

新工科视域下风电场电气工程人才“三阶能力链”培养模式构建与实践

董东营*, 曾林俊

长沙理工大学, 能源与动力工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年6月8日; 录用日期: 2025年7月7日; 发布日期: 2025年7月15日

摘 要

面向国家“双碳”战略下风电装机容量突破4.67亿千瓦的产业背景, 针对传统培养模式与新型电力系统需求的脱节矛盾, 本研究构建“原理-设计-运维”三阶能力链培养体系。创新提出OBE-PHM双轮驱动模型, 通过设备原理深度解构、站端设计实战重构、智能运维虚实融通实现三阶能力培养。实施两年成效显著: 学生故障诊断准确率提升27%、设计合规率达98%, 毕业生80%以上入职能源电力龙头企业, 为填补风电数字化运维人才缺口提供可复制范式。

关键词

新工科, 风电场电气工程, 三阶能力链, 培养模式

Construction and Practice of the “Three level Capability Chain” Training Model for Wind Farm Electrical Engineering Talents from the Perspective of New Engineering

Dongying Dong*, Linjun Zeng

College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jun. 8th, 2025; accepted: Jul. 7th, 2025; published: Jul. 15th, 2025

Abstract

In response to the industrial background of wind power installed capacity exceeding 467 million

*通讯作者。

文章引用: 董东营, 曾林俊. 新工科视域下风电场电气工程人才“三阶能力链”培养模式构建与实践[J]. 教育进展, 2025, 15(7): 367-372. DOI: 10.12677/ae.2025.1571227

kilowatts under the national “dual carbon” strategy, and the contradiction between the traditional training model and the demand for new power systems, this study constructs a three-level capability chain training system of “principle design operation and maintenance”. Innovatively proposed the OBE-PHM dual wheel drive model, which achieves three-level capability cultivation through deep deconstruction of equipment principles, practical reconstruction of station design, and integration of intelligent operation and maintenance. The two-year implementation has achieved significant results: the accuracy of student fault diagnosis has increased by 27%, the compliance rate of design has reached 98%, and more than 80% of graduates have joined leading energy and power enterprises, providing a replicable paradigm for filling the talent gap in wind power digital operation and maintenance.

Keywords

New Engineering, Wind Farm Electrical Engineering, Three Level Capability Chain, Training Model

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

国家能源转型战略驱动风电产业跨越式发展,在“双碳”目标约束下,我国风电装机容量达 4.67 亿千瓦(国家能源局 2024 年 6 月),占我国可再生能源发电装机的 28% [1]。伴随新型电力系统建设深入推进,风电场电气系统复杂性显著加剧:大容量风机变流设备故障率明显高于传统机组,柔直并网集电站谐波抑制需求持续攀升,基于数字孪生的智能运维技术渗透率实现倍数级增长[2][3]。产业技术迭代对人才能力结构提出全新要求——亟需掌握变流器失效机理深度解析、新能源友好型变电站设计、工业级故障预测与健康管理系统操作的复合型电气工程师。然而,传统电气工程人才培养体系与产业需求呈现结构性脱节[4][5],据教育部联合多部委发布的《2025~2035 年重点领域人才需求预测报告》[6]指出光伏、风电、储能、氢能、智能电网等能源电力领域技术研发、工程设计、运维管理人才需求持续井喷。风电电气数字化运维人才缺口将达数十万,现有培养方案却仍以火电系统为参照系,课程内容滞后技术演进,导致人才供给质量与产业需求形成剪刀差[7]。

