

面向新型电力系统的发电厂电气部分课程 与虚拟仿真实验融合教学探索

王晓亮, 李泽, 常琪, 范松丽

苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2025年5月6日; 录用日期: 2025年6月19日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

随着“双碳”战略的深入推进,我国电力系统加速迈向高比例新能源接入、高度电力电子化和智能化的新型电力系统。作为电气工程教育的重要组成部分,发电厂电气课程和实验教学面临着课程内容滞后、实验资源不足及虚拟仿真应用浅层化等突出问题,难以满足新型电力系统对复合型人才的培养需求。本文结合行业发展趋势,系统分析了现阶段教学中存在的主要挑战,提出了从教学目标重构、教学内容优化、虚拟仿真实验体系建设及教学模式创新四个维度的改革方案。改革聚焦“传统电气+新能源+智能化”的知识结构,构建“课-训-赛”一体化虚拟仿真实验平台,并引入“四位一体”与问题驱动式教学模式,实现理论学习与工程应用的深度融合。实践表明,改革方案有效提升了学生的系统认知、操作能力与数字化素养,增强了应对复杂工程问题的综合能力。研究为高校电气工程教育现代化、智能化转型提供了可行路径,为新型电力系统建设培养高素质复合型人才提供了有力支撑。

关键词

新型电力系统, 发电厂电气部分课程, 虚拟仿真实验, 教学改革, 工程教育

Exploration of Integrated Teaching of Power Plant Electrical Courses and Virtual Simulation Experiments for the New Electricity System

Xiaoliang Wang, Ze Li, Qi Chang, Songli Fan

School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou Jiangsu

Received: May 6th, 2025; accepted: Jun. 19th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

With the in-depth advancement of the “dual carbon” strategy, China’s power system is rapidly evolving toward a new paradigm characterized by high penetration of renewable energy, extensive power electronics integration, and intelligent operations. As a crucial component of electrical engineering education, the power plant electrical courses and experimental teaching are facing prominent challenges such as outdated content, limited experimental resources, and shallow application of virtual simulation, which fall short of the requirements for cultivating versatile talent aligned with the development of the new power system. This study, based on industry trends, systematically analyzes the key issues in current teaching and proposes a reform plan across four dimensions: redefining teaching objectives, optimizing curriculum content, constructing a multi-tier virtual simulation experiment system, and innovating teaching methodologies. The reform focuses on building an integrated knowledge framework of “traditional power systems + renewable energy + intelligent control,” develops a “course-training-competition” integrated virtual simulation platform, and introduces a “four-in-one” and problem-based learning model to deeply integrate theoretical learning with engineering practice. Practical results demonstrate that the reform effectively enhances students’ system cognition, operational skills, and digital literacy, strengthening their competence in solving complex engineering problems. This research provides a feasible path for the modernization and digital transformation of electrical engineering education and offers strong support for cultivating high-quality interdisciplinary talent for the new power system.

Keywords

New Electricity System, Power Plant Electrical Courses, Virtual Simulation Experiments, Teaching Reform, Engineering Education

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着全球能源结构调整和可持续发展战略的深入推进，能源行业正经历着一场深刻变革。我国作为能源消费和碳排放大国，提出了双碳目标，即力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和 [1]。这一目标不仅重塑了电力系统的发展路径，也为电气工程教育提出了新的历史使命。为支撑清洁低碳、安全高效的现代能源体系建设，电力系统正加速迈向以清洁低碳、灵活高效、智能互动为特征的新型电力系统。

作为电力系统的源端环节，发电厂的电气设备及其控制系统在新型电力系统建设中承担着关键角色。发电环节的变革不仅体现在新能源发电技术(如风电、光伏、生物质能等)的大规模接入，还包括发电设备智能化水平的持续提升，如智能断路器、数字化保护装置和基于人工智能的设备监测技术的应用 [2]。同时，发电系统的运行机制也从传统的刚性供电转向更高灵活性、更复杂耦合特性的智能协同运行。例如，随着新能源高渗透率接入，发电厂需应对出力波动大、功率平衡难、系统惯性减弱等新问题，对电气控制系统的实时性、可靠性和自适应性提出了前所未有的挑战 [3]。

电气工程专业作为能源电力领域的重要学科，其人才培养直接关系到我国电力工业的安全稳定运行与转型升级。传统电气工程专业课程——尤其是发电厂电气部分课程——长期以来以火力发电系统为主线，

