

DOI: 10.7667/PSPC170913

一种基于矢量电场的多电极电场梯度计算优化方法研究

刘建军^{1,2}, 王鹤^{1,2}, 崔国宇^{1,2}, 张谦^{1,2}, 王峥^{1,2}, 刘国华^{1,2}, 胡成博³

(1. 北京智芯微电子科技有限公司国家电网公司重点实验室电力芯片设计分析实验室, 北京 100192;

2. 国网信息通信产业集团北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100192;

3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 通过对变电站中电气设备电场梯度信息检测计算方法进行研究, 结合矢量电场多电极梯度信息, 使用压缩感知贪婪重构算法对电场检测计算方法进行优化, 对电场梯度信息进行有效识别, 提高电压等级检测判断的准确率。该方法通过分析带电体周围电场信息, 能够准确地计算出高电压导体周围的电场分布和电压等级。通过在110 kV 变电站复杂工频电场环境中进行试验, 获取带电载体一个间隔的场强分布。实验分析表明, 该方法可以有效提高带电载体电压等级的检测能力和对带电体周围电场信息的响应速度, 提高了工作人员在复杂工频电场环境下工作的安全性。

关键词: 矢量电场; 电场梯度信息; 电压等级判断; 安全距离; 响应速度

Study on optimization method of multi-electrode electric field gradient calculation based on vector electric field

LIU Jianjun^{1,2}, WANG He^{1,2}, CUI Guoyu^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, LIU Guohua^{1,2}, HU Chengbo³

(1. State Grid Key Laboratory of Power Industrial Chip Design and Analysis Technology, Beijing Smart-Chip

Microelectronics Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China; 2. Information & Telecommunication

Group Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper presents a method that the algorithm of calculating the electric field combining with vector electric field multi-electrode gradient information is optimized by using the compression-aware greedy reconstruction algorithm, which can effectively identify the electric field gradient information and improve the accuracy rate of the voltage level detection judgment, through the research on the calculation method of the electric field gradient information of the electrical equipment in the substation. This method can accurately calculate the electric field distribution and voltage level around the high voltage conductor by analyzing the electric field information around the charged body. The distribution of the field strength at one interval of the charged carrier is obtained by tested in complex power frequency electric field environment of the 110 kV substation equipment. The results show that the method can effectively enhance the detection capability of the voltage level of the charged carrier and the response speed of the electric field around the charged body, and improve the safety of the staff working in the complex electric field.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 526816160024).

Key words: vector electric field; electric field gradient information; voltage rating judgment; safety distance; response speed

0 引言

在带电设备集中的变电站、换流站等工频电场

复杂的电力系统中, 带电设备的运行维护和现场移动巡检对整体电力系统的运维管理和事故处理等工作有着非常重要的作用, 是保证电网安全、稳定和经济运行的执行者^[1]。在电力系统运行环境中, 带电设备布置复杂, 周围空间电场计算困难。传统的

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(526816160024)

计算方法是针对电场三维分布的特点,将带电设备进行简化处理,采用分区分段处理的计算方法计算周围变电设备工频电场的分布^[1]。此方法存在检测准确度不高,无法进行移动作业过程中场强数据实时计算的局限性。针对上述方法的不足,本文提出了一种融合现场 3D 与矢量电场梯度信息的近电场检测优化方法。该方法通过获取周边带电设备及母线的场强信息,并使用多方向电极梯度检测法对收集的原始数据进行处理,实现电压等级、距离和方位的精确检测方法,通过获取周边带电设备及母线的场强信息,使用多方向电极梯度检测法对收集的原始数据进行处理,同时使用压缩感知贪婪重构算法对电场检测计算方法进行优化,进而提高电场梯度电压等级检测判断的准确度。

1 近电场强度检测原理

以变电站母线及周边带电设备为例,其工频电场强度常用的计算方法是使用模拟电荷法(CSM)推导出周边带电体工作环境三维电荷系统和电场系数^[2]。在计算带电体电荷产生的工频电场时,经典的计算方法是模拟电荷法,如图 1 所示:作笛卡尔坐标系,考虑大地影响采用镜像电荷法,设模拟电荷 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$; 不考虑大地影响使用非对称镜像法。

