

真空中典型沿面绝缘结构的电场分析

马 奎, 张冠军, 于开坤, 郑 楠, 严 璋

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 在高电压作用下,由复合绝缘介质构成的沿面绝缘结构的耐电强度远低于其绝缘材料自身的击穿场强,这一现象与其电场的分布特点密切相关。笔者针对真空中平行平板、平面和棒-板电极系统等多种典型沿面绝缘结构的电场分布进行了仿真计算,探讨了电极-介质结合处的间隙、圆台形绝缘子的圆锥角角度、平面电极的高度以及绝缘子介电常数等因素对电场分布的影响。仿真结果表明,接触间隙的存在导致局部电场的加强和电场方向的变化,间隙宽度越大、高度越小,间隙处电场畸变越大;圆锥角越大,绝缘子的介电常数越大,场强畸变也越大。该分析结果有利于真空中沿面绝缘结构的设计。

关键词: 真空; 沿面绝缘; 电场分析; 沿面闪络

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0015-05

Electric Field Analysis of Typical Surface Insulation Configurations in Vacuum

MA Kui, ZHANG Guan-jun, YU Kai-kun, ZHENG Nan, YAN Zhang

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

Abstract: Under high voltage stress, the electric strength of surface insulation system configured with compound dielectrics is far lower than the breakdown strength of its insulating material, which is closely related to its electric field distribution. The electric field distributions of typical surface insulation structures in vacuum was simulated, such as the parallel flat plate, planar and stick-plate electrode systems. Such influential factors were considered as the gap of electrode-dielectric contact, the coning angle of circular truncated cone, the height of planar electrode, and the dielectric constant of insulator, etc. The simulation results reveal that the contact gap results in the enhancement of local electric field and the change of its direction, more serious distortion of electric field will occur with larger contact gap, conical angle and dielectric constant or smaller electrode height. This conclusion will be helpful to the design of surface insulation structure in vacuum.

Key words: vacuum; surface insulation; electric field analysis; surface flashover

0 引言

真空沿面绝缘结构是高功率脉冲装置中最为薄弱的电气环节,其性能对于提高装置输出功率和保障装置安全运行起着重要作用。以真空绝缘中经常采用的氧化铝陶瓷为例,高纯度氧化铝陶瓷的临界击穿场强约为 300~400 kV/cm,真空约为 350 kV/cm,而氧化铝-真空系统的沿面闪络通常在几十 kV/cm 的外施电场作用下就发生^[1],从而使得真空中绝缘子的沿面闪络电压往往远低于同样绝缘距离的真空间隙和绝缘材料的体击穿电压,因而限制了脉冲功率系统的整体性能。

国际上对真空闪络现象的研究最早可以追溯到

二十世纪五六十年代^[2],近年来国内有些机构陆续开展研究^[3-7]。对这一现象的传统认识是基于电极-电介质-真空三者接合处的电场增强,很多研究者认识到了绝缘子的电场分布对其闪络特性有着重要影响^[1]。若固体介质与电极之间存在间隙,则交流电压下串联间隙中电场随绝缘材料与间隙之间介电常数的差异而增强。假设间隙的相对介电常数为 1,绝缘材料为 ϵ_r ,则接触处间隙中的场强将近似被加强 ϵ_r 倍,从而引发三结合处的电子发射或局部放电,进而发展为在较低的电场下沿绝缘材料表面的闪络。长期以来,研究者们一直在尝试通过优化电场分布来提高真空绝缘结构的耐电特性,如通过改变绝缘子的外形^[8-10]、将电极部分嵌入绝缘子中或改变三结合处几何形状^[11,12]等。近年来又提出了采用多层

收稿日期: 2007-11-30; 修回日期: 2008-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(50577054, 50777051); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0943)资助项目。