教学内容集中在发电机、变压器、母线、断路器、继电保护及其控制逻辑等基础知识。然而，这种课程体系多聚焦于传统机组的工作原理和常规运行模式，新能源发电系统、电力电子化接口设备、柔性输电技术等新兴内容覆盖较少，导致学生知识结构滞后、工程适应力不足[4][5]。更为突出的问题在于实验教学环节，由于发电厂电气系统设备体积庞大、投资成本高昂、运行环境复杂，院校往往难以为学生提供真实的发电厂级实验条件[6][7]。即使配备基础电气实验室，也多限于小型设备或模块化仿真，难以实现系统级综合操作、复杂工况训练及实时故障应急演练，不仅削弱了学生的工程体验感，也限制了其工程应用能力的培养。

在此背景下，虚拟仿真技术的崛起为电气工程教育改革提供了全新的解决方案。虚拟仿真实验以计算机图形学、动力学建模和交互式仿真为核心，能够在数字化环境中高度还原真实设备的结构、功能及运行机制，为学生提供零风险、高还原、多场景的实验体验。大量研究表明，虚拟仿真实验不仅在安全性、可重复性、成本控制等方面具有显著优势，还能有效激发学生学习兴趣，促进理论知识的应用转化，提升工程创新思维[8]。

虚拟仿真教学已成为电气工程教育的重要发展方向。近年来，我国持续推动虚拟仿真实验教学示范项目建设，取得了显著成效。例如，三峡大学电气工程虚拟仿真实验教学中心以国内典型水电站为蓝本，自主开发了具有知识产权的水电站仿真培训系统，并开设了水电站运行虚拟仿真实验课程[9]；天津大学电气工程与自动化虚拟仿真实验教学中心则成功开发了微电网综合虚拟仿真、高电压虚拟仿真等多项实验项目[10]。各高校围绕工程教育的重点与难点打造高水平虚拟仿真平台，已形成一批具有示范效应的标志性成果。此外，随着数字孪生(Digital Twin)、增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等先进技术的引入，虚拟仿真实验正向着高度沉浸、实时交互、智能化分析方向快速演进，这种新趋势为高校电气工程教育提供了可借鉴的方向[11]。

结合国内外的研究与应用经验，基于虚拟仿真平台的教学改革不仅是应对实验资源不足的权宜之计，更是推动工程教育数字化、智能化、个性化转型的必然选择。通过虚拟仿真实验，学生不仅能够掌握传统发电厂电气系统的基本原理与操作流程，还能在仿真环境中深入探索新能源发电接入、复杂运行工况、多层次保护及自动化控制等先进内容，全面提升解决复杂工程问题的能力。

因此，本文以新型电力系统发展背景为切入点，围绕发电厂电气部分课程的教学改革展开研究，探讨如何基于虚拟仿真技术构建系统性强、交互性好、内容前沿的实验教学平台，推动课程内容、教学模式、考核方式的全方位创新，助力电气工程人才培养质量的持续提升。

2. 现状问题分析

随着我国双碳战略的深入推进以及新型电力系统的加速构建，电力行业正经历从传统集中式火力发电向新能源多元化、数字化和智能化发展的深刻变革。这对电气工程人才培养提出了全新要求。然而，当前高校发电厂电气部分的课程内容和实验教学体系仍存在诸多问题，与行业发展趋势存在明显脱节，难以满足新型电力系统对复合型人才的需求。本文将现状问题归纳为四个方面(见表1)。

1) 教学内容滞后，课程体系与行业脱节

目前多数高校的发电厂电气课程依然以传统火力发电系统为主，聚焦汽轮发电机、变压器、断路器、继电保护等经典设备的运行原理和控制技术。与此相比，风电、光伏等可再生能源发电系统及其特有的电气设备(如逆变器、柔性直流输电装置)、储能系统等内容涉及较少或处于空白。此外，数字化、智能化电气设备(如智能断路器、数字化继电保护装置)的应用已在电力系统中快速普及，但当前课程未能有效融入相关知识，导致学生对新能源系统和现代电气设备的理解和掌握严重不足，知识结构无法适应行业快速发展的需求。这种滞后的课程内容不仅限制了学生的技术视野，也制约了其就业竞争力。

Table 1. Major challenges of power plant electrical curriculum and experimental teaching in the context of the new electricity system

