

文章编号:1000-582X(2009)11-1296-04

劣质绝缘子电场正问题优化算法分析

张占龙,黄丹梅,魏 昱,何 为,杨 帆,汪泉弟

(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 400030)

摘 要:针对劣化绝缘子的电场法检测中绝缘子电场计算精度低的问题,提出基于遗传算法优化的模拟电荷法进行高压静电场计算,给出了优化方法原理、可行性分析,建立了绝缘子电场计算目标函数及优化模型,并进行了绝缘子串周围电场的计算分析。分析结果表明,将绝缘子串周围检测点电位作为目标函数,应用遗传算法优化模拟电荷的电荷量,可更好地对目标函数进行全局寻优,提高了模拟电荷法的寻优速度、绝缘子串周围电场的计算精度以及绝缘子串中劣质绝缘子诊断的准确度。

关键词: 绝缘子串; 电场; 优化; 遗传算法; 正问题

中图分类号: TM835

文献标志码: A

Optimization algorithm for forward problem with electric fields of defective insulator

ZHANG Zhan-long, HUANG Dan-mei, WEI Yu, HE Wei, YANG Fan, WANG Quan-di

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The defective insulator can be detected by measuring electric field, however, the electric field calculation accuracy of the insulator strings is low. Charge simulation method (CSM), which is optimized by genetic algorithm (GA), is adopted to calculate high voltage electrostatic field. The optimal method principle and feasibility analysis is given. The objective function and optimization model of electric field distribution around insulator strings are constructed and analyzed. The results of calculation and analysis demonstrate that adopting the potential of check-points near insulator strings as objective function and using GA to optimize the charge of simulation charge, better performance can be achieved for improving ability of global optimization, calculating precision, searching speed, simulating precision of CSM and accuracy of diagnosing defective insulator in the insulator strings.

Key words: insulator string; electric fields; optimization; genetic algorithms; forward problem

绝缘子劣质时会引起绝缘子串附近电场分布的变化,目前非接触式电场法检测劣质绝缘子是一种效果较好的方法^[1-4],其主要是采用模拟电荷法计算绝缘子附近一定距离的绝缘子全部正常时和分别有

劣质绝缘子时的电场大小,通过测量值与计算值的比较,从而判断绝缘子串中劣质绝缘子的存在及其编号。

但传统模拟电荷法在具体应用中,模拟电荷的

收稿日期:2009-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877082,50877081);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究课题(2007DA10512708304);国家大学生创新性实验项目(081061102)

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、计算机测量与控制的研究,(E-mail)zhangzl@cqu.edu.cn。

个数、性质、位置和量值均对计算精度有较大影响。在实际电场计算过程中,模拟电荷的性质根据求解场域的性质以及电极的结构形状而定,但整个计算需要以大量模拟电荷与匹配点配置关系的调整工作为基础,而且匹配关系也将直接影响到计算量的大小和电场计算精度。因此,计算精度低,增加了电场计算的误差,影响了绝缘子电场测量法的准确度。

笔者将遗传算法和模拟电荷法结合,在传统模拟电荷法的基础上引入遗传算法进行优化,优化前将模拟电荷的位置按照一定的函数关系进行配置,固定其位置,对模拟电荷的电量进行优化,减少了优化问题的变量,使得优化得以有效实现。通过球-板电极模型进行了优化计算,证明了该优化算法的可行性;并通过 110 kV 绝缘子电场正问题计算分析,该优化方法提高了绝缘子串周围电场的计算精度和绝缘子串中劣质绝缘子诊断的准确度,从而为准确判断绝缘子串中劣质绝缘子的存在及其编号提供了依据。

1 电场正问题计算原理

电场正问题即是通过源源产生的场的大小。在绝缘子电场正问题的研究中,即是通过绝缘子串的边界点的电位分布来求周围的电场分布。

由于瓷质悬式绝缘子结构的轴对称特性^[5],可根据模拟电荷法(CSM)的基本原理^[6]采用环型模拟电荷等效其表面的束缚电荷。在设置了等效模型的匹配点之后,可以得到系统的增广矩阵方程为

$$A * Q = b. \quad (1)$$

式中: A 为电位系数矩阵或电场系数矩阵; Q 为模拟电荷的电量矩阵; b 为匹配点的电位或电场矩阵。

在 CSM 中,式(1)的具体形式为

$$\left. \begin{aligned} P * Q &= U, \\ f_r * Q &= E_r, \\ f_z * Q &= E_z. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: P 为电位系数矩阵; U 为电位矩阵; E_r 为柱坐标中 r 轴方向分量的电场矩阵; E_z 为柱坐标中 z 轴方向分量的电场矩阵; f_r 为柱坐标中 r 轴方向分量的电场系数矩阵; f_z 为圆柱坐标中 z 轴方向分量的电场系数矩阵。