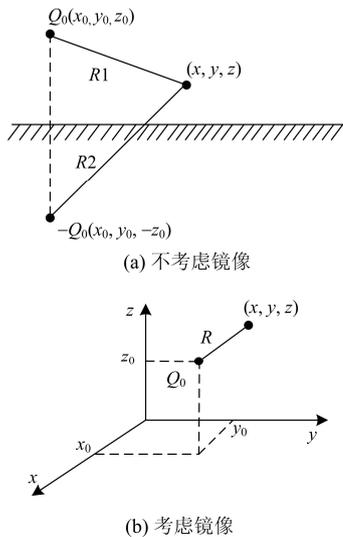


图 1 模拟电荷示意图

Fig. 1 Cartesian coordinate system

在不考虑大地条件的影响时,点电荷电位计算公式为

$$V = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon R} \quad (1)$$

由此可得出单点电荷的电位系数为

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon R} \quad (2)$$

$$\text{其中, } R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

区域内任意一点的 a 的电场强度:

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\sum_{a=1}^n (\nabla P_{a0}) Q_0 = \sum_{a=1}^n F_{a0} Q_0 \quad (3)$$

式(3)中模拟电荷的个数 n , 电场强度矢量系数 F_{a0} 。

单个点电荷电场强度系数:

$$F_x = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{x-x_0}{R^3} \quad (4)$$

$$F_y = -\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{y-y_0}{R^3} \quad (5)$$

$$F_z = -\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{z-z_0}{R^3} \quad (6)$$

考虑到大地影响,则空间区域内任意点 (x, y, z) 的电位及强度系数为^[2]

$$V = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

电场强度系数为

$$F_x = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{x-x_0}{R_1^3} - \frac{x-x_0}{R_2^3} \right) \quad (9)$$

$$F_y = -\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{y-y_0}{R_1^3} - \frac{y-y_0}{R_2^3} \right) \quad (10)$$

$$F_z = -\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{z-z_0}{R_1^3} - \frac{z-z_0}{R_2^3} \right) \quad (11)$$

式(9)一式(11)中:

$$R_1 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2}$$

该方法可以较好地对母线产生的工频电场场强进行仿真,但是对变电站中绝缘子、悬导体设备产生的场强,仿真效果不佳^[3]。边界元法(BEM)可以较好地解决边值问题,在对变电站设备周边场强进行仿真时具有可降低问题维数,提高计算精度等特点^[3-4]。本文结合模拟电荷法和边界元法算法,利用模拟电荷法仿真母线产生的场强,边界元法仿真变电站带电设备产生的场强,来对变电站内的带电载体进行场强的计算。

1.1 建立模拟电荷方程组

在电极内设 n 个模拟电荷 $Q_j(j=1, 2, \dots, n)$ 点, 在给定的电位边界条件的电极表面上选定 n 个电位匹配点, 各匹配点上的电位值 $\varphi_{0j}(j=1, 2, \dots, n)$ 是已知的^[5]。根据叠加定理, 对应于所有的 n 个匹配点可以逐一地列出由设定的 n 个模拟电荷所建立的电位表达式^[5], 即

$$\begin{cases} P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 + \dots + P_{1n}Q_n = \varphi_{01} \\ P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2 + \dots + P_{2n}Q_n = \varphi_{02} \\ \vdots \\ P_{n1}Q_1 + P_{n2}Q_2 + \dots + P_{nn}Q_n = \varphi_{0n} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, P_{ij} 为第 j 个单位的电荷在第 i 个匹配点上产生的电位值, 电位值与模拟电荷的类型和位置以及匹配点和场域的介电常数有关, 称为电位系数。应用高斯列主元消去法对变电站内带电体产生的周边电场数据进行计算得出模拟电荷的电位值 $Q_j(j=1, 2, \dots, n)$ ^[6]。

1.2 模拟电荷的校验与确定

通过模拟电荷法计算出的电荷电位值必须检验这些模拟电荷产生的电位是否满足电极表面上非匹配点的边界条件^[7], 才可以用来计算实际场域内任意点的电场强度。本文通过在点位匹配点中间选取 m 个电位校验点进行电位计算, 即

$$\varphi_k = P_{k1}Q_1 + P_{k2}Q_2 + \dots + P_{kn}Q_n \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