表 1. 新型电力系统背景下发电厂电气课程与实验教学存在的主要问题

存在问题	具体表现	主要影响
教学内容滞后	课程内容仍以传统火力发电为主，缺少风电、光伏、储能及智能化电气设备等新型电力系统的知识体系。	学生知识结构与行业发展脱节，难以满足新能源和智能化电力系统的实际需求。
实验资源受限	实验设备主要为基础电气实验装置，缺乏高压、复杂系统及故障处理等训练，受限于场地、安全及资金条件。	学生无法获得系统性动手实践和故障应急处理能力，理论与实际严重脱节。
虚拟仿真应用有限	虚拟仿真实验停留在单设备静态操作层面，缺少系统级仿真、复杂工况和异常状态动态模拟，课程与仿真的深度融合不足。教学实效性不强，未形成有效的教学闭环。	难以实现复杂系统的全面认知和操作训练，教学实效性不强，未形成有效的教学闭环。
新型电力系统带来新挑战	高比例可再生能源、电力电子化和数字化运维带来新的技术需求，现有课程体系未能有效对接跨学科融合与智能控制能力的培养。	学生系统集成与智能控制能力不足，人才培养与新型电力系统的要求存在明显差距，课程体系急需重构与升级。

2) 实验资源受限，理论与实践脱节

发电厂电气设备普遍具有高电压、大容量、复杂系统集成等特点，其实验教学对场地、安全、资金的要求极高。大多数高校仅配备基础电气实验装置，无法覆盖高压设备操作、复杂系统运行及典型故障处理等高风险实验，学生在校期间难以获得全面的动手实践和系统性工程训练。此外，现有实验多以验证性为主，缺乏探索性和综合性，使得理论教学与实际应用严重脱节，学生往往纸上谈兵，缺乏对电厂复杂电气系统运行机制及故障应急处置的深入理解与应变能力。

3) 虚拟仿真应用起步，融合度和深度不足

针对实验条件受限的问题，部分高校已开始尝试引入虚拟仿真实验平台，期望通过信息化手段补足传统实验的不足。但总体来看，这类仿真教学多停留在单一设备层面的静态展示和基本操作训练，例如模拟变压器接线、断路器操作等，尚未建立起系统级的发电厂电气仿真环境，更缺乏复杂工况、异常状态及连锁反应等动态模拟功能。这不仅难以实现对复杂电气系统的全面理解，也无法满足新型发电厂数字化、智能化发展背景下对电气系统深层次操作、运行和故障应急的仿真训练需求。虚拟仿真实验与课程教学的融合程度有限，未能形成有效的教学闭环，影响了教育实效性。

4) 新型电力系统带来的新挑战

当前，我国正加速推进以新能源为主体的新型电力系统建设，呈现出高比例可再生能源接入、高度电力电子化、数字化运维、分布式和多能互补等新特征。这一背景对电气工程人才提出了更高的要求：不仅要掌握电气工程的基础理论和技能，还需具备跨学科知识融合能力，能够理解可再生能源与传统能源的协同机制，掌握先进的数字化仿真与智能控制技术，具备系统集成及全局优化思维。然而，现有课程体系以单一能源、静态控制为主，教学方法较为传统，未能有效对接新型电力系统的实际需求，人才培养与行业新需求之间的矛盾愈发凸显。课程体系亟需围绕新型电力系统构建起新能源 + 电力电子 + 数字化 + 智能化多维融合的知识体系，并通过创新教学方法和实验手段，全面提升学生的系统分析能力、数字化操作能力和智能控制能力。

综上所述，当前发电厂电气部分课程与实验教学普遍存在内容滞后、实践不足、虚拟仿真不深入及人才能力匹配度低等突出问题。如何立足新型电力系统发展趋势，突破实验条件制约，创新课程体系与虚拟仿真融合模式，已成为亟需解决的重要课题。

3. 教学改革方案设计

随着我国电力行业加速迈向高比例新能源接入、高度电力电子化及数字化、智能化的新型电力系统

建设,发电厂电气部分课程作为电气工程及其自动化专业的核心课程之一,亟需进行系统性改革与重构。为切实提升学生的综合素质与工程能力,适应新时期电力行业发展的迫切需求,本文从教学目标、教学内容、虚拟仿真实验体系和教学模式四个维度提出了系统化的教学改革方案。

3.1. 教学目标重构

传统发电厂电气课程的教学目标主要侧重于掌握电气设备的结构、工作原理及运行维护,强调知识的系统性,但在新能源系统认知、智能化运维和数字化应用等方面涉及不足,难以满足新型电力系统对复合型、高素质、创新型人才的培养需求。为此,本次课程改革以服务行业发展、培养复合型工程人才为核心,提出全新教学目标:一是注重基础与前沿结合,使学生不仅系统掌握传统火力发电厂电气设备的结构、运行特性和维护技术,还深入理解风电、光伏、储能等新能源系统的结构特性、接入方式及控制策略,打造传统+新能源双轨并行的知识体系;二是强化综合能力,重点提升学生的系统认知、设备操作、故障分析及应急处理等工程实践能力,确保其能够在复杂多变的实际环境中胜任关键岗位;三是突出数字素养与智能运维能力,依托虚拟仿真及先进信息技术,增强学生对数字化监测、智能化控制的理解和应用能力,以适应未来智能电厂及智慧能源系统的发展趋势。