2 优化算法原理与可行性分析

在应用模拟电荷法解决电场问题时,模拟电荷的配置包括位置参数和电荷量。由于优化变量是关系到优化能否很好实现的关键因素。针对此问题,按照一定的人工经验,在优化前将模拟电荷的位置按照一定的函数关系进行配置,固定其位置,只对模拟电荷的电量进行优化,这就减少了优化问题的变

量,使优化得以有效实现。

根据 GA 优化模拟电荷法的思想^[6-14],优化变量为模拟电荷量 Q ,其可行域由匹配点电位根据式(3)计算得到

$$Q = P^{-1} * \varphi_0. \quad (3)$$

优化的目标函数为

$$\min f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varphi_{0i} - \varphi_{ci}|, \quad (4)$$

式中: φ_0 为检测点的实际电位; φ_c 为检测点的计算电位, $n=7$ 。

GA 优化模拟电荷法计算步骤:

- 1) 确定模拟电荷种类,按照一定的函数关系布置模拟电荷位置;
- 2) 根据匹配点电位求出模拟电荷量的初值,以此确定优化设计解的可行域;
- 3) 计算检验点电位误差,判断是否满足精度要求,不满足则进行 4);
- 4) 根据优化设计解的可行域形成一定量的初始种群,取 50 个初始种群;
- 5) 由目标函数确定适应度函数,在初始种群中选择适应度较大的种群;
- 6) 对选择出来的种群进行交叉、变异,产生新的种群。取交叉概率 $P_c=0.8$ 、变异概率 $P_m=0.01$;
- 7) 返回 5),经过多次迭代,最终得到优化变量的最优解。

利用上面的步骤得到优化模拟电荷量后,再根据式(5)和式(6)得到绝缘子的电场的分布值。

$$\left. \begin{aligned} f_r * Q &= E_r, \\ f_z * Q &= E_z. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$E = \sqrt{E_z^2 + E_r^2}. \quad (6)$$

为验证该优化算法的可行性,针对球-板电极模型进行了优化计算,球-板电极模型如图 1 所示。

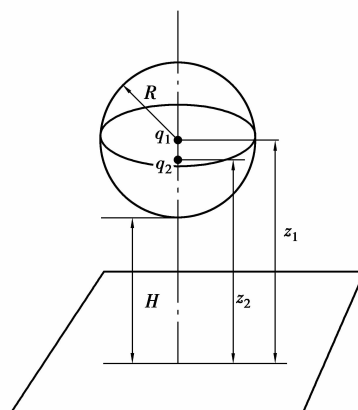


图 1 球-板电极模型

在图 1 所示的球-板模型中, R 为球半径, q_1, q_2

为等效电荷, z_1, z_2 为模拟电荷。平板电位为 0, 球表面电位 100 V, $H=40$ cm, $R=10$ cm。2 个模拟电荷 q_1, q_2 位于球中, 在球表面上选取了 5 个匹配点。计算中自变量个数为 4, 种群数量为 40, 计算得到相对误差为 4.2708×10^{-5} , 与文献[15]中同样模型的计算精度 6.46×10^{-4} 相比, 精度得到大幅度提高, 计算分析结果如图 2 所示。