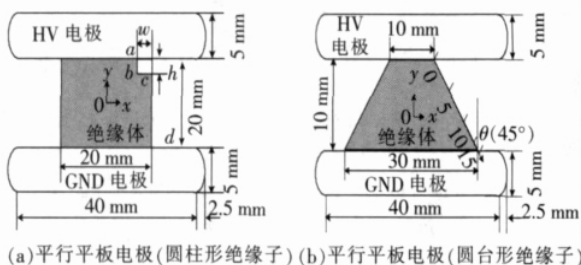
作者简介: 马 奎(1982-),男,回族,宁夏吴忠人,硕士研究生,主要从事固体介质真空闪络的研究。

高梯度绝缘子技术^[13]以及功能梯度材料^[14]等通过提高绝缘子材料自身的性能来提高其耐电性能,但是其机制还是改善绝缘子表面的电场分布。

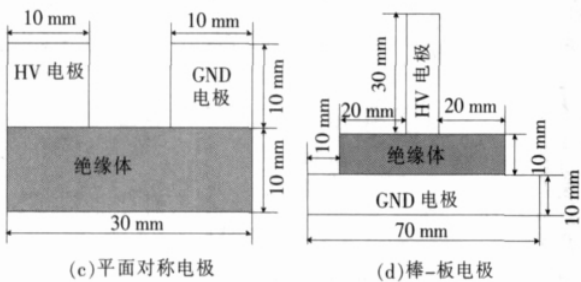
真空中固体绝缘的沿面闪络在本质上是一种发生在高电场下复合介质系统中的复杂的表面(材料的表面及表层)和界面(电极与材料的界面)物理现象^[15]。电气绝缘的击穿破坏,实质上是由于施加高电压在绝缘材料中形成了很强的电场导致的,电场优化对于提高绝缘子性能有着重要意义。笔者采用 ANSYSTM 软件对多种电极结构的电场分布进行了较为系统的仿真计算,对影响电场分布的诸多因素进行了分析,以期对绝缘结构的优化设计提供帮助。

1 典型沿面绝缘结构模型

根据工程实际中电极结构以及布置方式的不同,可以抽象出平行平板、平面以及棒-板 3 种典型电极系统,见图 1。此外,还有带辅助电极的平面结构、平面同轴结构电极等结构。图中标注了仿真用的几何尺寸。



(a) 平行平板电极(圆柱形绝缘子) (b) 平行平板电极(圆台形绝缘子)



(c) 平面对称电极 (d) 棒-板电极

图 1 典型真空沿面闪络的电极结构布置

平行平板电极结构的布置相对比较简单,见图 1(a)和(b),在工程中应用最为广泛。所采用的绝缘子具有圆柱形、圆台形以及为了增加爬电距离而采用的多种伞裙外形的轴对称结构。这种电极结构的电场特点是具有很强的切向分量,而当采用圆柱形绝缘子不考虑存在表面电荷时,沿介质表面的电场分布是准均匀的。平面电极结构的电场分布特点是具有很强的切向分量,见图 1(c),除了平面对称外,还有同轴圆柱的结构。这种电极结构对电极与绝缘子表面的粗糙度以及电极与绝缘子之间的压接工艺要求较高。棒-板电极结构的电场分布特点是具有很强的法向分量,见图 1(d)。

仿真中电极间施加电压统一取为交流 10 kV,

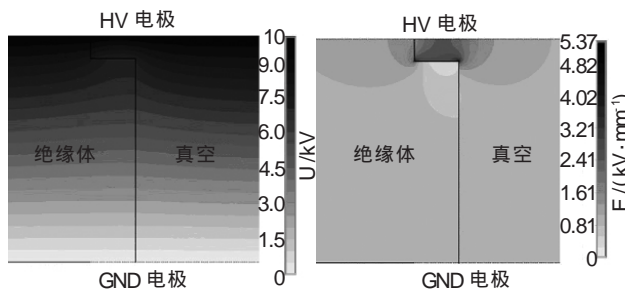
电场强度采用标么值,其基准值为平均场强 $E_{av}=U/L$ (U 是电极间施加电压, L 是绝缘子高度或长度),且在仿真过程中除特别考察介电常数的影响外,绝缘子的相对介电常数取为 10。

