

含缺陷PTFE绝缘管型母线模型的局部放电信号特征分析

聚四氟乙烯（PTFE）绝缘管型母线具有载流量大、绝缘及力学性能好等优点，已经在我国变电站中获得广泛应用。在管型母线的生产、安装和运行过程中，可能在绝缘层内引入缺陷，诱发局部放电。长期受到局部放电的侵蚀作用，PTFE绝缘将出现加速老化导致母线绝缘击穿而引发事故。针对管型母线中典型绝缘缺陷引发的局部放电信号特征进行分析，对于辨识母线中局部放电的种类，评估其绝缘状态具有重要意义。采用PTFE薄膜建立了三种含典型缺陷的管型母线模型，通过高频电流互感器测量了交流高压作用下缺陷引发的局部放电信号，分析了局部放电的相位分布、放电频次—幅值关系、单次脉冲波形及频域谱等信号特征，讨论了外施电压的影响。结果表明不同缺陷模型引发的局部放电相位分布、放电频次—幅值等特征均有着明显的区别；放电幅值及每周波放电次数均随外施电压升高而增大。

张黎明 朱晓辉/国网天津市电力公司电力科学研究院 王永宁/国网天津市电力公司 陈令英 高宇/天津大学电气与自动化工程学院

0 引言

随着我国城市建设的发展和用电量的增加，变电站容量也在不断提高，110 kV以上等级变电站10 kV出线侧额定电流大于2 500 A的情况已十分常见^[1]。这就对变电站母线的载流量、力学强度和绝缘性能提出了更高的要求。与传统的矩形母线相比，绝缘管型母线趋肤效应弱，相同载流量下电流密度提高约30%，且管型母线抗弯截面系数是矩形母线的5倍^[2-3]。因此，与矩形母线相比，绝缘管型母线更能符合电网发展的要求，且已经在0.4~220 kV变电站中得到了广泛的应用。据统计，2014年国内各行业使用的绝缘管型母线总长度接近200 km，其市场销售额约9亿元。可见，绝缘管型

母线在电力企业供电安全中的地位愈加重要。

管型母线的结构从内到外依次为金属导体、屏蔽层—绝缘层交替绕制，最外层为绝缘护层。其中，绝缘材料常采用聚四氟乙烯（Polytetrafluoroethylene，PTFE）。由于多个屏蔽层的存在，任一层绝缘的表面电位相同，避免了局部放电在各绝缘层表面发生^[4]。然而，目前国内的管型母线生产工艺水平参差不齐，部分企业在生产过程中并未严格按照设计要求对屏蔽层、绝缘层实施交替绕制，出现无屏蔽层或仅在导体上缠绕屏蔽层的现象；还有些企业做工粗糙，在绕制绝缘带时绕制不均匀，出现断层以致电场分布不均匀，或将金属碎屑混入绝缘层。这都为管型母线的运行安全埋下隐患^[5-6]。此外，绝缘管型母线在安装、运行过程中，也可能在绝缘层中引入缺陷。例如：管型母线的中间接头处，结合不紧密，导致导体断口外露；在安装过程中，端头的包裹工艺粗糙，密封不严，导致水分侵入；软连接与母线搭接处有污垢，连接螺钉过长。在运行过程中，受到管型母线机械振动和热胀冷缩的影响，各绝缘层间产生断层；水汽渗入到绝缘层中，水分气化，绝缘层膨胀等^[7-8]。上述缺陷容易引发局部放电，长期承受局部放电的作用，将导致绝缘层加速老化，最终造成击穿事故，威胁到电网的安全。因此，对绝缘管型母线绝缘层中的局部放电现象进行测量分析，对于了解母线的绝缘状况，保障



张黎明/高级工程师

关键词/Keywords

管型母线·
聚四氟乙烯·
局部放电·
高频电流互感器·
信号特征·

其绝缘安全具有重要的理论意义和工程价值。

近年来,研究人员已开始关注管型母线的局部放电现象。文献[9]构建了绝缘铜管母线接头处的沿面放电模型,研究了放电点与接地屏不同距离时的放电起始电压和放电谱图特征,为绝缘管母线接头处沿面放电的早期检测提供了依据。文献[10]介绍了全绝缘管型母线的绝缘结构和特点,采用超声波和超高频检测法对实际运行的管型母线进行测量,发现在中间接头中存在明显的局部放电现象。然而,此前的研究对于管型母线绝缘中可能存在的各类缺陷诱发的局部放电机理及信号特征尚缺乏足够分析。本文采用PTFE薄膜制备了管型母线模型,分别模拟了实际工程中可能存在于绝缘层中的金属碎屑残留、水分侵入和沿面放电模型。在外施交流电压作用下,测量了三种不同种类缺陷引发的局部放电信号,分析了放电信号的时、频域及统计特征,探讨了外施电压对放电特征参数的影响。

