

基于超声波信号的 GIS 内自由金属颗粒危险评估研究

黎大健¹, 杨景刚², 米楚明³, 吴磊⁴, 李彦明⁴

(1. 广西电网公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 江苏电力试验研究院, 江苏 南京 210010; 3. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了研究 GIS 腔体内自由运动金属颗粒对 GIS 绝缘劣化的危险程度, 设计了一个模拟此类缺陷的模型, 并测量了不同尺寸和形状的自由运动颗粒产生的超声波信号, 最后分析了这些信号的工频相位相关性、幅值以及飞行时间等几个要素的特性, 并根据这些要素评估金属颗粒的危险程度。结果表明: 颗粒静止不动发生放电时, 超声波信号幅值较小且有较强的相位相关性, 而当颗粒自由跳动时, 信号幅值非常大且相位相关性较弱, 颗粒的尺寸和形状会影响颗粒的飞行时间, 与球状颗粒相比, 丝状颗粒的飞行时间随电压的升高有更显著的变化, 因此它们对 GIS 绝缘劣化的影响严重程度不一样, 并且这些信号的幅值、飞行时间的变化分布具有周期性。

关键词: GIS; 自由金属颗粒; 超声波信号; 放电

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)01-0053-05

Risk Assessment of Basis of Free Metallic Particles in GIS Based on Ultrasonic Signal

LI Da-jian¹, YANG Jing-gang², MI Chu-ming³, WU Lei⁴, LI Yan-ming⁴

(1. Guangxi Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China; 2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 210010, China; 3. School of Energy, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the risk of free metallic particles in gas insulated switchgear (GIS) chamber, a test cell is designed for simulation. Ultrasonic signals generated by the free particles with different shape and size are detected to extract the feature parameters such as power frequency phase correlation, amplitude and flight time. Then the harm of the particles is analyzed based on these parameters. The experimental results show that the ultrasonic signals of partial discharges are weak and have strong phase correlation when the particles are static in the cell, and the signals become strong and have weak phase correlation when the particles dance. And the results also show that the flight time varies with the particles' shape and size, and the flight time of cylindrical particles is more sensitive to the test voltage than that of the spherical particles. This study indicates that different particles impose different harm to the insulation of GIS. Moreover, the signal amplitude and particles flight time are periodical.

Key words: gas insulated switcher; free metallic particle; ultrasonic signal; discharge

0 引言

GIS 由于其突出的特点, 在电力系统中得到越来越广泛的应用。但由于在制造、装配以及运行过程中不可避免会产生缺陷, 会对 GIS 绝缘水平造成一定的损害, 一旦造成断电事故, 维修时间将会比其他常规的空气绝缘设备要长许多, 如果在事故的早期阶段能检测到绝缘缺陷的发生, 对其严重程度的评估, 有计划地安排维修, 将能减少设备的损坏, 避免事故发

生所带来的巨大损失。因此, 对其缺陷的检测、评价成为 GIS 绝缘状况监测的重要内容^[1-3]。

GIS 中最常见的缺陷是存在自由运动颗粒, GIS 绝缘腔中自由导电微粒的存在是很难避免的, 这些金属碎屑有细长的线形、螺旋线形、球形、粉末状等不同形状, 它们在电场中带电后受静电力作用会产生运动, 严重影响 GIS 设备的绝缘性能。自由运动的金属颗粒被认为是对 GIS 绝缘性能危害最大的缺陷源, 导电微粒可使一段绝缘距离短路从而造成击穿故障, 特别是当自由颗粒跳动到靠近高压导杆的高

收稿日期: 2009-09-10

作者简介: 黎大健(1983—), 男, 助理工程师, 从事电器技术研究工作。

场强区域时,其危险程度增加^[4]。

对自由颗粒的研究大多使用电检测法(超高频法及脉冲电流法),该法检测了颗粒在GIS中不同位置时的放电信号,并统计了放电脉冲出现的时刻及相位^[5-8],而颗粒在运动中不一定会产生放电信号^[9],所以仅用电检测法不能描述颗粒的运动状态。颗粒撞击腔体和飞行中发生局部放电时都会产生超声波,因此,超声波法是检测GIS内自由运动颗粒缺陷一种比较有效的检测手段。

笔者设计和建立了一个GIS中自由运动颗粒的缺陷模型单元,使用超声绝缘检测仪器采集并分析不同尺寸和形状金属颗粒产生的超声波信号,根据信号的相位相关性、飞行时间以及信号幅值等参数的变化规律研究颗粒对GIS绝缘的危险程度评估。