3.2. 教学内容优化

本次改革坚持内容更新、结构优化、案例驱动的原则,在保持传统火力发电厂电气设备教学完整性的基础上,着力引入新型电力系统相关技术,构建覆盖广泛、衔接紧密的知识体系。一方面,扩展新能源发电与并网系统内容,新增风电场、光伏电站的电气接入及运行特性模块,重点讲解并网标准、典型接入方式、运行特性及电气安全控制要求,增强学生对可再生能源系统的理解;另一方面,引入先进电气技术案例,将能量管理系统(EMS)、虚拟同步发电机(VSG)控制技术、智能开关设备、柔性直流输电(VSC-HVDC)、分布式发电接入及电网侧储能等前沿案例融入教学,拓展学生技术视野。同时,丰富复杂工况教学,针对新能源波动、极端气候等实际问题,设置常规工况、极端负荷波动及异常工况仿真模块,强化对复杂电气系统的掌握。各知识模块均结合典型工程案例展开讲解,引导学生在分析和解决真实工程问题中深刻理解理论,全面提升其工程应用能力。

3.3. 虚拟仿真实验体系建设

实验教学是培养学生动手能力、深化理论理解的重要环节。鉴于发电厂电气实验普遍存在高风险、高成本及场地受限等问题,本方案提出建设多层次、模块化、系统级的虚拟仿真实验体系,围绕可视化、交互性、可操作性三大核心目标,设计三级仿真模块:

1) 基础认知仿真模块:旨在帮助其建立对发电厂典型电气设备的结构感知和运行认知。通过三维建模与动画演示,学生可直观了解发电机、变压器、断路器、开关柜及继电保护装置的内部构造与运行流程。同时,模块支持交互式操作体验,学生可在虚拟环境中进行设备接线、参数调节与状态切换,从而实现看得懂动得了的学习转化。该模块依托 Unity3D 或 WebGL 等引擎开发,界面友好,适用于翻转课堂与自主预习。

2) 故障与异常工况仿真模块:聚焦于发电厂运行中的典型故障与系统异常,适用于中高年级学生的能力训练与应急响应教学。平台可模拟短路、过载、失步、继电保护误动、逆变器离网、储能异常脱扣等工况,并结合动态响应建模技术,实时呈现电压、电流、功率等参数变化过程。学生通过调取报警信息、分析记录、切换视图等方式,完成从故障识别、诊断到恢复的完整闭环训练,显著提升其实战应对能力。

3) 综合应用项目模块:则致力于培养学生的系统集成与调度优化能力,构建了一个包含光伏、储能、负荷、电网等要素的虚拟综合能源发电系统。学生可依据任务需求完成系统拓扑搭建、设备参数配置与

调度策略设定，并在负荷波动、故障扰动等动态场景中进行实时优化调控与策略调整。该模块强调任务驱动与综合应用，是课程设计、项目实践等教学环节的重要支撑平台，能够有效锻炼学生的系统思维与工程综合能力。

此外，虚拟仿真实验平台与课程理论教学深度融合，构建课 - 训 - 赛一体化实验教学体系，实现课上理论学习、课下仿真训练、赛中实战应用的全流程闭环，全面提升教学实效。

3.4. 教学模式创新

在教学模式上，本次改革提出四位一体与问题驱动双轮驱动机制，旨在全面增强学生的自主性、参与感与创新能力和实践能力。首先，四位一体教学模式将理论讲授、虚拟仿真操作、案例分析与工程项目实践深度融合，构建讲 - 练 - 析 - 做一体化教学链条，打破传统单一的知识传授模式，实现理论与实践的无缝衔接。具体而言，在教学组织路径上，通过系统讲授发电厂电气设备的基本原理和运行机制夯实理论基础；引入虚拟仿真实验，使学生在可视化平台上直观理解设备构造与控制逻辑；随后结合风电并网故障、电网调度等真实工程案例，开展分析与策略设计；通过小组工程项目实践，整合所学内容完成系统建模与方案验证，提升综合素养与工程应用能力。在教学方法方面，依托线上学习平台推送预习内容并结合翻转课堂，利用仿真平台开展互动训练，引导学生使用工程软件如 PSCAD、MATLAB/Simulink 完成任务，辅以团队协作与汇报展示，强化实践导向与合作能力。评价机制则实行形成性与终结性相结合的方式，涵盖理论测试、仿真表现、案例答辩及项目执行多维度内容，实现对学生知识掌握、动手操作与协同能力的全面考核。

