

电气工程发展中的关键技术与应用趋势分析

杨清亮

邢台市纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]随着全球能源转型向纵深推进,电气工程作为支撑新型电力系统建设的核心学科,正经历着深刻的技术变革与范式重构。文中系统梳理了电气工程发展中的关键技术领域,深入分析了当前面临的新能源并网消纳、核心装备自主化、数据融合治理及网络安全等主要挑战,并在此基础上提出了高质量发展的优化路径。研究表明,智能化与数字化深度融合、源网荷储协同规划、关键装备国产替代以及复合型人才培养是推动电气工程高质量发展的核心方向。文章最后展望了人工智能大模型、虚拟电厂、多能互补与数字孪生等未来应用趋势,以期为电气工程领域的理论研究与工程实践提供参考。

[关键词]电气工程;新型电力系统;新能源消纳;智能化;应用趋势

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20015

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Analysis of Key Technologies and Application Trends in the Development of Electrical Engineering

YANG Qingliang

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: With the deepening of global energy transformation, electrical engineering, as a core discipline supporting the construction of new power systems, is undergoing profound technological changes and paradigm reconstruction. The article systematically summarizes the key technical fields in the development of electrical engineering, and deeply analyzes the main challenges currently faced, such as new energy grid integration and consumption, core equipment self-reliance, data fusion governance, and network security. Based on this, an optimization path for high-quality development is proposed. Research has shown that the deep integration of intelligence and digitization, coordinated planning of source network load storage, domestic substitution of key equipment, and cultivation of composite talents are the core directions for promoting the high-quality development of electrical engineering. The article concludes by looking forward to future application trends such as artificial intelligence big models, virtual power plants, multi energy complementarity, and digital twins, in order to provide reference for theoretical research and engineering practice in the field of electrical engineering.

Keywords: electrical engineering; new power system; new energy consumption; intelligentization; application trends

引言

在“双碳”目标的引领之下,我国电气工程领域正处在前所未有的发展机遇和挑战之中。新型能源体系是以非化石能源为主供、以化石能源为兜底、以新型电力系统为核心支撑、以绿色智慧节约为用能导向的能源体系。国家能源局创建起“行动方案+实施方案、指导意见、试点引领”的“1+3”工作体系,不断推进新型电力系统创建落实落地。但是随着新能源装机容量的迅速增加、电力电子设备的大量接入、数字化技术的深入渗透,电气工程的技术架构、运行机制、安全防护等各方面都面临着系统性的重新构建压力。怎样才能正确把握关键技术方向,怎样

才能有效应对发展的瓶颈,怎样才能科学地规划出一条发展的道路,这些已经成为学界和业界共同关注的问题。

1 电气工程发展的关键技术分析

目前电气工程领域内的技术创新是多维的、多学科融合的。新能源接入和输电技术上,柔性直流输电技术发展较快,我国是世界上第一个提出 IGCT 柔性直流技术路线的国家,世界上第一个使用 6.5kV 功率器件的柔性直流工程已经建成并投入运行。构网型控制技术的应用,是提高电力系统安全稳定运行水平的一种重要方法。新型固态电池技术能量密度提高,循环寿命增加,混合储能系统优化配置后可以很好地平滑可再生能源出力的波动;电化学储

能对于提高电力系统的灵活性、稳定性以及电能质量有着越来越大的作用。就设备智能化来说,利用人工智能、大数据、物联网技术对电力设备运行数据进行实时采集、分析、处理,从而实现电力设备智能监测、故障诊断、预测性保养的目的。数字孪生技术依靠创建高精度的数字孪生模型,可以对电网运行状态实施全方位的感知和精确的映射,给智能化决策赋予了数据支撑。人工智能技术被用到电力调度、继电保护、电力设备管理、电力系统稳定评估、决策等诸多领域当中去。这些技术的突破和融合一起形成了电气工程高质量发展的技术基础。

2 电气工程发展面临的主要问题

2.1 新能源大规模并网下的电网消纳与系统稳定性挑战

伴随着风电、光伏等新能源的大量接入,电力系统安全稳定运行的难度也越来越大。国际上研究表明,当新能源渗透率超过 15%的时候,它的波动性会对电网的稳定运行造成极大的影响,电力系统的成本也会进入快速上升的临界点。2024 年我国新能源发电量占总发电量的比重超过 18%。南网科研院董事长郑外生认为系统安全稳定重构、供需平衡模式转变、安全、经济、低碳三者之间协调平衡这三大主要难题越来越突出,成了阻碍行业高质量发展的主要障碍。电力电子设备的低惯量、弱支撑、弱阻尼特性大大削弱了传统的电力系统稳定基础,新能源的强波动性、不确定性完全打乱了传统的源随荷动平衡局面,时空错配问题严重,光伏发电峰值在中午不能满足早晚高峰需求,风电夜间出力大但是负荷需求低^[1]。除此之外,系统灵活性差、调峰能力小、电网输送受阻、市场机制不健全等问题互相交织在一起。大规模高比例新能源外送、新能源系统友好性能提高、电力系统调节能力改善等专项行动还须继续推进。