1 自由颗粒受力分析

自由颗粒与电极碰撞时获得一定的电荷量,同时金属颗粒在电场中会在颗粒两端感应不同极性的电荷,因此会受到库仑力的作用,当库仑力大于颗粒自身的重力时,颗粒会从腔体内壁浮起,并在其表面上跳动^[10]。

颗粒受到库仑力的大小 F_q 为

$$F_q = k_q E \quad (1)$$

式(1)中, k 为电镜像力引起的修正系数,若微粒处于悬浮状态时无放电发生,则认为微粒所带电荷量为前一次与电极碰撞时获得的电荷量 q , 以典型的球形和丝状颗粒为例,颗粒与电极碰撞获得的电荷量可表示为

$$q_t = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r E_0 r_0^2 \quad (2)$$

$$q_{\text{wire}} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l^2 E_0}{\ln(2l/r) - 1} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, ε_0 、 ε_r 分别为真空中介电常数和介质相对介电常数, r_0 为球半径, l 、 r 分别为丝状颗粒的长度和截面半径。除了库仑力和重力的作用,颗粒还会受到摩擦力、气体浮力以及气体粘滞力的作用。

2 故障单元

为了模拟GIS腔体中自由运动颗粒缺陷,笔者设计了如图1所示的试验模型。模型内充以0.35 MPa的 SF_6 气体,采用平板电极模拟GIS中稍不均匀的电场,高压电极为 $\phi 45$ mm的铜电极,距离接地电极约25 mm。选取颗粒直径为1 mm、1.5 mm的钢球以及 $r=0.5$ mm、 $l=5$ mm的铜丝。同时测量系统还应尽量避免现场噪声的干扰。

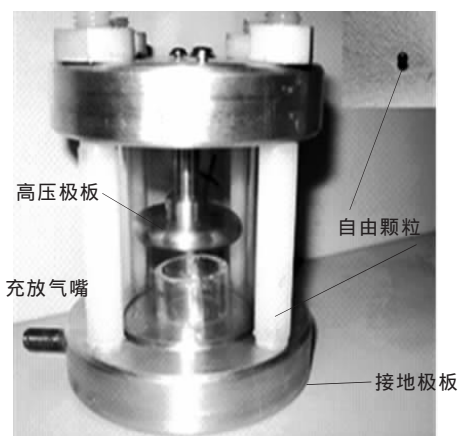


图1 人工缺陷装置单元照片

3 试验结果及分析

每次试验仅以单独颗粒为研究对象。每个超声脉冲信号只考虑第1个波峰的特征参数,图2为球状颗粒产生的超声脉冲序列,其特征参数包括:脉冲出现对应工频相位 φ , 相邻两个脉冲之间的时间间隔 Δt (飞行时间),脉冲幅值 A 。每次采集1000个脉冲进行统计分析。

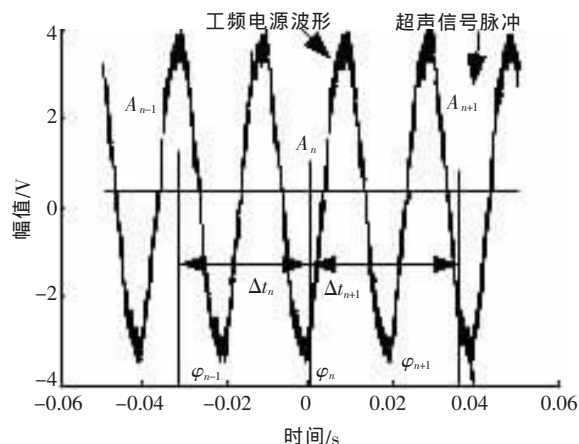


图2 运动颗粒超声波信号特征参数示意图

3.1 相位相关性

当施加电压较低时,自由颗粒获得的库仑力还不足以使其自由跳动,而静止于内壳上,这与地电位凸起尖刺缺陷相似,在当电压达到一定幅值时,会发生尖端类型局部放电,其脉冲相位分布谱图(PRPD)会呈现单峰或双峰的情形,见图3。可以看到,放电最先发生于施加电压正峰值附近,随着电压升高,正负峰值附近均能采集到放电信号,其幅值较小,均小于2 mV。