2 不同因素对电场分布的影响

2.1 电极-绝缘子间隙的影响

当电极与绝缘子间不存在间隙时,以平行平板电极(圆柱形绝缘子)为例,在不考虑绝缘子表面和体内存在电荷的情况下,电极间的等位线分布是均匀的,且平行于电极表面。由于绝缘子表面与电场方向平行,所以材料的介电常数对电场分布无影响,绝缘子-真空两侧电场均匀分布。实际中的介质表面不可能很平滑,在电极接触处容易形成很小的间隙,这一间隙对电场的分布有着重大影响,交变电场下间隙处的局部电场强度近似被加强介质的相对介电常数,倍。目前被认可的真空中沿面闪络的二次电子发射雪崩模型即认为,初始电子场致发射从阴极三结合(CTJ)处开始^[1]。

参照图 1(a),现假设绝缘子在阳极三结合处存在一个宽度 w (图中 b 和 c 点之间距离)、高度 h (图中 a 和 b 点之间距离)的矩形间隙。图 2 给出了电极间的电位和电场分布。可以看出,间隙的影响是很大的,等位线不再平行于电极表面而是向间隙处集中,电场也因此发生畸变,在间隙的边缘 b 和 c 点处电场明显被加强。



(a) 电位分布 (b) 电场分布

图 2 平行平板电极间的电位和电场分布

图 3 给出了当间隙宽度 w 为 2mm、高度 h 为 1mm 时绝缘子表面真空侧从 a 点到 d 点的电场分布情况,横坐标为各点沿绝缘子表面的距离, a 、 b 、 c 、 d 各点对应位置在图中标出。考虑到电场方向的变化,规定在图 1(a)中从高压电极垂直指向接地电极的电场方向为 0 方向,逆时针方向旋转时电场方向角为正,顺时针旋转时为负,且 $-180^\circ < \theta < 180^\circ$; 则沿面电场方向的变化见图中 曲线所示。可以看出,在 b 、 c 两拐点处电场的 X 轴方向分量 E_x 和 Y 轴分量 E_y 均被明显增强,但却是以不同方式增强的: b 点处, E_x 达到正的最大值(3.62 p.u.), E_y 达到负的最大值(-3.96 p.u.),而 c 点处 E_x 达到负的最大值(-3.96 p.u.),而 E_y 达到最大值 50.13%; 从 b 至 c 点,

E_x 先是迅速减小至相对较小值, 然后缓慢减小, 并转为负值(2.5 mm处), 在 c 点处 E_x 达到负的最大值 (-3.51 p.u.), E_y 则先是迅速上升, 然后又连续减小至 c 点处的负的最大值 (-3.88 p.u.), 而达到负的最大值 -76.45°; 从 c 点至 d 点, E_x 的绝对值连续减小至 0, E_y 跃变至负的最小值 (-0.53 p.u.) 后最终趋向于 -1 p.u., 而趋向于 0°; 至此间隙对电场的畸变影响逐渐消除。在 b 点和 c 点处电场的增强分别达到 5.37 p.u. 和 5.23 p.u.。

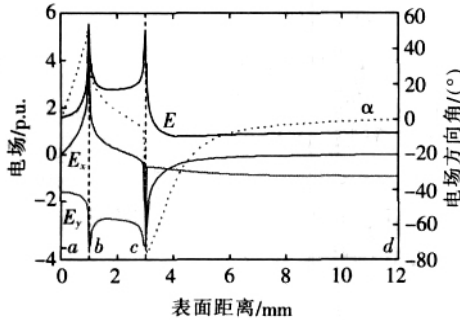


图3 沿绝缘子表面的电场分布 ($h=1\text{ mm}, w=2\text{ mm}$)