2.2 核心电气装备与关键基础软件的自主化水平不足

虽然我国电气装备制造业取得了长足的发展,但是高端核心部件和基础软件还存在着较大的技术依赖。2023 年风电产业的数据显示高端齿轮箱的国产化率不到 30%,主要的算法专利被国外企业所掌握。2024 年高端 IGBT 芯片国产化率只有 35%,变流器的 IGBT 模块 70%依靠德国英飞凌、日本富士等国际品牌。更重要的是风电机组整机设计仿真软件、有限元分析软件几乎全部依靠国外,国内自主研发的商用软件还没有成熟。控制器 PLC 模块 100%用西门子、倍福等供货。硬件被掣肘、软件几乎空白的被动状况,既阻碍了产业链自主可控能力的发展,又给重要

基础设施埋下安全隐患。特高压直流输电等重大工程虽然在一些领域取得了突破,但是核心元器件和国际先进水平还存在着代差。打破高压芯片代差、国际专利壁垒,加快碳化硅基混合技术、全球化标准认证等方向的推进,已经成为产业发展必须完成的任务。

2.3 电气系统数字化转型中的数据异构与融合障碍

电气系统数字化转型已进入深水区,但是数据异构、融合的问题越来越突出。目前电力系统运行数据来源众多,包含调度自动化、设备监测、营销管理、气象信息等诸多来源的异构系统,数据格式千差万别、接口标准参差不齐、语义描述也存在着很大差异,给数据的互通互联和价值发掘带来了极大的阻碍。工业互联网平台渗透率由 2020 年的 18%上升到 2024 年的 43%,但是中小企业智能化改造还存在着技术适配性的问题。数据融合技术虽然可以整合各种各样的信息,提高设备的性能和生产效率,但是其在实际运用过程中也存在着数据质量参差不齐、实时性不能得到保证、跨系统协同困难等问题。第五代移动通信、人工智能、物联网等数字技术同能源电力技术不断融合。能源领域高质量标准化的训练数据集很少,算力支撑也不足。除此之外,数据主权归属、隐私保护、共享机制等制度方面的问题还没有得到很好的解决,从而造成“数据孤岛”的现象更加严重,使得电气系统全生命周期的数据治理无法真正实现。

2.4 能源互联网架构下网络安全风险与人才能力短板

能源互联网快速发展使系统效率得到提高,但是也大大增加了网络攻击面,安全风险不断升级。从监测数据可知,2023 年全球能源行业暴露的网络安全漏洞有 4500 个,其中 42%属于高危漏洞,35%是工控系统(ICS)漏洞,68%的 ICS 高危漏洞直接危害电力设施。2023 年全球电力系统勒索攻击量比上一年增加 35%,单个事件的平均赎金也提高了 35%以上,再加上业务中断和修复的成本,造成总的损失在 1200 万到 2500 万美元之间。分布式光伏、综合能源等新型场景下物联终端大部分没有做安全适配就接入网络,存在严重的风险隐患。大模型训练、工业控制系统内生安全漏洞、跨境数据流通等环节存在被攻击的风险^{2[2]}。与此同时高层次复合型技术人才缺乏也加剧了问题的严重性,传统电工企业的人才结构断层、高端研发人员缺口达 37%。电气工程同物理、材料、信息、人工智能等众多领域存在交叉融合的现象,这就对人才培养提出了更高的要求,但是目前的课程体系滞后、学科融合不够、实践能力欠缺等状况比较普遍。

3 电气工程高质量发展的优化路径

3.1 构建源网荷储协同的新型电力系统规划与调度体系

应对新能源并网问题，关键就是创建起源网荷储协同的新电力系统。国家能源局 2025 年印发的《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025-2027 年）》从源网荷储各侧提出提高调节能力的要求，指导各地科学编制调节能力建设方案，统筹煤电灵活性改造、抽水蓄能、新型储能和电网侧、负荷侧等各类调节资源。在规划上要以新型电力系统建设为重心，谋划好“十五五”电力发展的蓝图，协调好源网荷储各方面的关系，科学地推进一批重大战略任务、重大工程项目和重大改革举措。在调度上要创建新一代电力调度技术支持系统，把数字技术同电力技术融合创新起来，“电力+算力”深度融合，涵盖源网荷储各个环节，发输变配用全过程。同时要推进构网型储能等设备在新能源富集地区进行规划布局，加快全国统一电力市场的建设。新型电力系统调控方式正在由原来的“源网荷储分开控制”向现在的“源网荷储相互影响”转变，要达到从“源随荷动”到“源网荷储互动”的根本性改变。