各个电位校验点的电位值 $\varphi_k(k=1, 2, \dots, m)$ 与给定的已知电位值 $\varphi_{0k}(k=1, 2, \dots, m)$ 进行如式(14)所示差值对比, 来判断是否满足条件。

$$|\varphi_k - \varphi_{0k}| \leq \Delta \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

式中, Δ 为设定的计算误差值, 通过式(12)计算出模拟电荷电位值, 以此来计算场域中任意一点的电位或电场强度^[7]。如果式(14)不满足, 需要对第一次设定的模拟电荷类型、位置、个数做调整, 进而重新计算式(12)和式(13), 直到满足式(14)中的条件为止^[7]。

2 基于算法优化的电场梯度检测方法

本文为增加多电极电场梯度检测计算的准确率, 增加了电场原始数据的预处理环节, 使用压缩感知贪婪重构算法(GMP)对带电设备的电场梯度的计算方法进行优化, 来对电场的电压等级信息进行判断计算^[8]。

算法的总体输入为电场检测采集器收集的原始数据, 该数据为 8 只多电极多方位电极检测装置采集的电场原始数据。

算法的总体输出为电场检测结果, 包括: 距离、方位、电压等级信息。

算法设计原则: 利用多电极多方位检测的特点, 进行场强的梯度检测计算。在电压等级检测方面, 根据多电极检测生成的梯度信息进行电压等级判断。在方位判别方面, 根据多只电极的空间部署位置进行方位判决。在距离检测方面, 根据多电极检测结果得出场强, 进行距离计算。其算法流程图如图 2 所示。

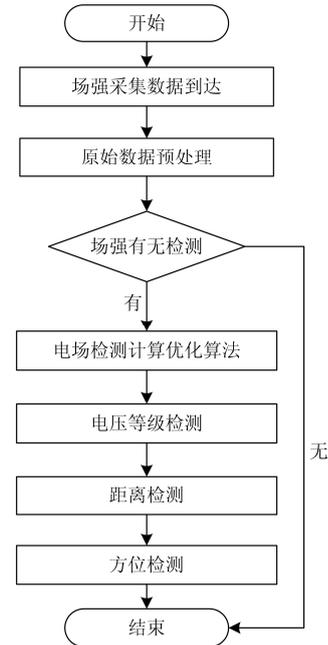


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Electric field intensity data processing flow

图 2 中, 当场强检测数据帧到达, 首先进行数据预处理, 然后进行场强有无检测, 如果无场强直接退出算法, 准备处理下一帧数据。如果发现场强则依次进行电压等级判断、距离计算、方位判决。在场强数据的预处理环节, 由于手的触摸或其他导体、带电体的接触以及复杂环境的影响, 个别电极测量结果可能异常。因此需要用到奇异值检测, 排除数据异常结果^[9]。

采用时空分布检验法对电荷电位的突变值、趋势及异常情况进行识别, 从而可以识别突变值、趋势值和异常值^[8-9]。检验的主要依据是统计本次测值 Y_i 、前一次测值 Y_{i-1} 、相同环境量条件下的前一次测量值 Y_{j-1} 和经过测量统计出的最大值 Y_{\max} 、最小值 Y_{\min} ^[6]。比较当前与前次场强的测量值、特性值(最大值、最小值)。

(1) 突变值条件: 本次测值 Y_i 与前一次测值 Y_{i-1} 之差大于 3 倍观测误差 σ , 即

$$|Y_i - Y_{i-1}| \geq 3\sigma \quad (15)$$

(2) 趋势性变化识别条件: 在同等测量条件和

环境中,本次测量值与相同环境量和条件下的前一次测量值之差大于3倍观测误差 σ ,即

$$|Y_j - Y_{j-1}| \geq 3\sigma \quad (16)$$

(3) 异常值识别:若 $Y_{\min} \leq Y_i \leq Y_{\max}$ 时,则该测值正常,否则为异常。

本文使用压缩感知理论算法对电场梯度检测进行计算处理,用于工频电场场强的计算。通过在监控区域内随机部署电场场强监测点,计算数据通过使用压缩感知贪婪重构算法进行处理,得出场源参数和场强分布云图^[10]。Matlab的数据仿真结果显示,压缩感知贪婪重构算法能较好地重构出场强分布云图^[9]。重构步骤如下所述。

(1) 压缩采样过程

假设第 m 个节点坐标为 (x_m, y_m) 。测量矩阵

$\Phi \in R^{M \times N}$ ($M \ll N$) 中的元素 $\varphi_{m,n}$ 为

$$\varphi_{m,n} = E_{m,n}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (17)$$

