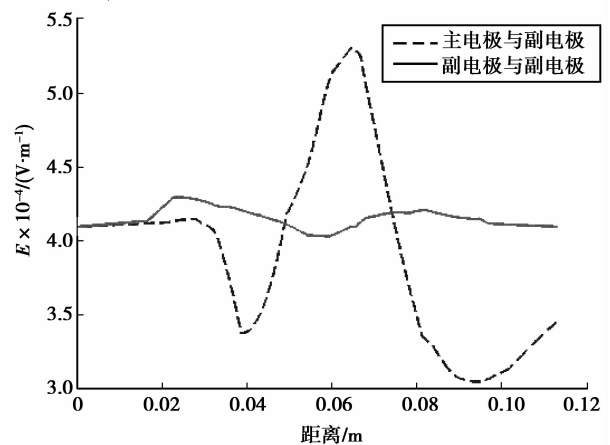


图 8 电极间的电场畸变

成正比,是一个线性的关系,可以把上述关系写成矩阵形式

$$\lambda * E = U \rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

式中 λ 为影响因子矩阵; E 为探头处的原始电场值; U 为探头的感应电压。

在均匀电场产生装置,电场值及其方向是可以唯一确定的,因此可以通过该单一方向的外加电场值分析三对电极分别为主电机时,求解影响因子矩阵里面的每一个元素对测量值的影响。

当外加电场方向是以探头 X-X' 方向为主时,可求得影响因子矩阵的第一列元素与 X 轴方向的电场值 E_x 与感应电压的关系为

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & 0 & 0 \\ \lambda_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{x1} \\ U_{y1} \\ U_{z1} \end{bmatrix}$$

同理可以求得以探头 $Y-Y'$ 、 $Z-Z'$ 方向为主时影响因子矩阵与 E_y 、 E_z 及感应电压的关系矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} 0 & \lambda_{12} & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 \\ 0 & \lambda_{32} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ E_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{x2} \\ U_{y2} \\ U_{z2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \lambda_{13} \\ 0 & 0 & \lambda_{23} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{x3} \\ U_{y3} \\ U_{z3} \end{bmatrix}$$

计算时由于初始时的测量精度不够,因此在计算影响因子时尽量取数值比较大的值,从而提高计算精度。为使测量值最大限度逼近真实值,通过对实际测量数据分析计算研究,可得到当探头直径为 30 mm 时的影响因子矩阵为

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0.011 & 912 & 0 & 0.008 & 206 & 0 & 0.008 & 816 & 0 \\ 0.008 & 847 & 4 & 0.011 & 273 & 0 & 0.008 & 380 & 5 \\ 0.008 & 433 & 2 & 0.008 & 699 & 3 & 0.011 & 969 & 0 \end{bmatrix}$$

在实际测量中根据该影响因子矩阵 λ 和测量的感应电压值 U ,利用方程 $\lambda * E = U$,从而可以得出探头处的电场值,而这个电场值也就是探头处原始电场值。图 9 为传感器探头为 30 mm 时的还原结果。

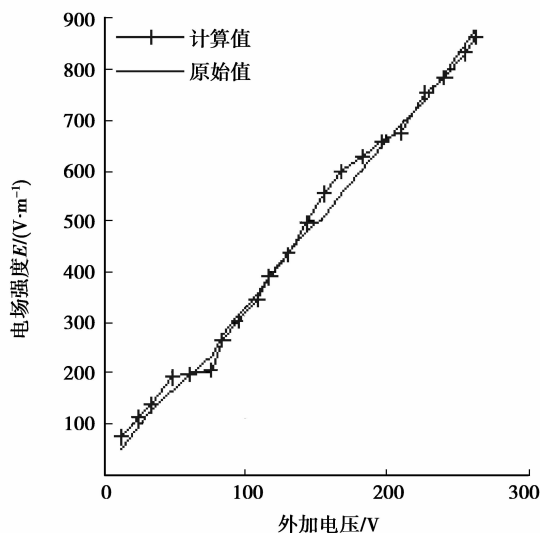


图 9 30 mm 探头电场畸变后的还原值

探头直径为 30 mm 时,还原后的电场值最大误差为 13%,其平均误差为 4.47%。因此采用该方法求的电场值可以作为最终测量的电场值,并可

近似的看作场域的原始电场值。可见利用影响因子矩阵法最大限度的还原了探头处的电场值,有利于降低畸变对电场测量的影响,提高了电场测量的精度。

5 结 论

1) 针对三维球形传感器在均匀工频电场中测量中引起的电场畸变情况进行了分析。

2) 在电场测量中由于各种因素的影响,使得被测电场产生畸变影响。特别是在传感器探头在引入被测场后,由于空间占位性、探头电极的材质和测量电极间的杂散电容的影响,使被测场发生畸变,对于实际测量的电场强度值为外电场和畸变场的叠加。