电压升高到一定值,自由颗粒可以在装置空间内自由跳动,颗粒自由跳动时的超声脉冲相位分布

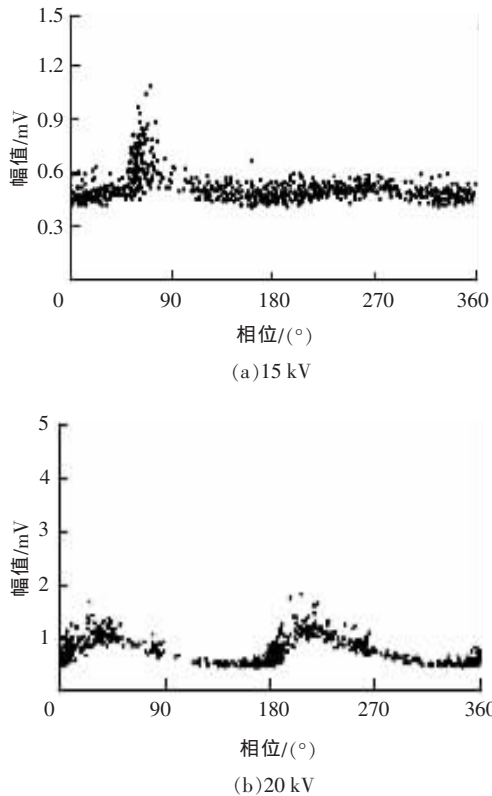


图3 $\phi 1\text{ mm}$ 的球状颗粒局部放电产生的单峰和双峰两种 PRPD 谱图

谱图见图4。图中施加电压为30 kV, SF_6 相对压力为0.35 MPa, 每个相位区间上都有相当数量的脉冲分布, 没有明显的相位相关性, 说明运动颗粒与外壳碰撞的时刻是随机的。

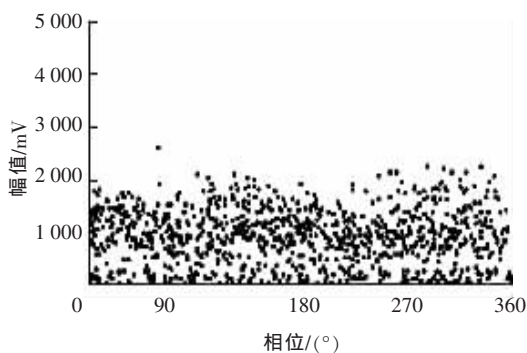


图4 $\phi 1\text{ mm}$ 的球状颗粒自由跳动时超声信号相位分布谱图

颗粒在飞行中是浮电位, 与地电位有电压差。当颗粒飞近地电位时, 可能发生放电, 与电极撞击时, 会发生电荷的转移, 因此电检测法可以测量这两种脉冲信号。图5为电检测法测量颗粒自由跳动时的 PRPD 谱图, 可以看到信号主要集中在施加电压的正负峰值附近。

以上研究表明, 通过超声波信号的相位相关性可以知道颗粒的运动状态。当颗粒静止时, 颗粒发生放电, 此时超声波信号由放电产生, 其幅值较小,

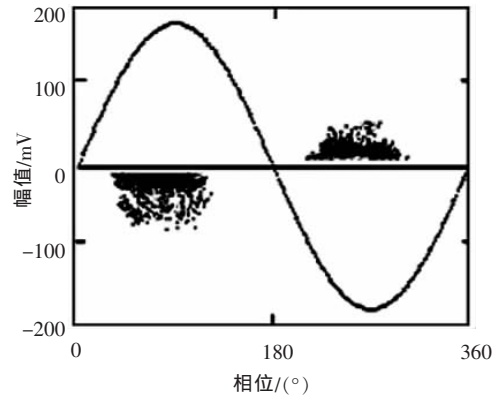


图5 颗粒局部放电信号的 PRPD 谱图

且有较强的相位相关性; 而当颗粒自由跳动时, 撞击产生的超声信号幅值非常大, 放电产生的超声信号埋没于其中^[6], 超声法检测结果表明, 机械波信号没有明显的相位相关性。

3.2 飞行时间

颗粒飞行时间与其自身重力、颗粒形状、起跳时获得的电荷量以及颗粒与腔体的反弹系数等均有很大关系^[9]。由前面分析可知, 重力越小, 颗粒越容易克服重力的作用而自由运动, 颗粒起跳时携带的电荷越大, 初始动量越大, 飞行距离越长; 另外, 颗粒头部越尖, 飞行中越容易发生放电(“飞萤”现象^[9-11]), 会损失一部分电荷或电场力, 飞行高度下降, 飞行时间变小。腔体的反弹系数大小也能影响运动颗粒的飞行高度。