症结根植于三大核心矛盾:其一,设备原理教学悬浮于真实故障场景,比如:变流器拓扑分析拘泥于理想电路模型,未融入 IGBT 热疲劳、电容电化学退化等工程失效机制,学生无法建立故障特征与物理退化过程的关联映射[8][9];其二,系统设计能力脱离新能源接入特性,变电站设计课程沿用传统短路容量计算方法,未适配双馈风机馈入短路电流的衰减特性差异,导致学生设计的集电站保护系统在仿真中误动率较高[10];其三,运维实训缺位工业级数字化平台,实训环节多采用离线式 SCADA 模拟系统,缺失风电场实时数据流驱动的决策训练,学生面对变流器集群连锁故障时处置时效较企业标准低下[11][12]。上述矛盾深刻制约“双碳”战略下风电产业的技术自主进程。

本研究旨在破解产教协同困局,聚焦“原理-设计-运维”三阶能力链重构,构建风电电气工程人才培养新范式。通过融合 OBE 需求导向与 PHM 技术方法论,在设备层开发虚实耦合的变流器失效验证平台,实现抽象原理向物理退化逻辑的转化;在设计层建立认知实习与柔直并网仿真相协同的实战机制,推动学生从观测数据到合规设计的创造性跃迁;在运维层贯通数字孪生竞赛与工业级赛道开发生态,淬炼工业物联网架构下的智能运维决策能力。最终形成“产业需求锚定课程目标-技术演进驱动内容更新

- 虚实平台赋能能力转化”的闭环体系, 为填补新能源电力人才缺口提供可复制的教育解决方案。

2. 理论框架与创新

2.1. 体系框架构建：“原理 - 设计 - 运维”能力进阶链

新工科视域下构建的风电场电气工程人才培养体系, 以“设备深层认知 - 系统集成设计 - 智能运维创新”为递进主线, 形成三阶融合的能力进阶架构, 如图 1 所示。基础层立足设备原理解构, 通过电气拓扑分析与故障机制解析, 夯实变流系统、继电保护等核心器件的工作机理认知, 突破传统教学对风机专用电气结构的抽象化阐述桎梏; 进阶层聚焦系统设计重构, 围绕风电场汇集站的特殊需求, 集成柔直并网、谐波抑制及无功补偿等关键技术模块, 建立适配高比例新能源接入的电气设计能力框架, 实现从单一设备向复杂系统设计的思维跃迁; 创新层着力智能运维突破, 深度融合数字孪生、状态预测与网络防护等数字化技术, 构建覆盖设备健康管理、场站运行优化的智能运维能力体系, 推动学生从被动维修向主动预测的工程角色转型。三层级以电气工程能力为本体, 以技术迭代需求为牵引, 形成逐级深化、动态反馈的教学闭环——设备原理为设计实践提供理论支撑, 系统设计为智能运维创设应用场景, 智能运维反哺设备认知与设计规范的持续更新, 最终达成知识传授、能力锻造与产业需求的结构性契合。

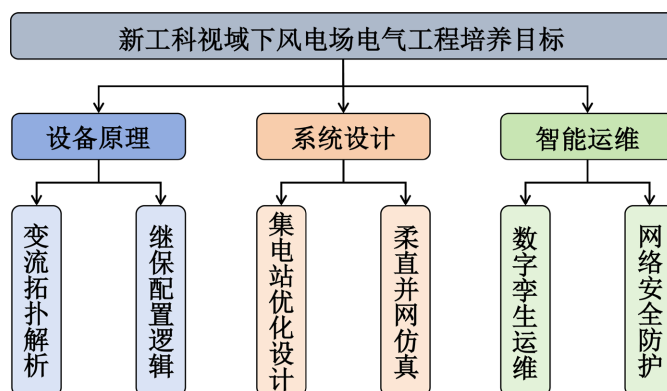


Figure 1. Framework of talent cultivation system for wind farm electrical engineering