3) 在均匀电场中,在传感器探头的横向方向上探头越大,距离越近处电场畸变增量越大;对于探头纵向上探头越大,距离越近引起的电场畸减量越大。在主电极与副电极之间由于测量电极的极间耦合作用,使该处具有较大的畸变量产生。

4) 根据传感器获得的感应电压与外界电场强度的大小成线性的关系,利用影响因子矩阵法校正电场强度,使测量的电场强度最大限度逼近真实值。

5) 对于三维电场测量的畸变效应进行分析,有利于了解电场畸变对电场强度的影响,为今后传感器测量系统的标定研究作基础,对提高电场测量系统的精度。

参考文献:

- [1] KRAJEWSKI W. Numerical modeling of the electric field in HV substations [J]. IEE Proceedings of Science, Measurement & Technology, 2004, 151(4): 267-272.
- [2] 张占龙,邓军,许焱,等. 变电站关键设备工频电场计算的预条件处理 GMRES(m)边界元法[J]. 重庆大学学报,2010,33(1):78-82.
ZHANG ZHAN-LONG, DENG JUN, XU YAN, et al. Preconditioned GMRES(m) boundary element method for power frequency electric field of key devices within substation[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1):78-82.
- [3] 万保权,邬雄,张业茂,等. 750kV 单回紧凑型输电线路的电磁环境[J]. 高电压技术,2009,35(3):41-45.
WAN BAO-QUAN, WU XIONG, ZHANG YE-MAO, et al. Electromagnetic environment of 750 kV sSingle-circuit compact transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3):41-45.

- [4] HE W, YANG F, WANG J G, et al. Inverse application of charge simulation method in detecting faulty ceramic insulators and processing influence from tower [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42 (4): 723-726.
- [5] 张占龙, 黄丹梅, 魏昱, 等. 劣质绝缘子电场正问题优化算法分析 [J]. 重庆大学学报, 2009, 32 (11): 1296-1299.
ZHANG ZHAN-LONG, HUANG DAN-MEI, WEI YU, et al. Optimization algorithm for forward problem with electric fields of defective insulator [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1296-1299.
- [6] STRATAKIS D I, MIAOUDAKIS A I, XENOS T D, et al. Overall uncertainty estimation in multiple narrow-band in situ electromagnetic field measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 2767-2779.
- [7] FESER K, PFAFF W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(10): 2904-2911.
- [8] 蒋国雄, 杨建中. 工频电场测量和一种新型测量探头的研究 [J]. 高电压技术, 1985(4): 1-5.
JIANG GUO-XIONG, YANG JIAN ZHONG. Power frequency electric field measurement and the study of a new type measuring probe [J]. High Voltage Engineering, 1985(4): 1-5.
- [9] 李清泉, 刘健, 李彦明. 基于光纤的测量瞬态电场的球形传感器 [J]. 传感器技术, 2002, 21(3): 14-16.
LI QING-QUAN, LIU JIAN, LI YAN-MING. Spherical sensor for the measuring transient electric fields based on optical fibre [J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(3): 14-16.
- [10] XU Y Z, GAO C, LI Y X, et al. Calculation and experimental validation of 3-D parallel plate sensor for transient electric field measurement [C] // Proceedings of the IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, Aug. 16-17, 2007, Hangzhou, China. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 1267-1271.
- [11] 刘振亚. 特高压交流输电工程电磁环境 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [12] 程锦房, 龚沈光. 测量体引起的舰船电场畸变 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(7): 816-819.
CHENG JIN-FANG, GONG SHEN-GUANG. The influence of the electrical field induced by an underwater object [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(7): 816-819.
- [13] ZHANG Z L, DENG J, XIAO D P, et al. An adaptive fast multipole higher order boundary element method for power frequency electric field of substation [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3): 1421-1424.
- [14] PEREZ-MOLINA M, CARRETERO L, BLAYA S. Efficient computation of longitudinal lasing modes in arbitrary active cavities; the bidirectional time evolution method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3000-3009.
- [15] STAHL J S, WANG S. Globally optimal grouping for symmetric closed boundaries by combining boundary and region information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(3): 395-411.
- [16] BOGGS S. A rational consideration of space charge [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(4): 22-27.
- [17] ZHOU Y X G, ZHANG B L, BU D, et al. Nanosecond pulse corona charging of polymers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 495-501.
- [18] 胡平. 球形电场传感器测量系统的研究与应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

(编辑 张小强)