

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0073-06

基于数字孪生系统的变电站虚拟教学平台

王丽晓¹, 李嘉琪¹, 庞志斌², 沈娜¹, 王玘¹, 张郡¹

(1. 广州城市理工学院 电气工程学院, 广东 广州 510800; 2. 广州番禺电力建设集团有限公司, 广东 广州 511400)

摘要:针对变电站高压系统存在的安全隐患,相关人才在实操培训方面仍存在不足问题。将变电站虚拟教学平台引入高校变电站培训课程中,利用人才平台模拟还原度高、互操作性强、易于扩展特点,可有效模拟变电站相关设备的运作方式及运行状态。学生在该平台中可沉浸式地体验变电站的操作流程,并在每步操作结束后获得即时反馈。该平台可有效推动应用型电力实践课程改革,可为建设新型电力系统培养应用型中坚人才。

关键词:虚拟变电站;数字孪生;教学平台;虚拟教学;变电站

中图分类号: TP391.98; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-7241(2026)02-0073-06

Virtual teaching platform for substations based on digital twin system

WANG Lixiao¹, LI Jiaqi¹, PANG Zhibin², SHEN Na¹, WANG Gan¹, ZHANG Jun¹(1. Department of Electrical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China;
2. Guangzhou Fandian Electric Power Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the potential safety hazards in the high-voltage systems, there are still deficiencies in the aspect of practical training. This paper introduces a virtual teaching platform for substations into the college substation training courses, utilizing the platform, it can simulate the operation mode and status of substation-related equipment effectively. The platform boasts high fidelity, robust interoperability, and facile scalability. Students are provided with the opportunity to engage deeply in the operational dynamics of the substation, all while concurrently receiving feedback through the platform. This platform significantly contributes to the transformation of applied power practice courses and plays a crucial role in nurturing talents for emerging power systems.

Keywords: virtual substations; digital twin; teaching platform; virtual teaching; substation

我国正不断加快推动构建以新能源为主体的新型电力系统,为全面建设社会主义现代化国家提供清洁低碳、安全高效的电力保障^[1]。在能源安全战略新局面下,电力行业的发展对人才的需求越来越大^[2]。电力人才主要来自高等学校,而高等学校在应用型人才的培养中凸显出诸多问题,例如重理论轻实践,教学形式单一等。针对变电站人才培养,传统的教学方式以讲授为主,对专业实践的拓展能力较弱,而在实践教学方面,由于变电站的电压动辄上万伏,在错误操作下对电力系统安全、学生人身安全都造成威胁,变电站无法轻易向高校开放其实践资源,在以上条件限制下高校针对变电站人才的培养在实践方面略显不足,导致人才教育与就业脱节,为电力人才的培养埋下了隐患^[3]。

现阶段,数字孪生技术掀起新一代技术革命,在智慧城市、工业4.0和智能驾驶领域应用广泛。数字孪生技术的

发展,也为电力人才的培养提供了新的可能^[4]。本文结合变电站数字孪生系统以数字化方式建立真实变电站的虚拟模型,将设备所处环境及运行信息实时地叠加在同一个空间,通过设备参数、运行数据等真实还原系统运行状态,学生可在平台中自由地模拟现实中无法创造的各种条件,例如高电压大电流环境、三相短路故障等,进而利用计算机输入、输出设备,在虚拟空间中有效完成人机交互。利用数字孪生技术的可视性,学生可以随位置和视角变化观察变电站的设备运行情况,利用其交互性,学生可以沉浸式地学习变电站的各项核心操作,如巡视、故障保护、倒闸等,通过孪生平台的及时反馈,强化知识吸收。数字孪生技术的双向、持续、开放等优点使电力课程的教学质量有质的飞跃。

1 变电站虚拟教学平台设计背景

变电站是电力系统中对电压和电流进行变换,接受电能及分配电能的场所,是电力能源传输的关键路由器。变

收稿日期:2024-02-01;录用日期:2024-05-04

基金项目:广州城市理工青年科研基金项目(55-K0222001);广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目(JY230209);新能源科学与工程课程思政教学团队项目(S20422004);电气一流专业建设专项(JY214 501)

作者简介:王丽晓(1992—),女,博士,副教授,研究方向:数字孪生,综合能源系统优化及动态分析方法。

通信作者:张郡(1981—),女,硕士,讲师,研究方向:应用型人才培养,课程教学改革方法。

引用本文:王丽晓,李嘉琪,庞志斌,等.基于数字孪生系统的变电站虚拟教学平台[J].自动化技术与应用,2026,45(2):73-77,188.(WANG Lixiao, LI Jiaqi, PANG Zhibin, et al. Virtual teaching platform for substations based on digital twin system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(2):73-77,188.)