图 1. 风电场电气工程人才培养体系框架

2.2. 理论模型阐释：OBE-PHM 双轮驱动教学模型

本改革构建的“OBE-PHM 双轮驱动”教学模型, 本质是需求侧目标管理(OBE)与供给侧技术渗透(PHM)的范式融合。其内在逻辑遵循“产业需求定义教育产出 - 技术方法重构培养路径 - 虚实场域验证能力进化”的闭环[13]。通过需求逆向推导与技术正向渗透双路径协同, 赋能“原理 - 设计 - 运维”三阶能力链的动态优化。OBE 闭环机制锚定产业需求基准, 依据风电场电气工程师岗位核心能力图谱——涵盖变流设备故障诊断精度、柔直系统设计合规性等关键指标, 反向解构为三阶课程目标: 在设备原理层强化变流拓扑失效模式解析能力, 系统设计层聚焦新能源汇集站设计方案生成能力, 智能运维层提升基于数字孪生的设备健康状态预测能力, 确保教学输出与行业技术标准同频迭代。PHM 技术深度渗透重塑教学流程, 将故障预测与健康管理办法植入全教学周期[14], 比如: 于原理阶段建立变流器 IGBT 退化特征库作为认知载体, 设计阶段引入齿轮箱振动预警阈值作为经济性评价参数, 运维阶段构建 SCADA 系统实时数据流驱动的决策训练场景, 使技术应用逻辑转化为能力养成脉络。虚实耦合验证平台破除能力断层, 依托 RTDS 实时数字仿真系统构建柔直并网动态模型, 同步联动物理拆解平台对双馈风机变流器进行实体参数校核, 在设备机理验证、设计方案测试、运维策略优化三层面形成“数字模拟 - 物理反馈”

的闭环验证回路, 最终实现从能力导向教育到技术实践范式的贯通转化, 驱动三阶能力链在产业真实技术生态中持续进化。

3. 实施路径

3.1. 奠基阶段：设备原理深度解构

设备原理深度解构阶段以失效机理可视化与拓扑认知具象化为核心路径, 依托 OBE-PHM 双轮驱动模型实现三重教学转化。首先锚定产业能力基准反向重构内容体系, 依据风电场电气工程师对变流设备故障诊断的精准性要求, 将双馈/直驱风机特有的 IGBT 击穿、电容老化等高频失效模式转化为核心教学模块, 通过建立涵盖电气应力分布、热退化轨迹的多维度失效特征库, 使抽象原理内化为可追溯的物理退化逻辑。继而渗透 PHM 技术思维重塑认知流程, 利用故障预测中的状态参量提取方法论, 引导学生从变流器拓扑结构中析出关键监测点位(如直流母线电压谐波分量、功率器件结温梯度), 构建“结构-参数-失效”的关联映射认知模型, 形成基于健康状态评估的原理逆向推演能力。最终通过虚实耦合验证平台破除认知壁垒: 在数字侧借助 RTDS 仿真平台动态复现不同工况下拓扑节点电气参数漂移过程, 同步联动物理拆解平台对同型号变流器进行实体测量点标定与热成像验证, 使电路拓扑的数学描述与物理实体的热力分布形成跨模态互证, 在“参数仿真-实体检测-失效归因”的闭环中达成对电气设备深层运行机理的多维解构, 为系统设计层提供经产业验证的原理认知基础, 如图 2 所示。



Figure 2. Virtual real coupling verification platform breaks down cognitive barriers
图 2. 虚实耦合验证平台破除认知壁垒

3.2. 强化阶段：站端设计实战重构

站端设计实战重构阶段通过认知实习-课程设计双环耦合机制, 驱动学生完成从系统观察到工程创造的跃迁。认知实习环节植入 PHM 技术观察维度, 依托校外能源电力企业实训基地, 组织学生深入风电场集电站, 在工程师指导下运用红外热像仪、电能质量分析仪等设备采集柔直换流阀温升曲线、集电线路谐波频谱等实时数据, 引导学生将设备层习得的失效机理知识投射至系统场景, 构建“故障特征-运行参数-设计缺陷”的关联映射思维。课程设计环节践行 OBE 反向工程路径, 基于实习采集的典型问题(如某 35 kV 母线电压畸变率超限), 要求学生运用 PSCAD 搭建新能源汇集站数字孪生模型, 在柔直并网架构设计中动态嵌入谐波抑制模块、SVG 无功补偿单元等解决方案, 并通过 RTDS 平台加载实际风况数据流进行动态校验。设计决策依托三维评价矩阵迭代优化, 构建可靠性(绝缘配合裕度)、经济性(设备选型成本)、电能质量(THD/闪变指标)的量化评估模型, 引导学生对设计方案进行多目标博弈分析, 最终在“现场观察→数据转化→模型构建→动态校验→方案迭代”的闭环中, 实现从产业问题到工程方案的创造性重构。