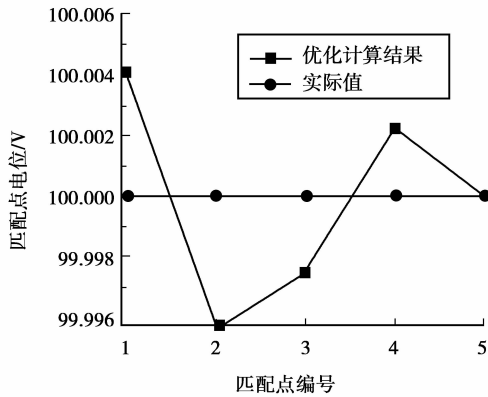


图 2 匹配点实际电位与模拟电荷产生电位比较

3 绝缘子电场优化模型与分析

对于劣质绝缘子的检测, 其基本方法是当出现劣质绝缘子时, 绝缘子串的电位分布将发生变化, 导致周围空间的电场分布改变, 根据电场的变化判断有无劣质绝缘子的存在。

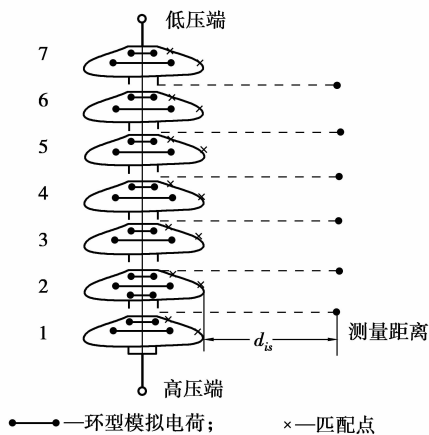


图 3 模拟电荷与测量点的分布示意图

以三相 110 kV 猫头型绝缘子中的一相绝缘子串为例, 如图 3 所示, 按每串 7 片绝缘子计算。用 2 个环线电荷来模拟每个绝缘子片上的分布电荷, 每片绝缘子表面取 2 个匹配点, 在每 2 个匹配点间取一个检测点, 故每相绝缘子串有 14 个匹配点和 6 个检测点。设每片绝缘子的半径 $r=0.127$ m, 实际高度 $h=0.146$ m, 第一片绝缘子离地的高度为 15 m。

每片绝缘子的标准电压^[16]分布 1~7 号分别为 18.5, 10.0, 8.5, 7.0, 5.0, 6.0, 9.0。由于绝缘子片内的电压近似呈线性分布, 通过线性差值法可求得匹配点电压, 将匹配点电压代入公式(3)即可得到绝缘子串的等效模拟电荷的初值, 再对绝缘子串上的等效模拟电荷进行优化, 则可得到优化后的模拟电荷量, 最后由公式(5)和(6)得到绝缘子正常情况下和有零值绝缘子存在时的测量电场分布精确值。

以图 3 所示的绝缘子串为例, 计算当所有绝缘子片为正常绝缘子, 根据绝缘子串的电位分布, 计算绝缘子串周围的电场强度分布。当所有绝缘子都正常时, 优化后得到的模拟电荷量如表 1 所示, 由优化的模拟电荷得到电位检验结果如表 2 所示。

表 1 优化的模拟电荷量

编号	$10^{12} Q/C$	编号	$10^{12} Q/C$
1	877.72	8	33.542
2	-472.42	9	29.594
3	241.21	10	-19.161
4	20.019	11	31.096
5	20.347	12	6.0144
6	71.772	13	40.488
7	-1.9074	14	-57.256

表 2 电位校验结果

编号	给定电位/V	计算电位/V	电位误差/V
1	49.060 6	49.092 2	0.031 6
2	39.349 3	39.363 3	0.014 0
3	31.907 9	31.906 9	0.001 0
4	25.414 9	25.392 1	0.022 8
5	19.917 1	19.872 0	0.045 1
6	15.774 0	15.796 2	0.022 2
7	11.083 6	11.072 2	0.011 4

由表 2 可知, 检验点的电位值与实际电位值比较, 误差小, 优化的模拟电荷值满足电场计算的要求, 保证了电场计算的准确度。

当存在零值绝缘子时, 针对每一情况, 通过对绝缘子片模拟电荷进行优化, 计算绝缘子串周围的电场分布。当测量距离为 100 cm 时, 1、5、7 号绝缘子依次为零值时的电场变化如图 4 所示。

通过分析, 出现零值绝缘子时各测量点电场变化比较明显, 尤其是绝缘子串两端绝缘子出现劣质时, 电场变化最大, 中间绝缘子出现劣质时, 变化较小。这主要是由于两端电压分布较中间高, 两端绝缘子出现零值时, 电压变化大, 导致电场变化也大。另外, 当零值绝缘子位于不同位置时, 绝缘子串周围的电场分布规律不同。因此在绝缘检测中根据标准