其次，问题驱动教学模式以复杂工程问题为核心，围绕设问 - 探究 - 验证 - 解决的全过程培养学生的问题分析与工程实践能力。在实施流程上，教师首先提出贴近实际的工程问题情境，学生以小组形式开展任务分解、文献查找与方案设计，并借助仿真平台进行模拟验证；中期通过教师指导和阶段反馈优化设计思路，最终以汇报与仿真演示形式展示成果。为保障教学质量，配套建设了问题库、资源包与教师辅导机制，提供从问题引导到技术支持的全过程支撑。评价体系则涵盖任务完成的过程性评价、成果展示的实用性与创新性评价，以及团队协作能力的多维度考核，实现对学生综合素质的全方位评价与提升。问题驱动式教学以工程实际问题为切入点，如新能源接入导致电网不稳定如何应对？、储能系统异常如何高效诊断与处置？等，引导学生在问题分析、资料查找、方案设计及仿真实践中，培养自主学习、批判性思维与创新能力。最后，引入形成性评价体系，改变以期末考试为主的单一考核模式，将学生在仿真操作中的动手能力、问题解决方案的科学性及团队协作表现纳入平时成绩，注重过程性与结果性结合，促进学生在全过程中的持续成长与进步。

综上所述，本文通过重构教学目标、优化教学内容、引入虚拟仿真实验体系及创新教学模式，实现了从知识型向能力型、静态式向动态式的全面转变，旨在培养具备扎实理论基础、卓越工程实践能力及前瞻性思维的高素质复合型电气工程人才，为我国新型电力系统建设输送有力人才支撑。

4. 结语

新型电力系统的加速建设不仅深刻改变了电力行业的运行机制，也对电气工程教育提出了前所未有的挑战与机遇。作为电气工程及其自动化专业的重要组成部分，发电厂电气课程和实验教学亟需突破传统框架，构建符合新能源 + 电力电子 + 数字化 + 智能化发展趋势的新型教学体系。本文结合当前课程存在的滞后性、实践不足与虚拟仿真应用浅层化等突出问题，从教学目标、内容、实验体系和教学模式四个维度系统提出了改革方案，强调通过理论 - 仿真 - 实践全链条衔接，推动学生从被动接受知识向主动解决复杂工程问题转变。

改革不仅聚焦于提升学生的传统电气基础和操作能力,更着力强化数字化素养、智能控制与跨学科综合能力的培养,确保人才培养质量能够有效对接新型电力系统建设需求。尤其是虚拟仿真实验平台的建设,实现了突破性进展,为解决实验资源受限问题、增强学生沉浸式体验提供了可复制、可推广的路径。创新的教学模式与多元化评价机制,则进一步夯实了学生的实践能力和工程创新能力。

展望未来,随着数字孪生、人工智能及虚拟现实等前沿技术的持续发展,发电厂电气课程的虚拟仿真教学将迎来更多创新机遇。高校应持续深化校企合作与技术引进,完善平台建设,推动教学内容的动态更新,真正实现电气工程教育的现代化、智能化与国际化发展目标,为国家能源转型与电力行业可持续发展培养更多高水平复合型人才。

基金项目

2023年江苏省高等教育教改研究立项课题“基于产教融合共同体的区域电子信息类专业人才培养探索与实践”(2023JSJG326)。

参考文献

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1765-1778.
- [3] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,李姚旺,方宇晨,张宁,钟海旺. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [4] 傅恺宁,兰威. 面向新型电力系统的发电厂电气部分课程教学改革探索[J]. 创新创业理论与实践, 2024, 7(14): 45-49.
- [5] 韩婷,李红斌,文劲宇,等. 培养复杂工程问题解决能力的一体化课程体系——华中科技大学电气工程及其自动化专业改革[J]. 高等工程教育研究, 2018(2): 52-59.
- [6] 陈春,邓丰. “双碳”目标下“发电厂电气部分”的课程改革与探讨[J]. 教育教学论坛, 2023(31): 73-76.
- [7] 杨勇,李红斌,文劲宇,等. 新工科电气工程实践教学体系重构与实践[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5074-5080.
- [8] 赵建勇,汤加钰,孙丹,等. 基于 MatlabGUI 的电气工程虚拟仿真实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(6): 92-97.
- [9] 天津大学电气工程与自动化虚拟仿真实验教学中心[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 223.
- [10] 三峡大学电气工程虚拟仿真实验教学中心[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 284.
- [11] 杨建峰,张雅美,王灿运,等. 基于数字孪生与 VR 的高职机电类专业课程实训教学探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(3): 184-188.