1 实验装置和过程

1.1 样品制备

选取外径20 mm、壁厚1 mm和长380 mm的铝管作为线芯导体,将厚0.45 mm、宽105 mm的PTFE薄膜以1/2叠绕方式缠绕于铝管上,总厚度为6.75 mm,结构如图1所示。在最外层PTFE薄膜上贴附铜箔电极,以此同轴结构模拟屏蔽层不完整的PTFE绝缘管型母线。实验中,共在管型母线的绝缘层预设三类典型缺陷,金属碎屑、水分侵入和沿面放电。其中,金属碎屑缺陷用于模拟母线绝缘中残存金属碎屑的情况,金属片的面积约为 0.5 cm^2 、厚0.3 mm。由于临近层PTFE薄膜的压接作用,在金属片的两端会存在微小气隙,如图1a所示。水分侵入缺陷用于模拟母线绝缘中渗入水分的情况,在分布的水膜间夹杂着微小的气泡如图2b所示。沿面放电缺陷用于模拟母线接头位置因电场畸变出现的沿面放电。将直径0.9 mm的金属针与铝管连接并压接至模型绝缘表面,针尖与接地铜箔的距离为10 mm。

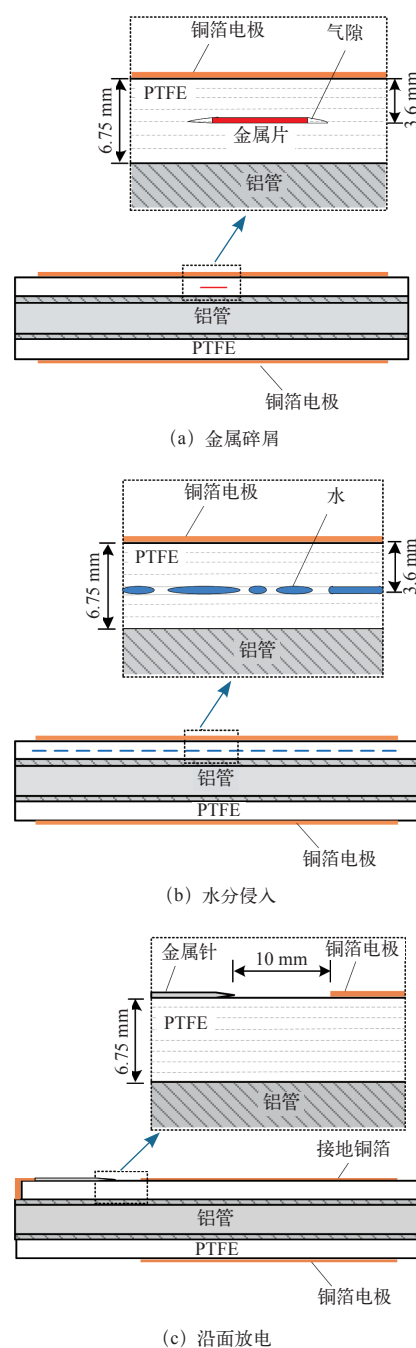


图1 三种绝缘缺陷模型结构示意图

1.2 实验装置与过程

实验电路示意图如图2所示。实验采用的交流高压由单套管实验变压器提供。将变压器输出端经 $1\text{ M}\Omega$ 的限流电阻与含人工缺陷的管型母线模型内部导体相连,模型的外屏蔽层接地。将高频电流互感器(High Frequency Current Transformer, HFCT)卡接在地线上以测取局部放电信号,所测

信号经波阻抗 $50\ \Omega$ 的同轴电缆送入局部放电分析仪进行后续分析。此外,通过连接于实验变压器高压输出端的阻抗分压器来获取参考电压信号。

实验在室温下进行,调节调压器使变压器输出端的有效值分别为 $3\sim 6\ \text{kV}$,分别测量局部放电单次脉冲、放电序列及参考电压信号,进而通过软件处理获得各类缺陷引发的局部放电信号特征。