电站操作人员日常需执行巡视、故障保护、倒闸等核心操作^[5]。目前变电站人才的培养仍采用传统教学方式,着重书本理论学习,采用统一PPT教学,不能兼顾所有学生的理解能力,由于变电站相关操作过于繁琐,学生只靠老师口头讲授,相关知识难以有效吸收。而在变电站操作实践方面,考虑到变电站在电力系统中的重要地位,一旦操作失误将严重威胁到电力系统的安全稳定运行,同时变电站中动辄几万伏的高电压可能危及人身安全,少有变电站开放实践场地,导致学生整体缺乏实践机会。

数字孪生技术为解决以上问题提供了新的思路^[6]。采用数字孪生技术,结合使用人机交互功能与机器学习算法,可将物理世界与数字世界连接为整体,在数字空间中模拟变电站的实际操作^[7]。文献[8]搭建了一套数字孪生的变电站的巡检模型,可用于变电站日常维护的培训,但该模型较为单一并且缺少与学生的交互能力。文献[9]利用虚拟仿真系统模拟变电站事故处理,通过虚实结合规避了操作事故的危险性。文献[10]通过构建电力系统的虚拟仿真实验教学系统,将数字孪生技术融入教学课堂。目前的变电站虚拟教学平台在可视化、交互性、扩展性等方面稍显不足,因此,本文开发了一套变电站虚拟教学平台,用于模拟培训变电站巡视、倒闸和故障保护等操作。该平台有以下优点:1) 模拟还原度高。虚拟教学平台中的变电站场景、设备、运行状态、故障类型以实际情况进行建模,具有高度还原的可视化展示效果,使得学生能够直观地了解变电站的实际运行情况,有助于增强学生对变电站设备的认识。2) 互操作性强。虚拟教学平台能实时分析并记录学生的操作过程,具有良好的人机交互性,如在变电站的倒闸操作中,当学生某一操作失误,可迅速观察到该错误操作导致的严重后果,平台同时为学生提供有效的更正建议,当学生修改失误时可获得积极反馈,有助于帮助学生实践中发现问题、思考问题、解决问题。3) 易于扩展。平台具备可扩展性赋予了其强大的适应性。这种扩展性使得平台能够依据教学需求的变化,灵活地进行功能调整或增添新的模块,满足教学的多元化需求。

该平台为学生提供全面掌握电力系统重要设备运行、故障分析等的平台,以满足学生的工程实践能力和实际动手操作能力。教师们将理论知识与实践应用紧密结合,使教学更具针对性和实效性。理论教学主要介绍平台操作方法、平台界面介绍、平台功能等,实践教学指导学生完成平台的实际操作,并获得平台的及时反馈。通过理论与实践的结合,把变电站的复杂操作流程串联起来,可显著提高教师教学的质量,培养具有实操经验的优秀应用型变电站人才。

2 变电站虚拟教学平台

2.1 系统架构

变电站虚拟教学平台将变电站物理设备实体映射至

虚拟操作平台,其特点是模拟还原度高、互操作性强、易于扩展等。该平台基于变电站设备的传感器数据以及物理模型,利用人工智能、机器学习等方法建立一个实时更新的、现场感极强的“数字孪生体”,从而模拟变电站在现实环境中的属性、行为、规则。

在建模中,该平台整合了变电站中线路、变压器、断路器、电容器、避雷器等物理模型,实现设备直观的三维显示及运行状态信息展示,运检人员不需去变电站现场便可掌握站内各设备的运行情况。在人机交互中,该平台将变电站内的主控、辅控及安防等设备采集的数据进行整合,通过人机交互,收集学生相关操作信息,获取设备反馈,预判操作失误,可在避免人身安全事故的前提下,模拟学生现场操作情景。

利用该平台可以模拟培训变电站系统巡视、倒闸和故障保护等操作,变电站虚拟教学平台架构如图1所示。平台可模拟巡视、倒闸和故障保护等常规操作。巡视模块可模拟变电站设备的常规巡视,若设备存在运行状态异常,须第一时间告警维修。故障保护模块能够真实还原变电站故障时所产生的现象,并辅助指引操作者进行故障保护操作排除故障。倒闸模块指导操作者严格按照操作票步骤指引完成实际倒闸操作的流程,以保障人身与系统安全。基于以上架构搭建的变电站虚拟教学平台全景如图2所示,以下就其核心培训模块详述。