式(13)可计算得出, $E_{m,n}$ 为 m 到 n 两个测量点到第 n 个测量点电荷的场强。

电力带电设备系统中点电荷电位值压缩采样过程如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & \cdots & E_{1,N} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & \cdots & E_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{M,1} & E_{M,2} & \cdots & E_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)中,当等效正电荷 $+q$ 存在于第 n 个网格中时, $x_n = q$ ($1 \leq n \leq N$); 当有等效负电荷 $-q$ 存在时, $x_n = -q$ ($1 \leq n \leq N$), 无等效电荷为 $x_n = 0$ 。本文中假设等效模拟电荷数量 K , 通过式(18)可知 N 维向量 X 的稀疏度为 K , 其测量结果 Y 可通过测量矩阵与稀疏向量 X 乘积获得^[10], Y 中的元素 y_m ($1 \leq m \leq M$) 表示所有等效的模拟电荷在该点产生的场强之和。

$$Y_{M \times 1} = E_{M \times N} X_{N \times 1} \quad (19)$$

式(19)中,获得测量值 Y 的过程即为压缩采样过程。压缩感知重构过程就是通过 Y 和 E 重行重构稀疏向量 E 的过程。

(2) 电场云图贪婪重构算法

针对工频电场场强计算复杂的特点,本文通过使用贪婪重构算法对带电体场强计算方法进行优化,设计了基于电场云图关系的贪婪重构算法,结合变电站设备相关参数及设备空间分布数据,进一步准备定位等效电荷在网格的位置,提高算法的性能和运算速度,贪婪重构算法设计如下^[10]:

输入,测量矩阵 $E_{M \times N}$,测量结果 $Y_{M \times 1}$; 输出,

重构信号 \hat{X}

1) 对余量 $y' = y$ 进行初始化数据匹配,重构出匹配结果 $\hat{X} = 0$,全部网格 N 作为支撑集。

2) 求解优化, z 列向量的稀疏度为1(除第 i 个元素 z_i 外其余元素0)。本文中,假设网格 i 中含有 z_i 个等效的单位模拟电荷,对上述网格中的等效模拟电荷进行离散化处理,若 z_i 为正值则为正电荷,若 z_i 为负值则为负电荷^[10]。针对有等效电荷分布的条件,还需要如下所示的先验约束条件对 i, z_i 进行处理。

$$z = \arg \max_{\|Ez\|_2} \langle y', Ez \rangle, 1 \leq i \leq N, -M \leq z_i \leq M \quad (20)$$

3) 如果 $z \neq 0$,则需要支撑集减去当前网格, $y' = y' - Ez$, $\hat{X} = \hat{X} + z$, 继续进行第2)步。

4) 重构结束,结果为 \hat{X} 。

为了保证最优的迭代计算和迭代次数的最大化,通过信号逼近和余量更新的方式,处理余量 y' 与测量矩阵中各原子的相关性数据。

3 电场梯度数据检测实验与分析

本文选取110 kV 变电站内带电设备载体进行实验,使用经过优化的多极电场梯度检测算法对收集的原始数据进行处理。

3.1 数据处理后的检测识别

为从多方位收集经过优化处理的电场数据,本文选取一个带电载体间隔表面的一块区域,分为上下两层,每层前后左右各安装4只电极,以多方位电极层叠方式收集电场数据,对收集到的数据进行场强的判别和计算,场强计算方法如下^[11]:

第一步,取场强最大的电极;

第二步,计算其上下两层电极的差,作为梯度;

第三步,根据场强和梯度,做出电压等级判决。

本文根据以上数据处理方法整理得出如表1所示36组场强和梯度相对大小的数据表,进而分析得出图3中110 kV 场强随距离衰减图。

3.2 带电载体电场梯度数据结果分析

经过电场强度测试仪器和Matlab工具对处理后的数据进行对比和分析,结果如下。

选取110 kV 变电站一个带电载体,对此带电载体电场梯度数据进行上述优化算法的信息处理后,得到如图4—图6所示的三维场强仿真图,其中带电载体设备距地面高1.5 m的截面。 X 轴的范围为-3.3至3.3 m, Y 轴的范围为-7.5至7.5 m, Z 轴表示该点场强,单位V/m,间隔中心显示在仿真坐标原点。