图4反映了间隙大小对电场的影 响, 给出了当间隙高度 h 不变(1 mm)、宽度 w 由 0 mm 逐渐变为 2 mm 时以及当间隙宽度 w 不变(1 mm)、高度 h 由 0 mm 变为 2 mm 时 b、c 点电场强度的变化情况。图4(a)中随着 w 的增加, b、c 点场强逐渐增大, b 点电场稍大于 c 点, 两者差先是逐渐拉大, 然后又逐渐减小。场强方向变化不大, 在 w 较小时, b 点处缓慢增大, 说明 b 点电场方向随 w 增大而顺时针方向旋转, c 点处负方向缓慢增大, 说明 c 点电场方向随 w 增大而逆时针旋转。在图4(b)中 c 点场强随 h 的增加一直减小, 而 b 点场强随 h 的变化比较特殊, 0.3 mm 前场强随 h 的增加而增大, 0.3 mm 后场强随 h 的增加而减小, 注意到 c 点场强恰恰是在 $h = 0.3\text{ mm}$ 范围内超过 b 点的, 说明当 h 减小使得 c 点场强大于 b 点后, c 点集中了更多的电力线, 而 b 点集中的电力线相对减少, 所以 b 点场强反而随 h 的减小而降低了。场强方向随 h 的变化与前者类似。总的说来, 间隙的宽度越大、高度越小, b 点和 c 点的电场加强越明显, 局部电场可达 5.5 p.u. 以上。

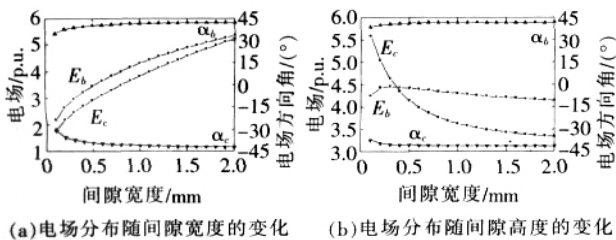


图4 间隙尺寸对电场分布的影响

2.2 圆锥角角度的影响

对于图 1(b) 的圆台形绝缘子平行结构电极,

图 5 给出了当圆台圆锥角 $\theta=45^\circ$ 时绝缘子的电位和电场强度分布的情况, 场强的最大值位于电极三结合处, 且始终位于圆台绝缘子的细端与电极的夹角处。

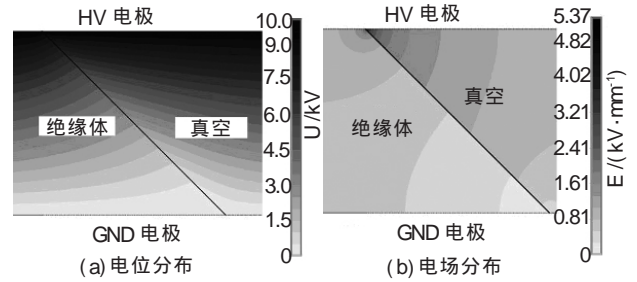


图5 圆台形绝缘子的电位和电场分布 ($\theta=45^\circ$)

图 6 为 $\theta=45^\circ$ 时沿绝缘子表面的电场强度分布, 图中横坐标按图 1(b) 中沿面距离选取。可以看出, E_x 分量的变化可以大致分为 4 个阶段: 0~0.5 mm 为急剧下降阶段(0.78 p.u. 降至 0.2 p.u.)、0.5~12.0 mm 为缓慢下降阶段(0.2 p.u. 降至 -0.2 p.u.)、12~13.5 mm 为缓慢上升阶段(-0.2~-0.1 p.u.)、13.5~14.1 mm 为急剧上升阶段(-0.1~0 p.u.)。 E_y 的变化也是分阶段的: 0~0.5 mm 为急剧上升阶段 (-5.5~-3.0 p.u.), 0.5~2.0 mm 上升较快(-3.0~-1.6 p.u.), 2.0~13.8 mm 为近似线性上升阶段 (-1.6~-0.4 p.u.), 13.8 mm 以后又为较快的上升(-0.4~0 p.u.)。值得注意的是, 沿绝缘子表面电场强度的 Y 轴方向分量 E_y 远大于 X 轴分量 E_x , 所以整体表面场强的分布与图中的 E_y 曲线相近。