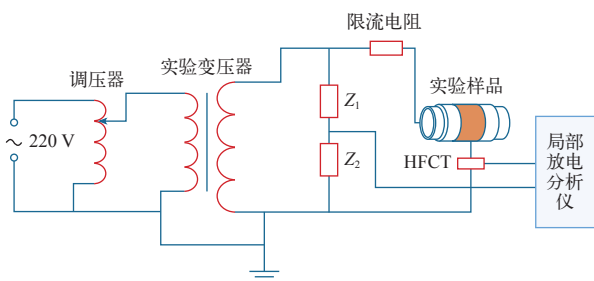


图2 实验电路示意图

2 结果与讨论

含三种典型缺陷的管型母线模型中局部放电相位分布 (Phase Resolved Partial Discharge, PRPD) 特征分别如图3~5所示。可见,在施加电压的正负半周均发生明显的放电现象。随着外施电压的升高,局部放电幅值和放电脉冲次数随之增大,放电脉冲分布的相位范围相应变宽。不同模型引发的局部放电其PRPD特征也有所不同。金属碎屑缺陷模型的局部放电相位比其他两个模型的略窄,放电相位相对集中,放电幅值相对较高。水分侵入缺陷模型的局部放电相对微弱。这主要是由于放电的微观机理存在差异。对于金属碎屑模型,因为金属片的存在使相邻的PTFE绝缘层压接不紧,金属片周围存在气隙,气隙中将产生局部放电^[11]。由于金属片端部曲率半径很小,场强较高,在其周围易引发空气电离,即微观的“电晕”现象,故负极性下的放电程度更加强烈一些。对于水分侵入模型,在水膜中会混有小的气泡,故在气泡内发生局部放电。这一放电与气隙引发的内部放电相似,可观察到正负半周放电幅值比较接近。然而放电过程中引发的带电粒子碰撞等现象,可能导致水分的移动,并伴随电荷沿着PTFE薄膜的迁移,导致各处气泡达到放电场

强的时刻分散,因此其放电相位区间更宽。沿面放电与正负电荷的迁移有关^[12],当针电极为正极性时,正电荷相对缓慢地向地电极移动并被PTFE表面的载流子陷阱捕获,当针电极变为负极性时,附着在介质表面的正电荷使沿面电场增强,放电量随之增大,导致沿面放电的PRPD(见图5),呈现正半周小而密,负半周大而稀的特征。

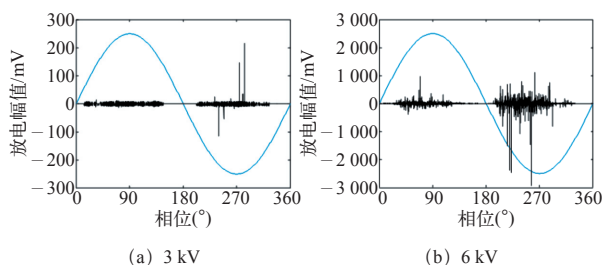


图3 金属碎屑缺陷模型的PRPD

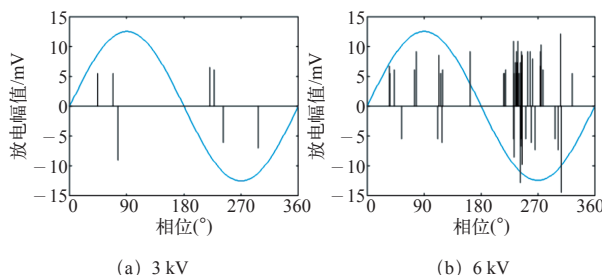


图4 水分侵入缺陷模型的PRPD

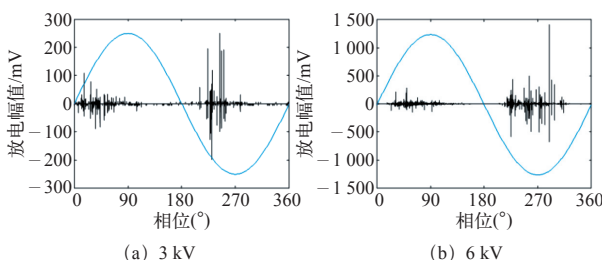


图5 沿面放电模型的PRPD

三种不同缺陷模型中,外施电压对局部放电最大幅值的影响如图6所示。可见,随着外施电压的升高,三种缺陷引发的局部放电最大幅值均单调增大。在各外施电压下,金属碎屑缺陷导致的局部放电幅值均最高,水分侵入引发的局部放电最大幅值均最低。相比之下,金属碎屑缺陷导致的局部放电最大幅值增大速率最快,而水分侵入引发的局部放电最大幅值增大速率最慢。外施电压对三种缺陷引发的每周波放电次数的影响如图7