颗粒的飞行时间越长, 跳到高场强区的几率越大, 因此造成事故的几率也就越大, 文献[10]通过超声脉冲发生率随施加电压的变化, 可预见飞行时间的变化情况, 3种颗粒在不同电压下的脉冲率变化曲线见图6, 每组电压下重复做多次实验, 取平均值, 可以看到, 2种球状颗粒随着施加电压的增加, 由于飞行时间的增大, 脉冲发生率呈线性减小, 而丝状颗粒随着电压的增加, 变化不大。但是, 统计颗粒最大飞行时间可以发现, 如图7所示, 3种颗粒随着施加电压的增加, 最大飞行时间都有所上升, 尤其是

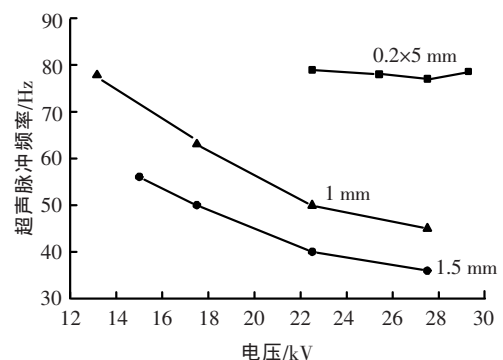


图6 脉冲率变化曲线

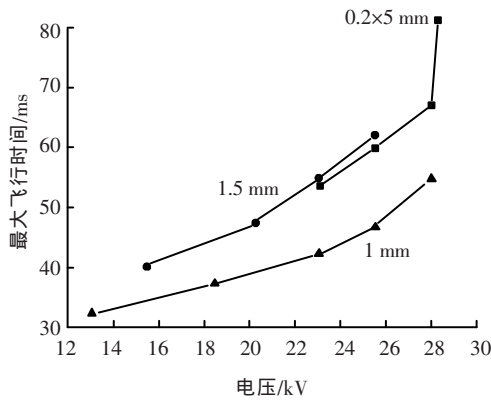


图7 最大飞行时间变化图

丝状颗粒的飞行时间变化最大。在很小的电压变化范围内,飞行时间由 50 ms 迅速上升到 76 ms,约为 3 个工频周期。

脉冲发生率统计的是多个脉冲之间时间间隔的平均值,而实际上,在 GIS 中只要金属颗粒有一次机会跳到危险区域,就可能出现断电事故,因此统计最

大飞行时间的方法更能直接表现颗粒的危险程度。

另外,当气压从 0.35 MPa 下降到 0.1 MPa 时,颗粒的运动和超声波信号并无明显变化,表明气体的摩擦力、浮力以及粘滞力对试验结果影响不大。

以上分析表明,尺寸较大的球形颗粒飞行时间较大,且丝状颗粒比球形颗粒飞行时间更长,因此颗粒跳到高场强区域的可能性越大,甚至可能穿越整个间隙撞击高压电极^[12]。目前已经有研究结果表明,丝状颗粒的穿越时间约为几个工频周期^[13],对 GIS 绝缘的危险程度较高。

3.3 信号幅值与飞行时间

图 8 为两种不同形状自由运动颗粒在 15~30 kV 下的飞行时间图。图中三角状的脉冲信号分布群的周期约为 20 ms,随着施加电压的增加,颗粒飞行高度增加,即飞行时间增大,颗粒撞击外壳产生的超声信号幅值也就越大,因此三角状脉冲信号群增多,且信号幅值呈上升趋势。