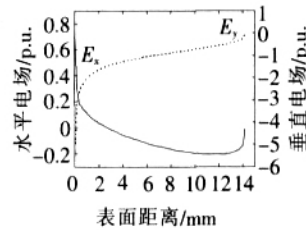


图6 沿绝缘子表面的电场分布

圆锥角 θ 的大小对绝缘子的表面电场分布有重要的影响。图 7 给出了当 θ 由 0~65 变化时场强最大值和最高场强的方向的变化情况, 电场方向角的定义参照前述。随着 θ 的增大, 电场最大值单调增大, 当 $\theta=65^\circ$ 时, E 达到 12.34 p.u., 随 θ 变化, 最高电场的角度波动不大, 当圆锥角为 45° 时, 最高电场的角度达到负的最大值(-0.84°)。

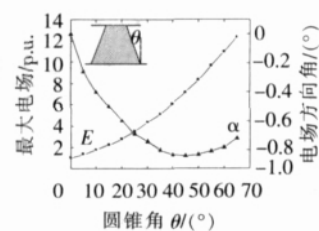


图7 圆锥角 θ 大小对电场分布的影响

不同圆锥角时的沿面闪络电压变化见图 8^[16]。

可以看出，为负值时的闪络电压值明显小于为正值时，这是因为当 $\theta < 0$ 时，从 CTJ 处场致发射的电子更容易碰撞绝缘子表面，从而更容易诱发沿面闪络。此外，圆锥角的改变对于 ns 级脉冲作用下闪络电压的影响似乎要比 μs 级脉冲作用下闪络电压的影响大些。在 θ 约为 -20° 和 0° 时，二者的闪络电压值分别达到最低，且在数值上相差不大。当 θ 约为 $+45^\circ$ 时，二者的沿面闪络电压值几乎同时达到最高，但在数值上却相差了 1.5 倍左右。而此时图 7 中最高电场的角度达到负的最大值。对比图 6，虽然角度越大三结合处电场越强，越容易发射电子，但同时沿面距离也越长。综合考虑圆锥角和沿面距离的影响，随着角度的增大，闪络电压有先增加后减小的趋势。针对图 8 所体现出的圆锥角对闪络电压的影响，笔者认为，闪络电压在 θ 约为 $+45^\circ$ 时最高、 $-20^\circ \sim 0^\circ$ 时最低，应是局部电场、沿面距离、电子碰撞表面等多个因素共同影响的结果。

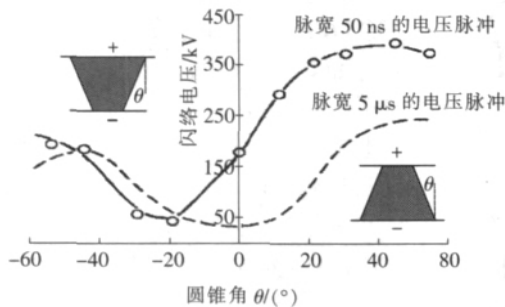


图 8 沿面闪络电压 V_f 与绝缘子圆锥角 θ 的关系曲线 (绝缘子为长度 12.7 mm 的有机玻璃)

2.3 电极高度的影响

当使用平面对称结构和同轴结构的电极时，电极的高度也会对电场的分布产生影响。电极高度不同时电场的仿真结果见图 9。电场的最大值出现在三结合处，随着电极高度的增加，电场强度的最大值以类指数形式衰减。相比平面对称电极结构，平面同轴结构的电场更加发散，因此最大电场值要高，如图 9 所示，而随着电极高度的增加，电场有变均匀的趋势。对于平面对称电极，随着电极高度在 2~20 mm，最大电场一直随电极高度增加而保持衰减，而同轴结构电极在 12 mm 以后就基本保持不变。但总的说来，电极高度对电场的影 响不大，在 2~20 mm 的电极高度变化范围内，平面结构电场强度的最大值由 7.98 p.u. 降至 7.84 p.u.，降幅为 1.75%；同轴结构电场强度的最大值则由 12.88 p.u. 降至 12.65 p.u.，降幅为 1.78%。