表 1 场强和梯度大小数据

Table 1 Field strength and gradient size data

场强	梯度	场强	梯度
97.261 0	16.880 1	80.381 0	12.838 7
67.543 0	9.991 5	57.551 0	7.928 0
49.623 0	6.395 9	43.227 0	5.234 6
37.993 0	4.338 3	33.654 0	3.635 5
26.942 0	2.626 9	24.315 0	2.260 6
18.386 0	1.500 2	16.886 0	1.323 8
15.562 0	1.174 0	14.388 0	1.046 0
13.342 0	0.936 0	11.565 0	0.758 1
10.807 0	0.686 0	9.498 0	0.566 9
8.414 0	0.473 9	7.505 0	0.400 2
7.105 0	0.369 0	6.395 0	0.315 7
6.079 0	0.292 9	5.514 0	0.253 5
5.024 0	0.220 8	4.596 0	0.193 5
4.221 0	0.170 5	3.890 0	0.151 1
3.462 0	0.127 1	3.215 0	0.113 8
2.994 0	0.102 3	2.614 0	0.083 6
2.375 0	0.072 5	2.103 0	0.060 5
1.929 0	0.053 2	1.776 0	0.047 0

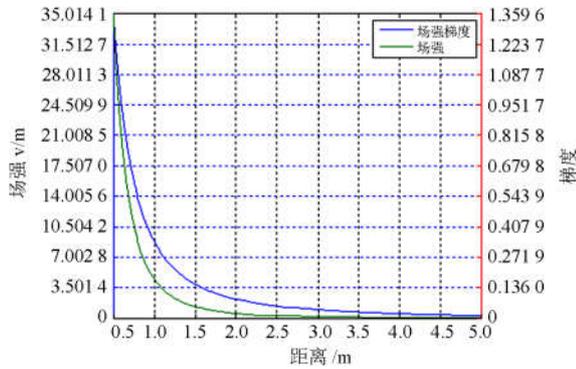


图 3 110 kV 场强随距离衰减图

Fig. 3 110 kV field strength decreases with distance

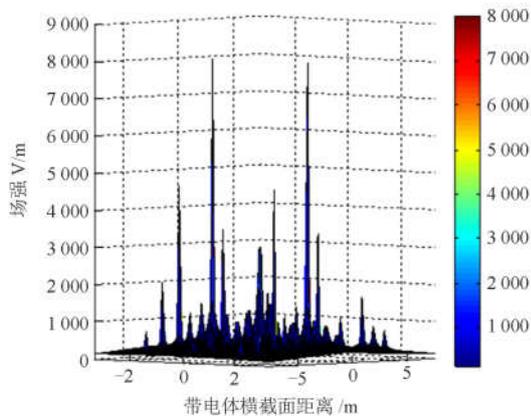


图 4 110 kV 变电站内设备一个间隔场强分布

Fig. 4 Field strength distribution of 110 kV substation

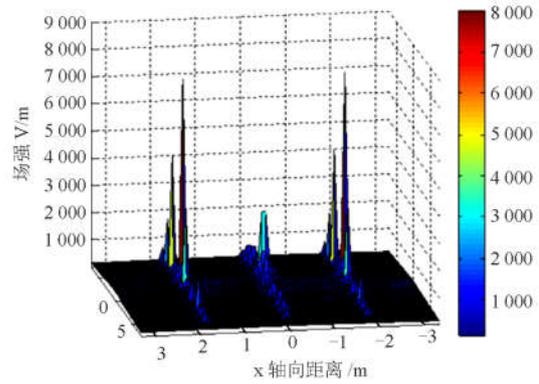


图 5 X 轴显示带电设备场强分布

Fig. 5 Field strength distribution of 110 kV substation with X-axis angle

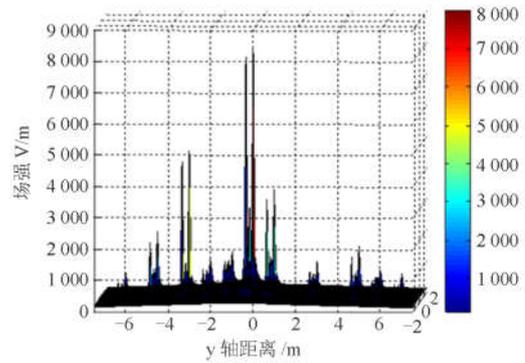


图 6 Y 轴显示带电设备场强分布

Fig. 6 Field distribution of 110 kV substation in Y-axis direction

由图 4—图 6 三维场强仿真图可以得出, 由于叠加场强的相互抵消作用, 场强的最大值出现在中间位置附近。

通过从不同方向检测带电载体的场强分布可以得出: 只具有单方向的电极传感器无法对电场梯度进行有效识别, 只能通过多方位多电极层叠方式进行电场强度梯度判断识别, 进而实现电压等级判断。