2.2 巡视模块

变电站巡视是对设备定期的巡视检查,及时发现设备的异常、缺陷、隐患,发现异常时及时维修以确保设备的安全稳定运行^[11]。日常谨慎高效的巡视可以有效地避免变压器漏油、线路短路和绝缘子闪络等事故的发生并降低变电站的经济损失。

平台巡视模块中室内部分包括控制室、保护室和配电室的实时监测功能,室外部分包括线路、主变压器、断路器、隔离开关、电抗器和电容器等设备的现场模拟功能,完整呈现变电站相关设备的运行。典型巡视内容包括变压器漏油、油温是否越线、油枕油位越线、变压器声音异常、瓦斯继电器油色异常、陶瓷套管积污/破损/放电、配电房温/湿度越线、控制室仪表/信号/指示灯异常。

巡视模块通过漂浮模式与地面走动模式结合,让学生能够在不同的高度和方位观察设备的实际状况,更加全面地认识到变电站设备的外观外形,从而提高培训质量。图3显示了平台巡视模块中变压器漏油情况,学生点击漏油处,平台会根据漏油的情况给出正确和错误的选择弹窗,辅助学生进行漏油情况判断。

2.3 故障保护模块

变电站故障保护是指在变电站设备故障导致供电进程受到阻碍时,通过调用平台差动保护、后备保护等措施,排除故障并恢复平台正常运行^[12]。

平台故障保护模块包括变压器故障保护、母线故障保护、线路故障保护等功能,其中变压器故障保护模块又包括

本体匝间永久短路、A相套管闪络、避雷器A相闪络、单相短路、两相短路、两相接地;母线故障保护包括单相永久接

地和单相短路;线路故障保护包括线距60%单相短路、两相短路、两相接地、三相接地、三相短路、单相永久接地^[13]。

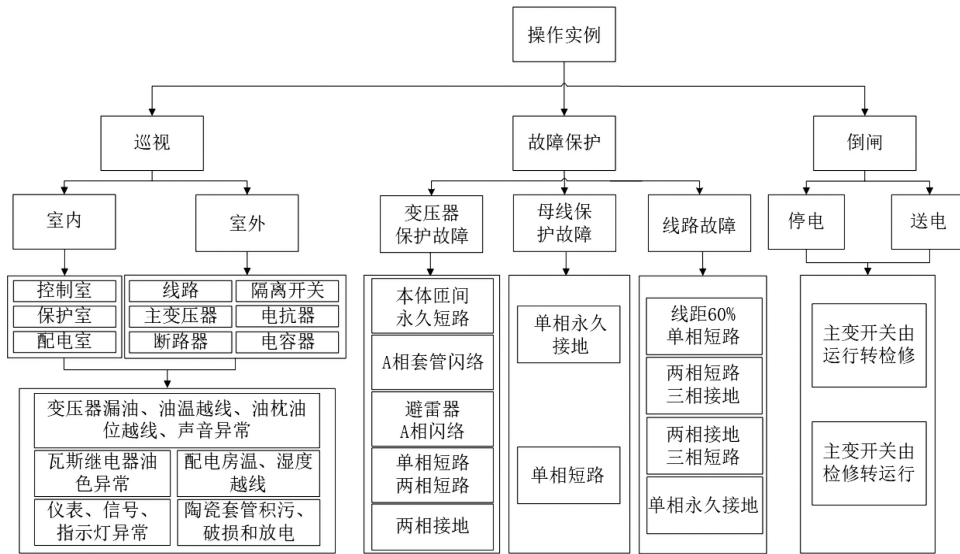


图1 变电站虚拟教学平台架构

Fig. 1 Architecture of the virtual substation teaching platform

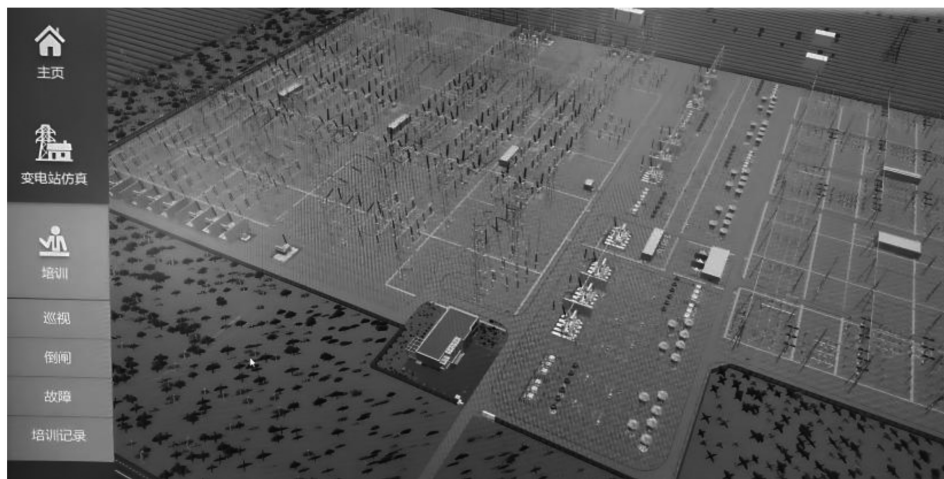


图2 变电站虚拟教学平台全景

Fig. 2 Overall view of the virtual substation teaching platform

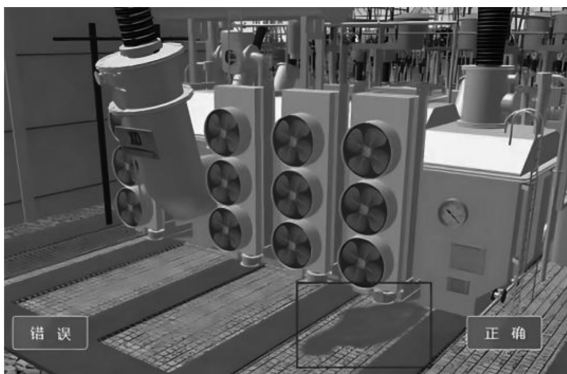


图3 变压器漏油

Fig. 3 Transformer oil leakage

图4以母线故障为例,当学生操作不当导致母线A相永久接地故障时,可观察到A相套管放电,此时,母联差动保护系统自动启动,触发室外断路器跳闸。控制室内母线1保护屏同步显示“保护运行”状态标识闪烁、“母联

差动保护”动作标识点亮,表明该保护装置已成功响应并完成切除故障。随后,A相套管放电现象消失,保护屏上相关设备状态恢复常亮,表示系统已恢复正常运行。



图4 母线故障

Fig. 4 Busbar fault