2.4 介电常数的影响

对于平行结构电极来说，由于绝缘子是处在一个准均匀的电场内，有静电场边界条件，绝缘子的介电常数 ϵ_r 不影响绝缘子表面的电场分布，但是对于平面结构、同轴结构和针板结构电极，绝缘子的介电常数对电场分布也有影响，图 10 给出了当 ϵ_r 由 1~

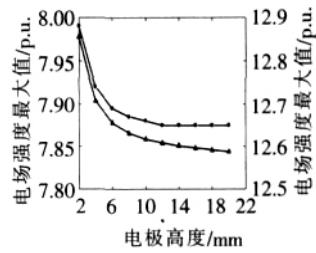


图 9 电极高度对电场强度最大值的影响

20 变化时电场强度最大值的变化情况。场强最大值随 ϵ_r 变化类似对数函数，在 ϵ_r 较小时最大值随 ϵ_r 的增大上升较快，在 ϵ_r 较大时增长变缓。其中同轴结构和针-板结构电极的变化趋势较为相近，而平面结构电极在同一 ϵ_r 时较前二者小，介电常数大于 10 以后，平面结构电极的场强基本不变，针-板结构和同轴结构还继续增长。三者表现出的电场增加幅度的差别应该与它们的电场发散程度相关，电场越发散，局部电场的畸变越显著。

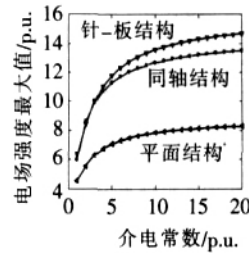


图 10 介电常数对电场强度最大值的影响

3 结语

通过对电极与绝缘子接触面处矩形间隙附近电场的仿真计算，发现间隙的存在导致局部电场的加强和电场方向的变化，间隙的宽度越大、高度越小，间隙处的电场畸变越大，在文中的仿真条件下，局部电场可被加强到电极间平均电场的 5.5 倍以上。

圆台型绝缘子电场的最大值出现在圆台细端与电极的三结合处，圆锥角越大，场强畸变也越大，当圆锥角 65° 时局部电场可达 12 p.u. 以上。初步认为，闪络电压在圆锥角约为 45° 时最高、 $-20^\circ \sim 0^\circ$ 时最低的现象是由局部电场、沿面距离、电子碰撞表面等多个因素共同作用的结果。

绝缘子的介电常数越大，局部电场的加强倍数也越大，同时电场越不均匀，电场随介电常数的加强越大，在文中表现为相对平面对称电极结构，棒-板结构和同轴结构电场随介电常数的增加而增加更快。

参考文献:

[1] MILLER H C. Flashover of Insulators in Vacuum, Review of the Phenomena and Techniques to Improve Holdoff Voltage [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 512-527.
 [2] HAWLEY R. Solid Insulators in Vacuum-a Review [J]. Vacuum, 1968, 18(7): 383-390.

