

高电压下沿面放电虚拟仿真实验设计与应用

任胜杰

(河南工业大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 沿面放电是电力系统中高压绝缘击穿的一种重要的放电形式。由于高电压实验危险性大、实验设备价格昂贵且实验室建设技术要求高, 难以搭建用于实物设备的高压实验室环境。通过设计一种基于虚拟仿真技术的高电压下沿面放电实验教学平台, 实现了与实际现场一致的实验场景, 真实再现均匀电场和极不均匀电场下的高电压下沿面放电现象, 还原了高电压下沿面放电的全过程。该平台形成从原理认知、基础验证到创新性设计的闭环能力培养体系, 使学生能够分析研究影响沿面放电的因素及提高沿面放电电压的方法, 提高学生的工程实践与应用创新能力。

关键词: 高电压技术; 沿面放电; 虚拟仿真; 实验设计

Design and application of a virtual simulation experiment for surface discharge under high voltage

REN Shengjie

(College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Surface discharge is an important form of high voltage insulation breakdown in power system. It is difficult to build a high-voltage environment for physical equipment due to the high risk, high cost of experimental equipment and high technical requirements of laboratory construction. By building an experimental teaching platform of surface discharge under high voltage based on virtual simulation technology, the experimental scene consistent with the actual site was realized. The phenomenon of surface discharge under high voltage with uniform and non-uniform electric field was truly reproduced, and the whole process of surface discharge under high voltage was restored. The platform forms closed-loop ability cultivation from principle cognition, foundation verification to design innovation, enabling students to analyze and study factors affecting surface discharge and methods to improve surface discharge voltage, improving students' engineering practice and application innovation ability.

Keywords: high voltage technology; surface discharge; virtual simulation; experimental design

0 引言

高电压技术是电气工程及其自动化专业的核心课程, 是一门理论与应用紧密结合、实践性强的课程^[1-2]。电力系统中的电力设备和绝缘材

料都需要进行高电压下绝缘预防性和破坏性实验。沿面放电是电力系统中高压绝缘击穿的一种重要的放电形式, 需要学生具备分析研究影响沿面放电的因素及提高沿面放电电压的能力。为了达到上述教学目标, 除了在课堂上学习沿

河南省高等教育教学改革研究与实践重点项目 (2021SJGLX145); 河南工业大学本科教育教学改革研究与实践重点项目 (JXYJ2020007); 河南省教育厅 2020 年度虚拟仿真实验教学重点建设项目

面放电的基本概念及发生沿面放电的基本原理外,还需要精心设计高电压沿面放电实验环节,通过动手实验将理论知识转化为工程实践能力培养。

1 高电压沿面放电实验教学问题分析

目前,高电压沿面放电实验教学存在以下突出问题^[3-4]。

1) 在特高压输电系统中,随着输送电压等级的提高,绝缘相关问题逐步显现,需要对电力设备和绝缘材料进行高电压实验。由于电力系统繁杂庞大,物理现象复杂多变,空气击穿及沿面放电的影响因素较多,放电突发性强,电力设备耐压空气击穿实验在真实的实验环境下难以开展,实验现象不易直观观察研究。

2) 实验具备高危、高成本、高消耗与不可逆特点。高压空气击穿实验具有高压特性,实验教学中涉及高电压、大电流的设备操作,具有不确定性、不可控及高危险性,部分实验属于破坏性实验。此外,所需实验设备较多、价格昂贵、占地面积大、维护费用高且技术要求高,难以保证学生线下实现完整实验过程,更无法用冲击电压发生器对电力设备进行反复绝缘测试实验研究,实践深度不够。

通过虚拟仿真技术可以有效解决高电压沿面放电实验教学问题^[5-8],基于此,本文提出一种高电压沿面放电虚拟仿真创新实验平台设计及实验教学方案。该实验平台通过采用3D建模、动画、语音识别和计算机仿真等技术,提供了与高压实验现场一致的实验场景和高压设备的真实模型,真实再现了均匀电场和极不均匀电场下的高电压下沿面放电实验,还原了高电压下沿面放电现象的全过程。通过虚拟仿真实实践教学,学生能够掌握沿面放电的基本概念及高电压下的沿面放电特性,观察高电压不同电场下介质沿面放电现象,分析研究影响沿面放电的因素及提高沿面放电电压的方法,提升学生分析电气工程绝缘诊断相关的工程实践与应用创新能力。