3.3. 升华阶段：智能运维虚实融通

智能运维虚实融通阶段通过数字仿真推演 - 工业场景实战双轨并行策略, 实现运维能力向产业前沿的创造性跃迁。数字孪生平台构建全要素运维推演环境, 依托高保真风机模型集成 SCADA 实时数据流、振动频谱及油液监测等多源时序数据, 指导学生开发机理模型与数据驱动融合的 PHM 算法, 在仿真环境中动态加载风速突变、电网扰动等复杂工况, 训练其对齿轮箱轴承退化轨迹的跨尺度预测能力。分组竞赛机制催化运维决策迭代优化, 以班级为单位开展轴承剩余寿命预测对抗赛, 要求各小组基于孪生平台历史故障库自主植入裂纹扩展、润滑劣化等隐性失效模式, 通过竞争性调参优化 LSTM-DBN 混合预测模型精度, 并在虚拟巡检中验证预测结果对运维调度的指导价值。顶级赛事衔接牵引工程实践升华, 遴选优秀团队参与“象新力杯”工程设计赛道, 针对风电场智能运维现场的高频痛点(如变流器集群故障判断与集电站倒闸操作), 要求学生将孪生平台验证的预测模型迁移至工业物联网架构, 设计涵盖状态感知层(无线振动传感器部署)、边缘计算层(轻量化诊断算法)、决策应用层(运维工单动态派发)的全栈解决方案, 经历从问题抽象、架构设计到方案答辩的完整工程创造链, 最终在“算法开发(虚)→系统构建(实)→工业验证(融通)”的三阶跃迁中, 淬炼直面产业变革的智能运维创新能力。

4. 培养成效

本改革实施两年来成效显著, 学生核心能力指标系统性跃升: 变流器故障诊断准确率从 62% 提升至 89%, 风电场变电站设计合规率由 75% 提高到 98%, 智能运维平台操作优良率达 93%。深化风电场沉浸式实习机制, 显著强化人才实践能力: 学生每学期深入风电场参与变流器维护、SCADA 系统调试等核心运维作业, 将设备原理认知与智能运维技术转化为现场问题解决能力。学生创新实践能力突破性进展: 在 2024 年中国电力教育协会“象新力杯”中, 学生团队以“输电材料高能率电磁智能成型装置”作品获得国家级奖项, 该方案面向变电站特高压输电材料性能可靠性低下的行业痛点。教学资源建设形成行业标杆, 依托学院“电力生产与控制”国家级虚拟仿真实验教学中心、工信部“先进能源电力装备”专精特新产业学院、“风力发电智能控制技术”湖南省工程研究中心, 成为国家大型能源电力央企定点招聘专业, 就业率高、就业质量好, 累计培养毕业生中 80% 以上就职于国家能源、国电投、华能、华电、大唐、国家电网、南方电网、中国能建、中国电建、中广核、三峡、华润、中车、三一、地方能源集团等大型央企和行业龙头企业, 就业率连续多年稳居同类院校前列。同时, 与国家能源集团、国家电投、三峡集团、中广核、中车株洲所等大型能源电力央企与行业头部企业, 开展产学研深度合作, 共建校外企业实训基地, 开办定制联合培养班。