本文按照表 2 所示参数, 在 Matlab 中通过加入贪婪匹配算法(GMP)对测量数据进行仿真, 将仿真结果与 BP(L1-Magic)算法^[12]、CosAMP 算法^[13]两种算法的重构结果进行比较, 得出如图 7 所示的不同重构算法对比误差图。在仿真过程中, 本文选取了

表 2 主要仿真数据参数

Table 2 Main simulation data parameters

仿真参数名称	变量	参数值
划分的网格数	N	196
传感器数量	M	49
模拟电荷个数	K	1~20

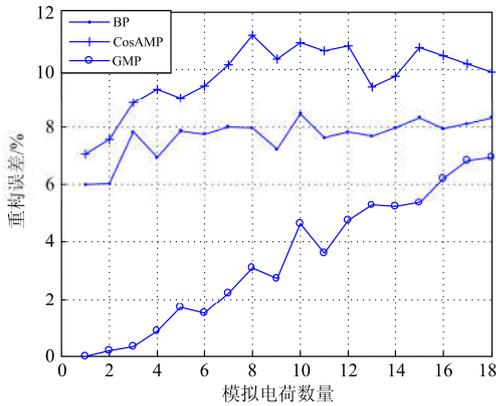


图7 不同重构算法的重构误差对比

Fig.7 Reconstruction error comparison of different reconstruction algorithms

50 m×50 m 的矩形区域作为监控区, 表 2 所示数据为仿真参数。一般要求 $M > 2K$, 最好达到 $4K \sim 6K$, 原信号可以得到较好的重构^[14-15]。

由图 7 中的分析结果得出: 通过与 BP(L1-Magic) 算法^[16-17]、CosAMP 算法^[18-19] 数据处理结果进行比较, 本文使用贪婪重构匹配算法(GMP)^[20] 得出的结果, 在 $M=49$, $K=1\sim 18$, $SNR=20$ dB 的条件下, 加入了经过优化的压缩感知贪婪重构算法(GMP), 能够提高重构误差精度。在 196 划分网格条件下, 压缩感知贪婪重构算法仅通过对划定区域内 49 传感器的单次测量, 就能够很好地重构出场源参数分布和场强分布。

4 结论

本文通过结合压缩感知重构思想对多电极电场梯度信息计算方法进行优化, 在变电站带电载体周边电场信息收集的初始阶段, 对原始数据进行预处理。通过分析电场强度检测工具检测到的场强结果和 Matlab 仿真验证结果, 可以得出: 加入了压缩感知重构思想的多电极电场梯度信息检测分析的优化算法可以有效提高带电导体电压等级的检测能力和对带电体周围电场信息的响应速度和精确度, 提高了工作人员在复杂工况强电场环境下的安全性。

参考文献

[1] LEE B Y, PARK J K, MYUNG S H, et al. An effective modelling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143-1150.

[2] TAKUMA T, IKEDA T, KAWAMOTO T. Calculation of ion flow fields of HVDC transmission lines by the finite

element method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981, 100(12): 4802-4810.