2 虚拟仿真实验教学平台

高电压沿面放电虚拟仿真实验教学平台融合气体介质与固体介质击穿、高压放电实验时调压、空气绝缘击穿、空气绝缘强度、沿面放电等基础知识和现象,结合手动调压控制台、充气式交流升压变压器、高压分压器、电动遥控可调放电间隙、间隙调节遥控器与手持式放电棒等硬件设备^[9],使学生在实验教学中递进培养沉浸认知、交互练习、合作研究和自主设计等能力。虚拟仿真实验教学平台采用面向服务的软件架构开发,集实物仿真、创新设计、智能指导和教学管理于一体,具有良好的自主性、交互性和可扩展性。虚拟仿真实验教学平台总体架构如图1所示,共分为五层。

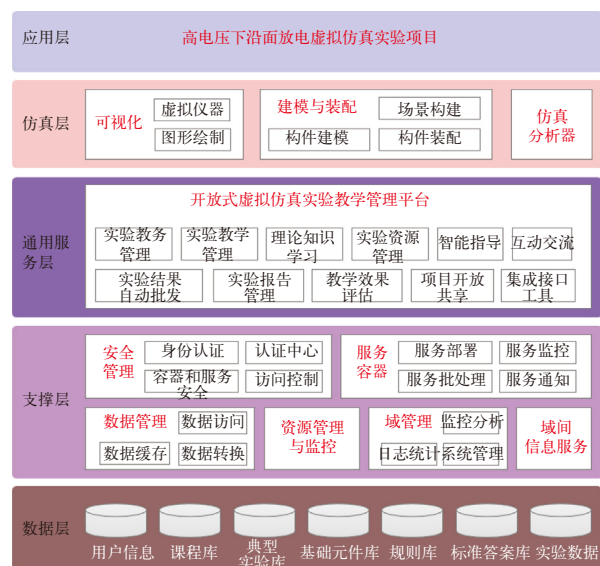


图1 虚拟仿真实验教学平台总体架构

Fig. 1 Overall architecture of virtual simulation experimental teaching platform

数据层分别设置虚拟实验的基础元件库、实验课程库、典型实验库、标准答案库、规则库和实验数据等,实现对相应数据的存放和管理。支撑层负责整个基础系统的运行、维护和管理,包括安全管理、服务容器、数据管理、资源管理与监控、域管理和域间信息服务等功能子系统。通用服务层包括实验教务管理、实验教学管理等开放式虚拟仿真实验教学管理。仿真层主要为实验进行构件建模、实验场景构建与仿真分析器等。

应用层实现高电压沿面放电虚拟仿真实验项目教学,教师可根据各种工具和相应的器材模型,设计各种验证性和设计创新性实验,面向学生开展实验教学应用。

3 高电压下沿面放电虚拟仿真实验设计

高电压下沿面放电虚拟仿真实验是基于虚拟仿真实验平台进行的,需要学生计算机具备上网功能,并且安装Google Chrome或Firefox浏览器。本实验构建了五个模块,包括实验原理认知、实验准备、不同电场下的气隙放电实验、不同电场下的沿面放电实验与实验考核模块。每个模块层层递进,有机连接,实现从原理认知、基础验证到设计创新性实验的阶梯式能力培养。

3.1 实验目的

- 1) 理解气体击穿放电的基本概念及发生沿面放电的基本原理。
- 2) 观察分析气体击穿放电与固体介质沿面放电的基本现象。
- 3) 依据实验结果分析固体介质沿面放电的基本规律。
- 4) 研究影响固体介质沿面放电的因素(沿面距离、绝缘体表面盐分、沿面的湿度及清洁度等)及提高沿面放电电压的措施与方法。

3.2 实验原理

(1) 气体击穿放电

干燥气体通常是良好的绝缘体,当气体中存在自由带电粒子时,在高电压(强电场)的作用下,会逐步由绝缘介质演变成导体,这一物理过程称为气体击穿放电^[10]。根据气体压力、施加电压、电极形状及电源频率的不同,气体放电有多种多样的形式。掌握气体介质的电气强度及其提高方法是高压输电领域中非常重要的课程内容。

(2) 沿面放电

带电导体被固体绝缘装置悬挂或支撑起来。这些固体绝缘装置既在机械上起固定作用,又在电气上起绝缘作用,它们都处于气体介质的包围之中,沿着固体介质表面发生放电或闪络的现