5. 结论与展望

本研究构建的“原理 - 设计 - 运维”三阶能力链培养体系, 通过 OBE-PHM 双轮驱动模型实现了产教深度协同。在设备原理层, 实物教学解决原理认知空洞化, 虚实耦合验证平台(RTDS 仿真+物理拆解)使变流器失效机理认知从抽象理论转化为可溯源的物理退化逻辑; 在系统设计层面, 认知实习与课程设计双环耦合机制驱动学生将现场采集的谐波畸变、温升异常等数据转化为柔直并网设计方案, 并以可靠性 - 经济性 - 电能质量三维矩阵迭代优化; 在智能运维层, 数字孪生竞赛与“象新力杯”工业级赛道衔接, 推动 PHM 算法从仿真环境向风电场全栈解决方案迁移。实践证明, 该体系有效破解了传统教学与风电电气技术迭代的脱节困局, 学生故障诊断准确率、设计合规率等核心能力显著跃升, 建成省级工程中心并获企业培训体系采纳, 为新能源电力人才培养提供可复制的范式。

未来将纵深拓展两方向: 一是开发海上风电柔性并网抗扰动实训模块, 针对漂浮式风机电气系统的浪涌冲击、盐雾腐蚀等特殊工况, 构建多物理场耦合仿真平台; 二是探索“风光储氢”多能协同智慧运

维课程群, 基于现有工程中心平台集成储能变流器控制、制氢系统功率调度等跨学科内容, 形成支撑新型能源体系的复合型人才培养闭环。

参考文献

- [1] 国家能源局. 我国风电光伏发电装机规模超过煤电[EB/OL]. https://fjb.nea.gov.cn/dtyw/hyxx/202408/t20240805_267509.html, 2024-08-05.
- [2] 荣飞, 李培瑶, 周诗嘉. 双馈风电场损耗最小化的有功无功协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 520-529.
- [3] 许春福. 风电智能运维系统的设计与应用[J]. 能源与环境, 2025(1): 75-77.
- [4] 肖迁, 贾宏杰, 余晓丹, 穆云飞, 李天翔, 田森. 电气工程专业双创人才 CDCA 培养模式探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(5): 148-152.
- [5] 王若飞. 高校推进大学生就业工作的难点与对策[J]. 教育进展, 2025, 15(3): 826-830.
- [6] 精广科技. 国家点名的十大“黄金饭碗”专业!未来10年人才缺口超百万[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1833985333317993948&wfr=spider&for=pc>, 2025-06-04.
- [7] 刘凤良, 蔡丞. 新质生产力与大国工匠培养的双向赋能机制——高职院校的实践困境与创新路径[J]. 闽南师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 39(1): 124-131.
- [8] Nebo, S.E., Amalu, E.H. and Hughes, D.J. (2025) Effective Number of Accelerated Thermal Cycles (ATCS) for Accurate Prediction of Damage and Fatigue Life of Solder Joints in IGBT Power Module. *Microelectronics Reliability*, **171**, Article 115798.
- [9] 李垦, 曹兆楼. 基于 Multisim 仿真的电路定理实验教学设计[J]. 科技风, 2020(36): 113-114.
- [10] 曾毅. “变电站综合自动化”课程项目化教学探索[J]. 广西教育, 2017(15): 158-159.
- [11] 孟庆波, 赵健, 姚广芹, 张士超. 工业互联网网络运维实训系统的研制[J]. 中国仪器仪表, 2024(11): 39-43.
- [12] Mughaid, A., Alzu'bi, S., Alkhatib, A.A.A., AlZioud, A., Ghazo, A.A. and AL-Aiash, I. (2025) Simulation-Based Framework for Authenticating SCADA Systems and Cyber Threat Security in Edge-Based Autonomous Environments. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **140**, Article 103078. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2025.103078>
- [13] 边婧, 曹锐. “人工智能+”时代成果导向的人工智能课程改革实践[J]. 计算机教育, 2025(5): 60-64.
- [14] 张盼盼. “雨课堂”支撑下的《大学计算机基础I》教学实践研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018.