- [3] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.
- XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 48-52.
- [4] KRAJEWSKI W. Numerical modelling of the electric field in HV substations[J]. IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 2004, 151(4): 267-272.
- [5] 杜志叶, 阮江军, 干喆渊, 等. 变电站内工频电磁场三维数值仿真研究[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 229-235.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, GAN Zheyuan, et al. Three-dimensional numerical simulation of power frequency electromagnetic field inside and outside substation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 229-235.
- [6] 董希建, 杨海, 刘平, 等. 电力系统事故过负荷的识别及紧急控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 165-169.
- DONG Xijian, YANG Hai, LIU Ping, et al. Criterion of accident overload and emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 165-169.
- [7] 叶青, 文远芳, 莫染, 等. 应用矩量法的变电站内工频电磁场计算及实测[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 189-194.
- YE Qing, WEN Yuanfang, MO Ran, et al. Calculation of power frequency electromagnetic field within substation by moment method and actual measured results[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 189-194.
- [8] 贾华伟, 郭利军, 叶海明, 等. 智能变电站分布式智能告警研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 92-99.
- JIA Huawei, GUO Lijun, YE Haiming, et al. Research and application of distributed intelligent alarm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 92-99.
- [9] 李乃一, 彭宗仁, 杜进桥, 等. 特高压变电站工频电场模拟计算及其分布规律[J]. 高压技术, 2012, 38(9): 2178-2188.
- LI Naiyi, PENG Zongren, DU Jinqiao, et al. Simulated calculation and distribution of power frequency electric field in UHV substations[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2178-2188.
- [10] 许祖锋. 基于模型驱动的变电站智能告警应用软件研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

- XU Zufeng. Research and design of intelligent warning software of substation based on model driven[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [11] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147.
WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [12] 吴辰斌, 李海明, 刘栋, 等. 一种改进型粒子群优化算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 44-48.
WU Chenbin, LI Haiming, LIU Dong, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to power system economic load dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 44-48.
- [13] TROPP J A, WRIGHT S J. Computational methods for sparse solution of linear inverse problems[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6):948-958.
- [14] 路光辉, 周钟, 雍明超, 等. 一种用于智能高压设备的分布式测试用例实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 111-117.
LU Guanghui, ZHOU Zhong, YONG Mingchao, et al. An implementation of system-level distributed test cases for smart high-voltage equipment system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 111-117.
- [15] MARGINETTUI F, SANTIS E D, AVINO S, et al. Fiberbragg grating sensor for electric field measurement in the end windings of high-voltage electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2796-2802.
- [16] 成林, 郭安祥, 齐卫东, 等. 复杂电磁环境下电子式电流互感器输出特性研究[J]. 智慧电力, 2017, 12(8): 64-69.
CHENG Lin, GUO Anxiang, QI Weidong, et al. Study on output characteristics of electronic current transformer in complex electromagnetic environment[J]. Smart Power, 2017, 12(8): 64-69.
- [17] 李子龙, 刘涛, 黄胜强, 等. 基于泄放能量函数的配电网线路故障定位方法研究[J]. 智慧电力, 2017, 12(7): 106-111.
LI Zilong, LIU Tao, HUANG Shengqiang, et al. Study on fault location method based on leakage energy function[J]. Smart Power, 2017, 12(7): 106-111.
- [18] 刘超, 牛艳召, 李天佼, 等. ± 800 kV 特高压换流变压器局部放电超标的诊断及处理[J]. 陕西电力, 2016, 12(3): 81-84.
LIU Chao, NIU Yanzhao, LI Tianjiao, et al. Diagnosis and treatment of excessive partial discharge in ± 800 kV UHV converter transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 12(3): 81-84.
- [19] 马修元, 申智勇, 陆小成. 湿式静电除尘器电场特性及极配优化数值模拟[J]. 热力发电, 2016, 12(6): 74-80.
MA Xiuyuan, SHEN Zhiyong, LU Xiaocheng. Numerical modeling of corona electric field characteristics and electrode configuration optimization for a web electrostatic precipitator[J]. Thermal Power Generation, 2016, 12(6): 74-80.
- [20] 马修元, 申智勇, 李志强. 湿式静电除尘系统流场数值模拟与优化[J]. 热力发电, 2016, 12(5): 94-99.
MA Xiuyuan, SHEN Zhiyong, LI Zhiqiang. Numerical modeling and optimal design of flow field for a wet electrostatic precipitator system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 12(5): 94-99.

收稿日期: 2017-06-19; 修回日期: 2017-08-18

作者简介:

刘建军(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为智能电网、电力物联网、无线通信和传感测量研究; E-mail: liujianjun@sgitg.sgcc.com.cn

王鹤(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为无线网络通信及无线传感网通信技术应用; E-mail: wanghe1@sgitg.sgcc.com.cn

崔国宇(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能电网及电力物联网、传感器与微机电技术。E-mail: cguiguoyu@sgitg.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)