象称为沿面放电。沿固体介质表面的闪络电压不但要比同体介质本身的击穿电压低得多,而且也比极间距离相同的纯气隙的击穿电压低不少。一个绝缘装置的实际耐压能力并非取决于固体介质部分的击穿电压,而取决于其沿面闪络电压^[11]。

3.3 实验步骤

1) 进入虚拟仿真实验平台,学习实验安全操作规程、实验设备认知、器材简介、器件的工作原理与原理图、沿面放电基本原理等。视窗口弹出操作规程,要求实验人员鼠标选中每一条规则后,才能进行下一步的浏览。设备认知部分,左侧360°旋转显示实验设备的外观与接线端子,右侧显示文字说明及设备的工作原理等信息。

2) 选择实验设备,构建实验平台环境。根据实验要求选择球隙器与变压器、变压器与分压器、变压器与控制台等虚拟实验设备,并放置于合适位置,进行虚拟电气连线,保证可靠接地,搭建高压放电的虚拟实验设备。此步骤在放置设备时有一定的顺序要求,要符合高压实验安全规则,当摆放实验设备时,若违背规程,则会出现报警信息。设备摆放完成后,设备接线时也同样要符合高压实验规程,不符合规程时同样会弹出报警窗口。

3) 依次进行均匀电场下与极不均匀电场下的高压气体击穿放电实验。确定实验设备且接线正确完成后,调整球隙器间距,按下启动按钮,升压信号灯亮,鼠标慢慢顺时针旋转调压手盘,同时高压电压指针随着手盘的转动,指针慢慢升高,如图2a所示。在极不均匀下的空气放电击穿实验中,需要将上平板电极更换为尖端电极,以形成极不均匀电场。随着电压的升高,观察板间空气击穿现象。当空气被击穿时,控制台会自动保护断电,观察高压电压表的指示读数,实时记录并分析实验数据,如图2b所示。放电实验结束后,拖动接地棒将实验设备依次接地,用于消除实验时可能留存的高压。调整极板间的距离大

小,重复3次以上实验步骤,可以得到一组实验数据。从实验数据中分析得到击穿电压大小与电极间距的击穿规律。



(a) 变压器升压操作



(b) 气隙击穿时电压读数记录

图2 高压气体击穿放电实验

Fig. 2 High voltage gas breakdown discharge experiment

4) 依次进行均匀电场和极不均匀电场下的沿面放电击穿实验。将所选择的实验设备拖动摆放到位,正确接线完成后,调整球隙器间距,放置绝缘柱于平行板电极中间,调整上下平行板间距,按下启动按钮,升压信号灯亮,鼠标慢慢顺时针旋转调压手盘,控制台进行升压操作,开始进行均匀电场和极不均匀电场下(需要将上平板电极更换为尖端电极)的沿面放电实验,如图3所示。更换高度不同的绝缘柱,调整极板间的距离大小,重复3次以上实验步骤,可以得到一组实验数据。从实验数据中分析击穿电压大小与电极间距的击穿规律。

5) 进行固体介质涂湿后的沿面放电实验。将固体介质绝缘柱进行涂湿后,放置在平板电极中间。重复进行均匀电场下沿面放电实验,记录实验数据。放电时系统虚拟产生的高压空气击穿声光场景如图4所示,实验结束后必须拖动放电

棒对所有高压设备进行放电操作。



图3 沿面放电击穿实验

Fig. 3 Electrical breakdown experiment along the surface

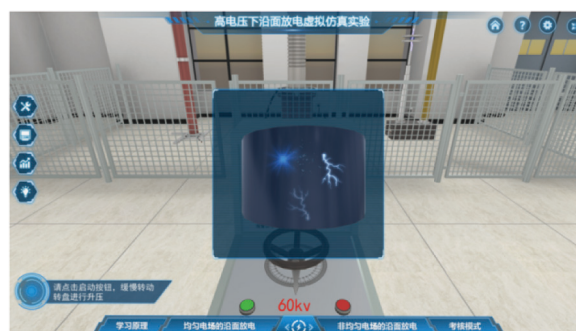


图4 高压放电时的声光画面

Fig. 4 Sound and light images during high voltage discharge

6) 实验结果分析与结论。查看系统自动生成的可追溯的实验过程记录,分析均匀电场与极不均匀电场、不同球隙器间距、不同表面盐分、不同表面湿度环境下的击穿电压,研究放电电压基本规律。

3.4 思考与创新

完成本次实验后,学生对高压气隙放电击穿电压的影响因素有了深入的理解,为进一步培养学生独立思考和创新意识,要求学生在实验后思考以下问题:气隙的长短如何影响放电击穿电压,影响的原因是什么?如果气隙大到一定程度,放电击穿电压是否还能呈线性增大?影响沿面放电的击穿电压除了湿润的绝缘介质外还有哪些因素?增大爬电距离是否可以提高放电击穿电压?为了防止绝缘介质的表面湿污,如何设计绝缘介质的沿面?