所示。随着外施电压有效值从3 kV提高至6 kV, 各类局部放电的次数均增大。其中, 金属碎屑缺陷引发的放电次数变化最明显, 从508次增大至2 073次; 而水分侵入导致的放电次数仅增加了38次, 相比之下其增幅最小。此外, 金属碎屑导致的放电次数始终最大, 而水分侵入导致的放电次数最小。综合分析图6和图7可知, 对于以上三种缺陷, 金属残留物引发的局部放电最剧烈, 沿面放电次之, 水分侵入导致的局部放电则最微弱。

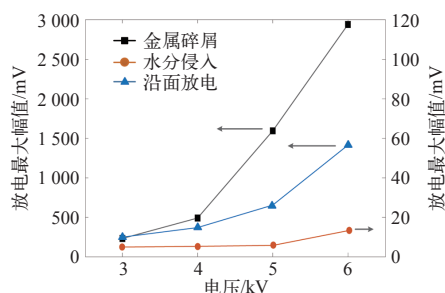


图6 放电最大幅值与外施电压的关系

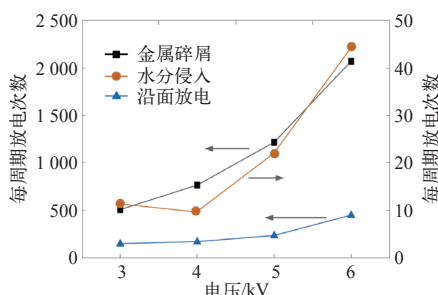


图7 每周期放电次数与外施电压的关系

各缺陷模型中, 局部放电频次与放电幅值之间的典型关系如图8所示。其中, 外施电压有效值为6 kV。本文将放电频次定义为某一特定放电幅值出现的次数。由图8可知, 随着放电幅值的增大, 放电频次呈现先增大再减小的趋势。由金属碎屑诱发的局部放电幅值主要集中在100 mV以内, 放电频次最大值约370次, 对应的放电幅值约10 mV。相比之下, 由水分侵入引发的局部放电幅值主要分布于5~15 mV, 其放电幅值的分布区间更狭窄。放电频次最大值为16次, 出现在放电幅值7 mV处。沿面放电的幅值主要集中在200 mV以下, 放电频次最大值为28次, 对应的放电幅值约为10 mV。以上放电频次-幅值分布规律同样表明, 金属碎

屑引发的局部放电最为剧烈, 而水分侵入导致的放电最微弱。此外, 图8中, 三种缺陷的放电频次-幅值分布具有明显的差异, 该统计特征可作为识别不同种类缺陷的参考依据。