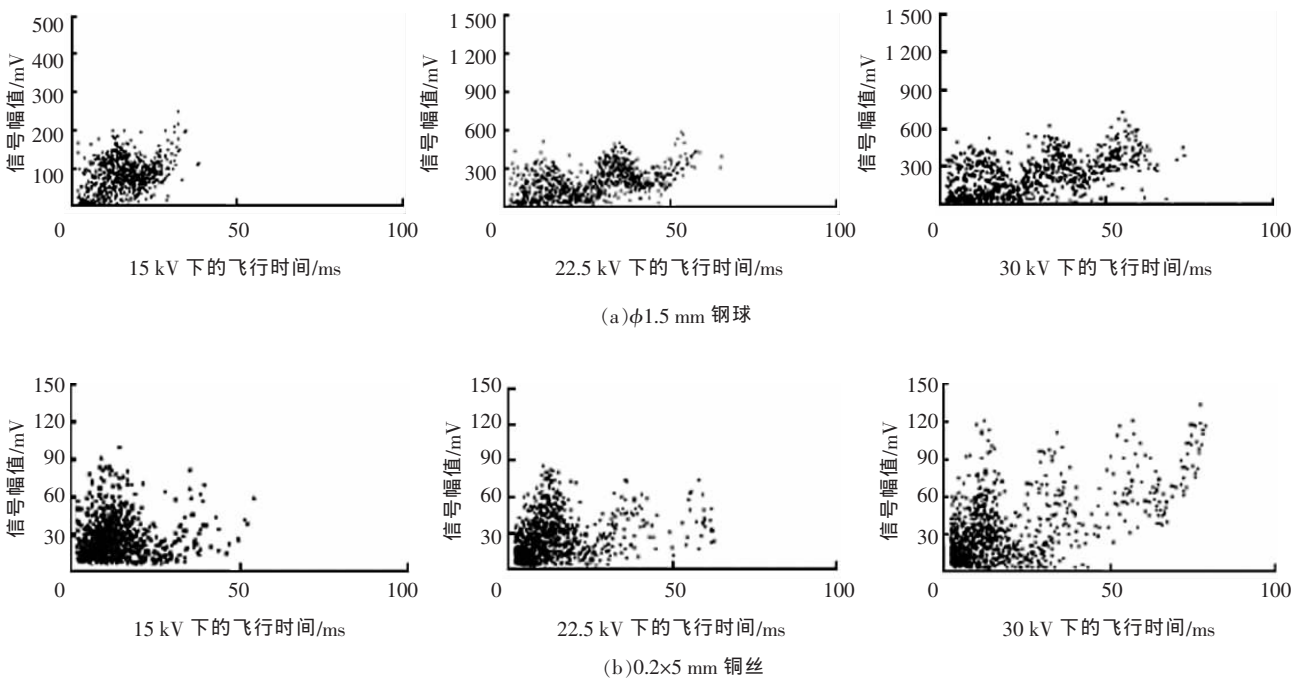


图8 电压变化时颗粒的飞行时间与信号幅值图

在施加电压一定时,总是先出现飞行时间较小的信号,随后缓慢增加到一个稳定的值。一般来说,当颗粒与外壳撞击时,颗粒由于反弹(反弹系数一般小于 1.0)就会获得一个初始向上的速度,如果颗粒与地电极碰撞获得的电荷与前一次相等或甚至更大,则其飞行时间变大^[9]。

统计各个电压下超声波脉冲密度随飞行时间变化的分布图,其结果都比较相似,图 9 为 30 kV 时 0.2x5 mm 铜丝自由飞行时 1 000 个脉冲随飞行时间

变化的分布图,从图 9 中可以看到,飞行时间分布的变化周期也与工频周期大致相同:第 1 个峰值出现在 12~14 ms 处,而下一个出现在 (13+20) ms,从而可以推算出球撞击外壳后在空中的飞行时间约为 (13+n×20)ms,其中 n=0,1,2...

基于以上分析可知,虽然颗粒撞击外壳的时刻与工频相位无关,但超声信号幅值、飞行时间却都表现出较强的周期性变化。当颗粒与金属外壳碰撞时,立刻得到新的电荷,从而有一个向上的电荷力使其

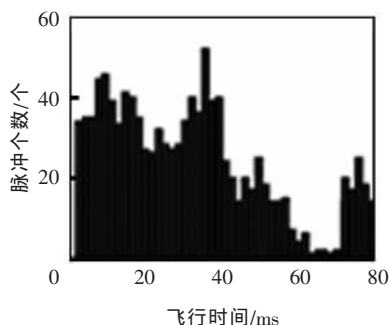


图9 脉冲密度的飞行时间分布图

向上运动,如果忽略飞行中发生放电导致的电荷损失,奇数次半个工频周期后颗粒将获得反方向的电荷力,当电荷力达到最大且和重力方向一致(指向地电极)时,撞击的动量达到极大,检测到的超声信号也达到极大,因此在模式图上体现出飞行时间与信号幅值的比较有规律地周期性变化特性^[1]。

这是一种典型的GIS中自由颗粒缺陷模式识别图,因为其他诸如电晕放电、悬浮放电等均不会有如此模式图。通过飞行时间与信号幅值图可以判断GIS内是否存在自由运动金属颗粒,进一步还可以根据三角状信号分部群的个数、幅值估算颗粒的尺寸及重量^[9],从而评估颗粒的危险程度。