通过认真思考并通过虚拟仿真实验验证,学生

可以更深入理解气隙放电的特点。放电电压与空气间隙在一定距离内呈线性关系,为提高绝缘介质的沿面放电电压,可以从绝缘介质的物理结构上进行可靠设计,提高湿闪电压和污闪电压等级。

4 考核要求、评价和教学效果

依据以学生为中心的成果志向教育理念,增加过程性考核比重,构建课前、课中、课后的全过程考核评价体系,将实验预习、实验操作、实验报告综合,全面考察学生灵活运用知识解决复杂工程问题的能力。该虚拟仿真实验平台能够自动生成可追溯实验全过程的记录,在学生实验过程中可自我纠错。具体实验考核内容及要求见下表。

表 虚拟仿真实验考核内容及要求
Tgb. Assessment content and requirements for virtual simulation experiments

考核项目	考核内容	考核方式	考核时间
实验预习	①高电压理论知识、气体击穿放电、沿面放电等基本原理;②实验安全操作规程、实验设备认知、器材简介、器件工作原理与原理图	虚拟仿真平台自动生成试卷、批改	实验开始前
过程考核	完成所有实验项目设备的操作方法正确,规范高压放电实验后进行放电操作	实验结果虚拟仿真平台自动批改	实验过程中
学习效果	①分析气体击穿放电与固体介质沿面放电的基本现象与基本规律;②研究影响固体介质沿面放电的因素及提高沿面放电电压的措施与方法思考与创新任务	提交实验报告	课程结束前

自2020年高电压下沿面放电虚拟仿真实验平台建设以来,已为本校电气工程及其自动化专业的600余名学生提供“高电压技术”课程的虚拟仿真实验,安排2学时原理验证和2学时创新实验,该实验获得2020年度河南省虚拟仿真实验教学重点建设项目,并已经向高校和社会开放。

5 结束语

高电压下沿面放电虚拟仿真实验避免了高电压实验室危险性因素,有助于学生理解高压放电、高压击穿现象与沿面放电规律,研究影响介质沿面放电的因素及提高沿面放电电压的措施与方法,为专业复杂知识点的学习应用提供新的教

学手段,提高高电压技术课程的教学质量,使学生的工程实践与应用创新能力得到有效增强。

参考文献

- [1] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 孙建军, 张颖杰, 巴宇, 等. 高电压虚拟仿真实验教学探讨[J]. 实验科学与技术, 2022(4): 52-55.
- [3] 朱明晓, 陈继明, 孟庆伟, 等. 固体电介质空间电荷分布实验与仿真系统[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(11): 109-113.
- [4] 夏喻, 李卫国, 陈艳. 高空下棒-板间隙直流放电特性及电压校正[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2115-2120.
- [5] 朱明晓, 陈继明, 孟庆伟. 基于相场模拟与MATLAB GUI的高电压技术可视化教学与仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 155-159.
- [6] 杨亚奇, 李卫国, 夏喻, 等. 气压下长间隙交直流放电特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1143-1150.
- [7] 齐波, 魏振, 李成榕, 等. 交直流复合电场中油纸绝缘沿面放电现象及特征[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 59-63.
- [8] 崔行磊, 张广明, 梅丹华. 高电压气体放电虚拟仿真实验教学平台的建设与运用[J]. 中国电力教育, 2022(3): 48-49.
- [9] 周文俊, 乔胜亚, 李丽, 等. GIS中盆式绝缘子沿面放电的新特征气体CS₂[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 78-79.
- [10] 鲁杨飞, 李庆民, 刘涛, 等. 高频电压下表面电荷分布对沿面放电发展过程的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3059-3070.
- [11] 司马文霞, 杨庆, 吴亮, 等. 平板模型沿面工频沙尘闪络特性的试验研究及放电机制分析[J]. 中国电机工程学报, 2010(1): 6-13.

作者简介

任胜杰(1971—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为高电压测控技术、电气自动化检测与控制。
(收稿日期: 2025-02-10)