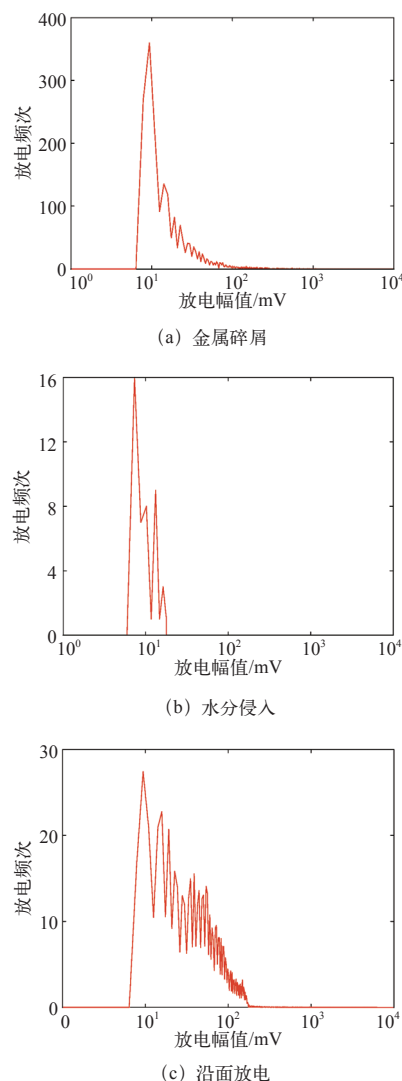


图8 不同缺陷的局部放电频次-幅值关系

三种缺陷引发的局部放电典型单次脉冲波形及其频谱如图9所示。可见, 由金属碎屑引起的局部放电脉冲半峰值时间约为1 μ s, 放电脉冲的频率成分主要集中在1~8 MHz, 在6~8 MHz的频率分量较大。水分侵入缺陷引起的局部放电脉冲相对较弱, 持续时间约为1.5 μ s, 脉冲频率成分集中在8~13 MHz。沿面放电脉冲波形呈指数型振荡衰减, 半峰时间约为1 μ s, 放电脉冲频率成分集中在3~8 MHz。对比三种缺陷的放电脉冲特征及频谱

可知,金属碎屑和沿面放电的单次放电波形非常接近,均与水分侵入导致的局部放电波形有明显差别。此外,各类放电的脉冲能量均主要集中在12 MHz以内,这为选取合适工作频带的传感器对管型母线中的局部放电信号进行检测提供了参考依据。

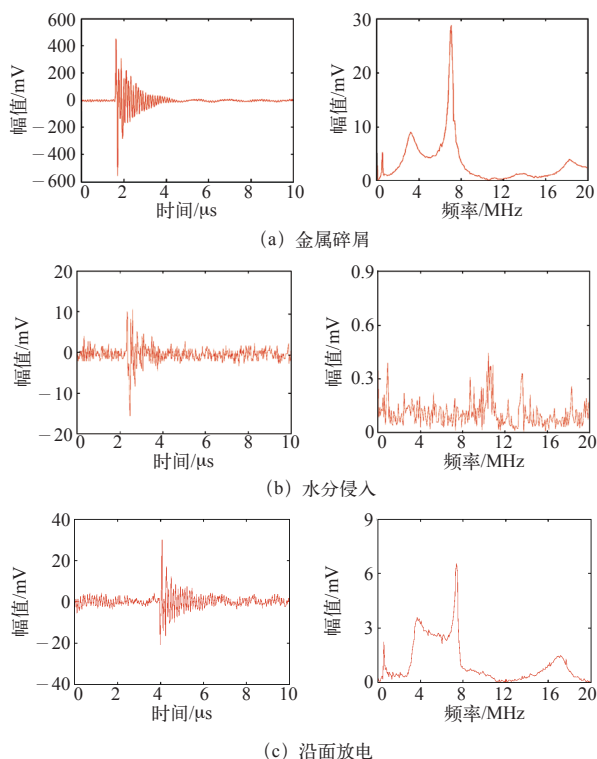


图9 局部放电典型单次脉冲波形及频谱

3 结束语

采用PTFE薄膜建立了含绝缘缺陷的管型母线模型,研究了不同缺陷引发的局部放电信号特征及外施电压的影响,主要结论如下。

1) 三种模型的局部放电信号都集中在第一、三象限。金属碎屑诱发的局部放电在负极性下的放电程度更加强烈一些。水分侵入导致的局部放电正负半周放电幅值比较接近,放电相位区间较宽。沿面放电呈现正半周小而密,负半周大而稀的特征。

2) 随着外施电压的升高,局部放电幅值和每周周期放电次数均增大。金属碎屑诱发的局部放电幅值及次数始终最大,且其增幅也最大;水分侵

入引发的局部放电幅值及次数均最小,且增幅也最小。沿面放电的幅值、次数及相应增幅介于以上两者之间。

3) 各缺陷的放电频次-幅值的分布不同。由金属碎屑诱发的局部放电幅值主要集中在100 mV以内,放电频次最大值约为370次,对应的放电幅值为10 mV;由水分侵入引发的局部放电幅值主要分布于5~15 mV,放电频次最大值为16次,对应的放电幅值为7 mV;沿面放电的幅值主要集中在200 mV以下,放电频次最大值为28次,对应的放电幅值为10 mV。