- [3] 丁立健, 李成榕. 真空中绝缘子的沿面闪络现象 [J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 53-57.
- [4] 张冠军, 杨敏中, 严璋等. 采用光学方法研究陶瓷绝缘材料的沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 27-30, 36.
- [5] 汤俊萍, 邱爱慈, 陈维青等. 真空中聚乙烯膜在纳秒脉冲电压下的沿面闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 1 019-1 022.
- [6] 雷杨俊, 肖定全. 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究[J]. 绝缘材料, 2004, 37(3): 29-35.
- [7] GAO W, SUN G S, PAN Y. et al. Dependence of Flashover Voltage on Gas Pressure in Vacuum [C]// The 12th Asian Conf. on Electrical Discharge (ACED), Shenzhen, China, 2004: 385-388.
- [8] ABDEL-SALAM M, STANEK E K. Optimizing Field Stress on High-voltage Insulators [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1987, 22(1): 47-56.
- [9] ALLEN N L, MIKROPOULOS P N. Profile Effect on Surface Flashover in a Uniform Field [C]// High Voltage Engineering Symposium 1999, London, 1999(1): 216-219.
- [10] EGIZIANO L, SPAGNUOLO G, TUCCI V. Profile Optimization for an HV Insulator in Vacuum [C]// Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Quebec, 1996: 357-360.
- [11] PILLAI A S, HACKAM R. Optimal Electrode-solid Insulator Geometry with Accumulated Surface Charges [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1984, 19(4): 321-331.
- [12] NADOLNY Z, ZIOMEK W. Field Stress Control for Spacer in Vacuum Using Varied Geometry of Triple Junction [C]// XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, 1996: 527-531.
- [13] SAMPAYAN S E, VITELLO P A. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 334-339.
- [14] KATSUMI KATO, MUNEAKI KURIMOTO, HIDEKI SHUMIYA, et al. Application of Functionally Graded Material for Solid Insulator in Gaseous Insulation System [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 362-372.
- [15] 张冠军, 赵文彬, 郑楠等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 30-35
- [16] MILTO O. Pulsed Flashover of Insulator in Vacuum [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1972, EI-7(1): 9-15.

(上接第10页)

- 结合神经网络诊断变压器故障 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 4-8.
- [3] 章剑光. 变电设备状态检修应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [4] 徐文, 王大忠, 周泽群, 等. 结合遗传算法的人工神经网络在电力变压器故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 109-112.
- [5] 贾嵘, 蔡振华, 康睿. 基于最小二乘支持向量机的系统边际电价预测[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 145-148.
- [6] 王少芳, 蔡金铨, 刘庆珍. 基于改进 GA-BP 混合算法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 30-33.
- [7] 王少芳, 蔡金铨. GA-BP 算法在变压器色谱诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 3-6.
- [8] SHI Yu-hui, EBERHART R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]// Proc. IEEE Int Conf. on Evolutionary Computation Anchorage: IEEE, 1998: 69-73.
- [9] EBERHART R, KENNEDY J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]// Proc. 6th Int Symposium on Micro Machine Human Science, Nagoya, 1995: 39-43.
- [10] SUGANTHAN P N. Particle Swarm Optimizer with Neighborhood Operator [R]. Proceedings of Congress on Evolutionary Computation, 1999.
- [11] 李天云, 程思勇, 董建东, 等. 基于 Elman 神经网络的油浸式电力变压器故障诊断[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 55-57.
- [12] 曹永刚, 周玲, 丁晓群, 等. 基于概率神经网络的电力变压器故障诊断[J]. 继电器, 2006, 34(3): 9-11.
- [13] 贾嵘, 徐其惠, 李辉, 等. 最小二乘支持向量机多分类法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 110-113.

(上接第14页)

- [2] HOSSACK J A, MENAL J, MCARTHUR S D J, et al. A Multi-Agent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(2): 639-647.
- [3] MCARTHUR S D J, CATTERSON V M. Multi-Agent Systems for Condition Monitoring [M]. United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005.
- [4] MANGINA E E, MCARTHUR S D J, MCDONALD J R. COMMAS (COndition Monitoring Multi-Agent System) [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2001, 4(3): 279-282.
- [5] 徐剑, 黄成军, 金浩, 等. 基于小波集合的局部放电信息提取算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 36-40.
- [6] 徐冰雁, 黄成军, 钱勇, 等. 多小波相邻系数法在局部放电去噪中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 61-64, 70.
- [7] 徐剑, 黄成军. 局部放电窄带干扰抑制中改进快速傅里叶变换频域阈值算法的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 80-83.
- [8] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
- [9] 邵震宇, 黄成军, 赵亚奎, 等. 用 PSO 算法训练神经网络抑制发电机局放随机脉冲干扰 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 49-52.