2.4 倒闸模块

倒闸操作是将电气设备由停电转换为送电或送电转

换为停电的操作,其操作必须遵守操作票制度、监护制度,严格按照操作流程执行^[14]。变电站虚拟教学平台的倒闸模块引导学生根据操作票的步骤流程,模拟变电站中断路器和隔离开关等设备状态切换,可避免在实际物理系统因为误操作而导致的电气故障,从而以较低的成本模拟未来在实际物理系统中的操作。具体的倒闸操作将在下一章详述。

3 教学设计实例

本章以 750 kV 变电站中某台变压器由运行转检修的过程为例,详述变电站虚拟教学平台中变压器的倒闸操作实施过程。平台主接线如图 5 所示,当平台主变压器 1 检修,与其相连接的线路需要退出运行,检修的断路器及需退出的线路在图中实线框标出。

变电站倒闸操作的传统培训方式,以 PPT 授课为主,由教师逐条讲解操作流程为

- 1) 拉开 7530 和 7531 断路器;
- 2) 将断路器测控装置开关置“就地”位置;
- 3) 合上 75302 隔离开关操作电源空气开关;
- 4) 拉开 75302 隔离开关;
- 5) 检查 75302 隔离开关确在断开位置;
- 6) 断开 75302 隔离开关操作电源空气开关;
- 7) 合上 75301 隔离开关操作电源空气开关;
- 8) 拉开 75301 隔离开关;
- 9) 检查 75301 隔离开关确在断开位置;
- 10) 断开 75301 隔离开关操作电源空气开关;
- 11) 合上 75312 隔离开关操作电源空气开关;
- 12) 拉开 75312 隔离开关;
- 13) 检查 75312 隔离开关确在断开位置;
- 14) 断开 75312 隔离开关操作电源空气开关;
- 15) 合上 75311 隔离开关操作电源空气开关;
- 16) 拉开 75311 隔离开关;
- 17) 检查 75311 隔离开关确在断开位置;
- 18) 断开 75311 隔离开关操作电源空气开关;
- 19) 在 75302 隔离开关断路器侧验明确无电压;
- 20) 合上 753027 接地刀闸;
- 21) 检查 75302 接地刀闸确在合好位置;
- 22) 在 753011 隔离开关断路器侧验明确无电压;
- 23) 合上 753017 接地刀闸;
- 24) 检查 753017 接地刀闸在合好位置;
- 25) 在 75311 隔离开关断路器侧验明确无电压;
- 26) 合上 753117 接地刀闸;
- 27) 检查 753117 接地刀闸确在合好位置;
- 28) 在 75312 隔离开关断路器侧验明确无电压;
- 29) 合上 753127 接地刀闸;
- 30) 检查 753127 接地刀闸确在合好位置;
- 31) 断开 7530 和 7531 断路器操作电源空气开关;
- 32) 断开 7530 和 7531 断路器信号、电源刀闸;