4) 各缺陷引起的局部放电单次脉冲波形及频谱分布存在差异。金属碎屑引起的局部放电和沿面放电脉冲波形相似,但明显异于水分侵入诱发的局部放电单次波形。此外,各类放电脉冲的主要能量均集中在12 MHz以下。

结果表明,三种不同绝缘缺陷引发的局部放电单次波形、频谱及统计特征均存在显著差别,金属碎屑引发的局部放电最剧烈,而水分侵入导致的放电最微弱,导致上述差别的主要原因为三类缺陷引发的局部放电机理不同。上述结果将为选取合适工作频段的传感器进行PTFE绝缘管型母线的局部放电信号检测及模式识别提供参考。

参考文献

- [1] 刘锦江,支峰.试论全绝缘屏蔽铜管母线在变电站中的应用[J].太原大学学报,2012,13(3):138-140.
- [2] 郭莉.管型母线在220 kV变电站应用的探讨[J].江苏电机工程,2004(3):58-59.
- [3] 陈晶,强芸,别叶健,等.全绝缘屏蔽铜管母线在变电站设计中应用分析[J].电气应用,2014(16):110-112.
- [4] Stancu C, Notinger P, Ciuprina F, et al. Computation of the electric field in cable insulation in the presence of water trees and space charge[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2009, 45(1): 30-43.

(下转第73页)

2) 基于世界各国各机构的标准、部分行业的特殊需求提出了针对电力系统公共连接点(10 kV)的电能质量综合等级分类法,将电能质量分成五个等级,可更直观地反映电能质量等级评估的结果。

3) 算例分析实现了对某地区电网10个变电站的2013年电能质量的综合等级评估,其综合等级评估结果与综合量化评估结果实现了对应,说明本文的综合等级评估模型能客观反映评估对象的电能质量水平。

参考文献

- [1] 陶顺,肖湘宁.电能质量单项指标和综合指标评估的研究[J].华北电力大学学报:自然科学版,2008(2):25-29,41.
- [2] 甄晓晨,陶顺,肖湘宁,等.电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(12):104-111.
- [3] 肖先勇,马超,杨洪耕,等.用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J].中国电机工程学报,2009,29(31):115-117.
- [4] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008(22):

130-136.

- [5] 刘颖英,戴平,徐永海,等.电能质量综合评估方法比较[J].电力自动化设备,2008,28(12):93-97,100.
- [6] 康世崴,彭建春,何禹清.模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J].电网技术,2009,33(19):113-118.
- [7] 王宗耀,范莉,苏浩益.基于区间数理论的电能质量综合评估模型[J].电力系统保护与控制,2012,40(3):41-45,50.
- [8] 杨家豪,欧阳森,石怡理,等.一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用[J].电工电能新技术,2014,33(2):63-69.
- [9] 周林,栗秋华,张凤.遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用[J].电网技术,2007,31(7):32-35.
- [10] 欧阳森,石怡理.改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(21):156-159,164.
- [11] 盛海宁,赵亮,连旭磊.运用区间数逼近算法的电能质量评估研究[J].电力科学与工程,2010,26(6):19-23.

(收稿日期:2016-03-16) **EA**

(上接第22页)

- [5] 赵永昌,王振方,叶秀成.35 kV绝缘管母外绝缘护套烧损故障分析[C].虚拟运营与云计算——第十八届全国青年通信学术年会论文集,2013.
- [6] 姜庆密,亓富军,田纪法.复合屏蔽绝缘管母线局部发热成因及案例处理[J].电气技术,2013(9):53-57.
- [7] Tanaka T. Internal partial discharge and material degradation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(6):899-905.
- [8] Fabiani D, Montanari G C. The effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation systems under partial discharge activity[J]. IEEE Electrical

Insulation Magazine, 2001, 17(3):24-33.

- [9] 张亮,李军浩,谭家勇.绝缘铜管母线接头处沿面局部放电特性研究[J].高压电器,2013(11):94-98.
- [10] 郑云海,吴奇宝,何华琴.全绝缘管母线局部放电的检测与分析诊断[J].绝缘材料,2010,43(4):63-66.
- [11] Parr J E, Moruzzi J L. Electron attachment in water vapor and ammonia[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1972, 5(3):514-524.
- [12] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃.局部放电测量[M].北京:机械工业出版社,1984.

(收稿日期:2015-07-30) **EA**