电位分布计算绝缘子表面或表面附近测点的标准电场强度,与测点电场强度的实际测量值进行比较,以此判断劣质绝缘子的存在及其编号。

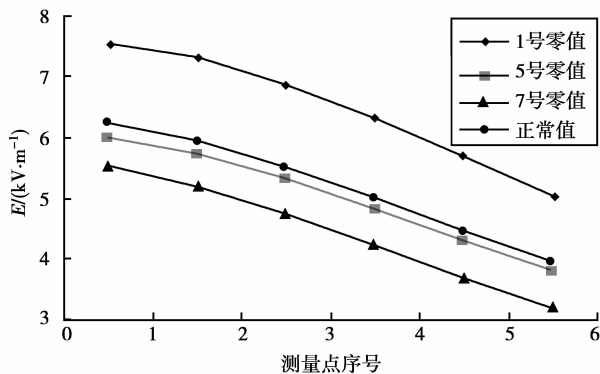


图 4 绝缘子劣质时电场分布图

4 结 语

采用遗传算法优化模拟电荷量大小,并将其应用到绝缘子电场计算中,建立了绝缘子电场计算目标函数及优化模型。基于遗传算法的模拟电荷优化算法可更好地对目标函数进行全局寻优,避免了局部最优,提高了绝缘子电场的计算精度和寻优速度。这为绝缘子的电场计算提供了更多的计算途径,同时也为劣质绝缘子的检测提供了参考标准。

参考文献:

- [1] 王海跃,李香龙,汲胜昌,等. 合成绝缘子合成绝缘子在线检测方法的现状与发展[J]. 高电压技术, 2005, 31(4):37-41.
WANG HAI-YUE, LI XIANG-LONG, JI SHENG-CHANG, et al. Present and future development of on-line detection methods composite insulator [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4):37-41.
- [2] 汪金刚,何为,陈涛,等. 绝缘子表面电场与紫外脉冲关系以及在劣化绝缘子检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 137-142.
WANG JING-GANG, HE WEI, CHEN TAO, et al. Relationship between the electric field on the surface of insulators and ultra-violet pulse intensity and its application in detecting faulty insulators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6):137-142.
- [3] SHEN X J, JIANG X C, CHENG Y C, et al. A novel method for live detection of faulty direct current insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery Pwr, 2008, 23(1): 24-30.
- [4] 何为,陈涛,姚德贵,等. 基于紫外脉冲法的非接触式低值(零值)绝缘子在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10):69-74.
HE WEI, CHEN TAO, YAO DE-GUI, et al. Online monitoring system of faulty insulator based on non-

touching UV pulse method[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(10):69-74.

- [5] 关志成,刘瑛岩,周运翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [6] 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.
- [7] 杨帆,李家祥. 基于模拟电荷法的绝缘子电场非接触式测量法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15):95-99.
YANG FAN, LI JIA-XIANG. Charge simulating method based insulator non-touching electric field mapping method [J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(15):95-99.
- [8] ZHAO T, COMBER M G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):313-318.
- [9] 彭迎,阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73, 77.
PENG YING, RUAN JIANG-JUN. Calculation of three-dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-73, 77.
- [10] OKANO D, TERAZONO M, AMANO K, et al. Bi-directional method for numerical conformal mappings of multiply connected domains by the charge simulation method[J]. Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 54(1):357-363.
- [11] AN L, JIANG X C, ZHU Y, et al. Sensitive insulator method: A new method to detect the faulty insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 29(4):37-40.
- [12] Amirjanov Adil. A changing range genetic algorithm[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(15):2660-2674.
- [13] 刘晓明,王尔智,曹云东,等. 采用优化模拟电荷法的三维电场计算 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 14-17, 55.
LIU XIAO-MING, WANG ER-ZHI, CAO YUN-DONG, et al. Computation of three dimensional electric field using the optimized charge simulation method[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2000, 15(6):14-17,55.
- [14] LIANG X D, DAI J J, ZHOU Y X, et al. Ultrasonic detection on crack of FRP rod in brittle feature of composite insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):110-114.
- [15] CHEN Y G, DENG M, LIN L H. A concise analysis of on-line monitoring system for high voltage insulator strings [J]. Power System Technology, 2005, 25(11): 83-85.
- [16] YAMAMOTO O, MARKON S, MORII H. Depression of insulator charging in vacuum by partial mechanical processing [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2007, 14(3): 606-612.

(编辑 王维朗)