33) 断开 7530 和 7531 断路器的保护压板;

34) 悬挂禁止合闸有人工作标识牌。

该倒闸操作共分 34 步,流程复杂,内容细节过多,各个步骤之间的细节衔接不够明显,由于讲解内容抽象,学生又缺乏实地操作的经验,无法理解每个步骤的细节,对细节判断失误,会为未来工作埋下安全隐患。

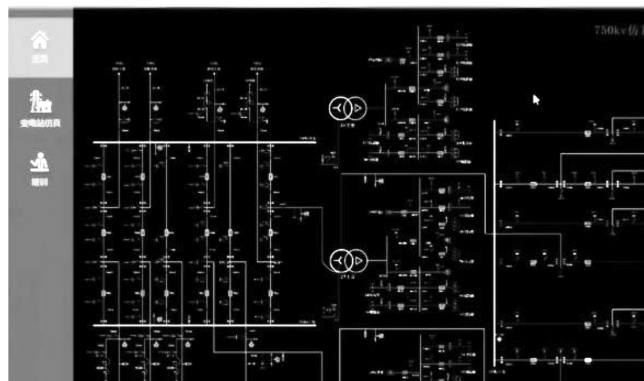


图 5 某 750 kV 变电站主接线图

Fig. 5 Main electrical connection diagram of a 750 kV substation

变电站虚拟教学平台中,主变压器从运行转检修的倒闸操作由平台显示完整的倒闸操作票,如图 6 所示,学生需要逐步完成每一项的倒闸作业操作,当学生操作不当时,平台会提示错误并出现操作指引,学生根据平台的正确操作引导,将错误的操作修改正确后才能继续进行下一步操作。通过平台对错误操作的及时反馈,能够提高倒闸作业的培训效率,保证培训质量。

变电站孪生平台倒闸操作的操作票主要包括 4 个步骤。断路器操作、隔离开关操作、接地操作、控制回路退出操作,具体操作步骤如下。

1) 断路器操作

断路器操作主要包括:a) 拉开 7530 和 7531 断路器并检查其确在断开位置;b) 将 7530 和 7531 断路器测控装置切换开关由“远方”改投“就地”位置。图 7 所示是完成以上两个断路器操作步骤后,可在室外断路器上观察到标志屏显示“分 OFF”。该状态信息将同步传输至室内控制平台,便于判断线路中断路器是否已成功分闸。

变电站倒闸操作票		
操作时间: 2022年11月27日03时47分19秒		操作结束时间:
操作任务: 1号主变高压侧7530和7531开关由运行转检修(停电)		
排序	操作项目	是否完成
1	确认750kV仿真变7530和7531断路器监控画面确已调出	✓
2	拉开7530和7531断路器	
3	将7530和7531断路器测控装置切换开关由“远方”改投“就地”位置	
4	检查7530和7531断路器确在断开位置	
5	合上75302隔离开关操作电源空气开关	

完成

图 6 主变压器运行转检修倒闸操作票

Fig. 6 Switching operation ticket for transferring the main transformer from service to maintenance

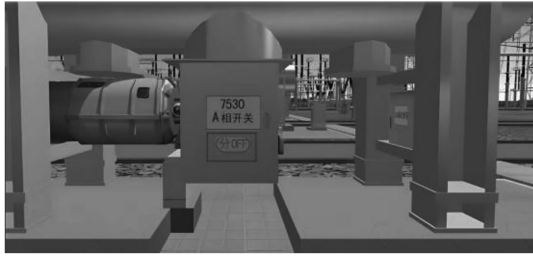


图7 室外断路器分闸成功

Fig. 7 Success fulopening of outdoor circuit breaker

2) 隔离开关操作

隔离开关操作主要包括:a) 合上 75302 隔离开关的操作电源开关;b) 拉开 75302 隔离开关并检查其确在断开位置;c) 断开 75302 隔离开关的操作电源开关,75301、75312、75311 隔离开关重复以上操作。图 8 是隔离开关操作完成之后,可观察到室外隔离开关为分闸状态。其状态同步显示于室内控制平台,用于确认分闸操作的完成。