4 结语

设计了一个用于模拟GIS腔体内自由运动颗粒的缺陷模型单元,并分析了不同形状、尺寸的自由运动颗粒在不同施加电压下的超声波信号特征,用以评估颗粒对GIS绝缘的危险程度,试验结果表明,当颗粒跳动到高场强区时,危险程度加剧,通过飞行时间与信号幅值图可以判断腔体内是否存在自由运动的金属颗粒,超声信号的幅值以及飞行时间均随施加电压的增大而都有较强的周期性变化,其变化周期约为20ms(工频周期),当颗粒自由运动时,超声信号主要体现颗粒撞击外壳机械振动的声波信号特性,其相位相关性较弱,且信号幅值较高;颗粒静止不动发生放电时,超声信号有单峰或双峰的相位分布形式,信号幅值较低。颗粒的飞行时间均随着施加电压的升高而增大,且丝状颗粒较为明显,因此相对

球状颗粒,丝状颗粒的危险程度越高。

参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友.电力设备的在线监测与故障诊断[M].北京:清华大学出版社,2006:252-266.
- [2] 刘卫东,金立军,黄家旗,等.日本SF₆电器局部放电监测技术研究近况[J].高电压技术,2001,27(2):76-79.
- [3] LUNDGAARD L E,TANGEN G,SKYBERG B et al.Acoustic Diagnoses of GIS:Field Experience and Development of an Expert System[J].IEEE Trans Pow.Del.,1992,7(1):287-294.
- [4] FERAZ AHMED,AHMAD BIN DARUS,ZULKALNAIN YUSOFF,et al. Free Moving Metallic Particle Detection in GIS [C].APSCOM-97,Hong Kong,1997:314-316.
- [5] HOLMBERG M E,GUBANSKI S M.Discharges from Moving Particles in GIS[J].Power Delivery,IEEE Transactions, 1998,13(1):17-22.
- [6] IRWIN T,LOPEZ-ROLDAN J,CHARLSON C.Partial Discharge Detection of Free Moving Particles in GIS by the UHF Method: Recognition Pattern Depending on the Particle Movement and Location [C].Power Engineering Society Winter Meeting,2000.IEEE,2000(3):2135-2140.
- [7] VISINTIN M,NIEMEYER L,RABACH G.The Characteristics of Partial Discharge from Particles in GIS [C].Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation,Pittsburgh,PA USA,1994:277-282.
- [8] OKABE S,YAMAGIWA T,OKUBO H.Detection of Harmful Metallic Particles Inside Gas Insulated Switchgear Using UHF Sensor[J].IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation. 2008,15(3):701-709.
- [9] LUNDGAARD L E.Particles in GIS Characterization from Acoustic Signatures[J].IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation.2001,8(6):1064-1074.
- [10] LUNDGAARD L E,RUNDE M,SKYBERG B.Acoustic Diagnoses of Gas Insulated Substations:a Theoretical and Experimental Basis[J].IEEE Trans Pow. Del.,1990,5(4):1751-1759.
- [11] RUNDE M,AURUD T,LJEKELSOY K,et al.Risk Assessment Basis of Moving Particles in Gas Insulated Substations [J]. Power Delivery,IEEE Transactions,1997,12(2):714-721.
- [12] 贾江波.GIS中稍不均匀场内自由导电颗粒的运动特性与无害化方法研究[D].西安:西安交通大学,2007.
- [13] SELLARS A G,FARISH O,HAMPTON B F.Assessing the Risk of Failure Due to Particle Contamination of GIS Using the UHF Technique[J].IEEE Trans. Dielect. Electr. Insulation, 1994(1):323-331.

《2009 输变电年会论文集》

简讯

为了全面反映我国目前输变电领域技术及产品的实际水平和发展趋势,加速产品信息的流通,帮助企业 and 用户及时了解、掌握国内输变电行业最新动态,以利于推广新产品、新技术,由中国电机工程学会变电专业委员会、中国电工技术学会输变电设备专业委员会、中国电工技术学会大容量试验技术专业委员会、中国电工技术学会电工陶瓷专业委员会、陕西省电工技术学会联合编写了《2009 输变电年会论文集》。该书共收录论文 76 篇,范围涉及设计技术;电器智能化;特高压技术;试验、检测技术;绝缘子、避雷器技术;变电站/配网自动化;以及综合技术。详情请致电 029-84225624。