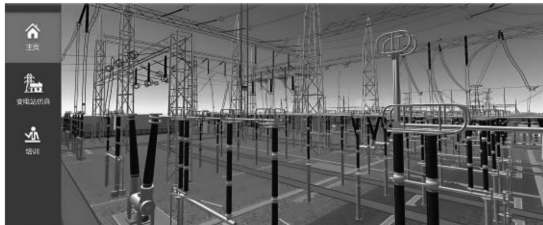


图8 室外隔离开关分闸成功

Fig. 8 Successful opening of outdoor disconnector

3) 接地操作

接地操作主要包括。a) 在 75302 隔离开关断路器侧验明确无电压;b) 合上 753027 接地刀闸,并确认接地刀闸确在合好位置;75301、75311、75312 重复步骤 1 操作,753017、753117、753127 重复步骤 2 操作。图 9 是合上接地刀闸后,可以观察到双色杆向上固定,代表合闸成功。同时,该状态同步反馈至室内控制柜,确认接地刀闸已可靠闭合,线路处于有效接地状态,从而保障现场施工人员的人身安全。



图9 室外接地刀闸合闸成功

Fig. 9 Successful closing of outdoor grounding switch

4) 控制回路退出操作

控制回路退出操作主要包括。a) 断开 7530 和 7531 断路器操作电源空气开关;b) 断开 7530 和 7531 断路器信号、电源刀闸;c) 断开 7530 和 7531 断路器的保护压板;d) 悬挂“禁止合闸有人工作”标识牌,图 10 是控制回路退出操作完成之后,可以在室外隔离开关下观察到“禁

止合闸有人工作”标识牌已挂好。同时室内可以观察到断路器信号灯已经熄灭,表示控制回路退出操作已完成。

控制回路退出操作完成后,代表整个倒闸操作已经完成。变电站孪生平台能够完整地将倒闸操作的整个过程通过数字模型的方式展现出来,并引导学生自主根据平台的引导进行相关倒闸操作。该平台改变了传统单一的教学模式,在操作的过程中给予学生即时反馈,强化正确操作并以较低的成本修正错误操作,有效提高了变电站相关操作的培训效率。



图10 室外标识牌模型悬挂成功

Fig. 10 Successful installation of outdoor warning signs

4 教学成效

上述变电站实践操作课程已在我校进行了教学实践,通过学生课堂教学、实践操作、实验报告加强学习效果,并对参与课程的同学进行问卷调查,结果如图 11 所示。

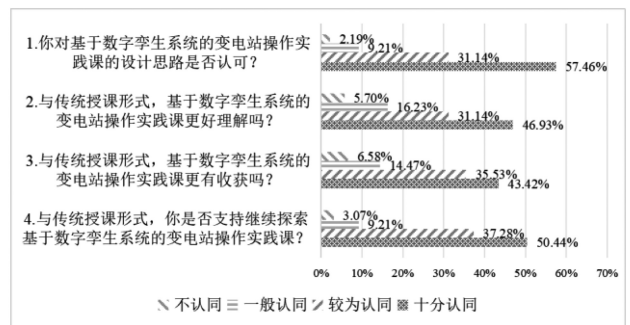


图11 变电站虚拟教学平台教学效果分析

Fig. 11 Analysis of teaching effectiveness on the virtual substation teaching platform

从图 11 可以看到,有超过 97.8% 的同学认同课程的设计思路与实践作用,94.3% 的同学认同该实践课可以促进理解课程内容,93.42% 的同学认同该实践课程可以更好收获知识与培养实操思考作用,96.93% 的同学非常支持继续探索优化课程的实践内容,利用可视化和人机交互的特点,能更直观地了解变电站结构与实践操作内容。

5 结论

本文将变电站虚拟教学平台引入到变电站教学中,在变电站巡视、故障保护、倒闸等核心操作的培训中,使得学生能够严格遵循操作票指引操作,并在失误时及时获得系统的反馈及正确指引。相较于传统 PPT 的形式的理论授课,变电站虚拟教学平台模拟还原度高、互操作性强、易于扩展,采用该平台教学可加深学生学习印象,强化学习效

(下转第 188 页)