3.2 加快高端电气装备国产化替代与工业软件技术攻关

破解核心装备、软件“卡脖子”困境，必须从整体上推进国产替代和技术创新。从器件上来说，应该集中力量攻克高压 IGBT 芯片、高端轴承、控制系统等关键部件的技术难关，推进碳化硅基混合技术的发展，提高全球化的标准认证水平。从装备上来说，依靠特高压直流输电等重大工程带动产业链协同创新，推进柔性直流输电、构网型逆变器等核心装备的国产化^[3]。工业软件方面要加大自主研发力度，重点攻克风电机组整机设计仿真、有限元分析等“从 0 到 1”的商用软件研发。从政策上要加快公共测试平台的建设，促使国产部件在招标中优先使用。高铁 IGBT 模块从进口到完全自主化的成功经验说明，经过不

断的积累和技术验证，完全可以达到核心器件的自主可控。

3.3 推进电气系统全生命周期数据治理与智能化平台建设

破解数据融合的障碍，要从标准、技术、平台这三个方面一起努力。从标准上来说要加快制定电力行业数据分类分级标准以及接口规范，准确识别能源行业重要数据、核心数据，加强数据管理与安全防护。从技术上来说，要加快物联网、大数据分析和人工智能等技术的应用，实现设备全生命周期数据的贯通以及智能决策的支持。从平台角度来讲，创建统一的电力数据中台以及数字孪生底座，塑造“数据融合-智能诊断-决策改良”全流程数字化管理架构。数字孪生技术已经在电网领域取得了一些阶段性的成果，用高精度数字孪生模型可以对电网运行状态进行全方位的感知、精确地映射。未来还要继续推进数字孪生和生成式人工智能的协同创新发展，持续提升电力系统智能化程度。

3.4 健全主动防御安全体系与跨学科复合型人才培育机制

应对网络安全风险和人才短缺双方面的问题，要技术与人才并重。在安全防护上要加强全方位的网络安全管理，加强关键信息基础设施的安全保护，提高网络安全态势感知、预警和应急处置能力。电力系统仿真推演基础设施的创建成了检验并加强电力系统网络安全防护能力的关键途径。加强安全接入区的防护要求，确定安全接入区加密认证、安全监测等技术要求。在人才培养上要注重学科交叉融合，促进电气工程同物理、材料、信息、人工智能等各方面的协同创新，造就具有跨学科背景的复合型人才。应加强实践教学环节，创建高水平实践基地，促使学生投身科研和工程实践当中去，从而提高学生解决实际问题的能力。创建创新创业育人平台，健全课程体系，加强校企合作，使创新创业理念同产学研教育相融合。表 1 系统梳理了上述核心问题与优化路径的对应关系。

表 1 电气工程核心问题与优化路径对照表

面临的主要问题（第 2 章）	对应的优化路径（第 3 章）	核心实施要点
2.1 新能源并网消纳与系统稳定性挑战	3.1 构建源网荷储协同的新型电力系统规划与调度体系	统筹煤电灵活性改造、抽水蓄能、新型储能等调节资源，建设新一代智能调度系统
2.2 核心装备与基础软件自主化不足	3.2 加快高端电气装备国产替代与工业软件技术攻关	突破高压 IGBT 芯片、高端轴承等关键部件，自主研发设计仿真软件
2.3 数据异构与融合障碍	3.3 推进全生命周期数据治理与智能化平台建设	统一数据标准，建设电力数据中台与数字孪生底座
2.4 网络安全风险与人才能力短板	3.4 健全主动防御安全体系与跨学科复合型人才培育机制	强化安全态势感知与应急能力，推动多学科交叉融合培养

4 电气工程未来应用趋势展望

展望未来电气工程领域会有四个主要的发展趋势。第一,人工智能大模型会推动新型电力系统智能运维的智能化发展。人工智能赋能能源核心技术会有很大的发展。人工智能在电力领域所起的作用包括供电保障和电力市场运行两个方面,可以提高系统的灵活性,也可以提高调度的智能化水平。第二,虚拟电厂和分布式能源市场化交易会加快协同发展的速度。据预测,2025 年中国虚拟电厂市场规模将达到 102 亿元,2030 年将达到千亿元。到 2030 年虚拟电厂的使用场景会越来越广,各种商业模式不断涌现,全国虚拟电厂调节能力将达到 5000 万 kW 以上。第三,多能互补、电-碳协同将使绿色低碳转型不断深入^[4]。到 2035 年,新型电力系统基本建成,那时电能占终端能源消费的比重将达到 38%。第四,空天地一体化监测、数字孪生会助力智慧电网创建。数字孪生技术的建模周期缩减了 40%在电网全过程感知和精确调节方面也得以实现更加广泛的使用。

5 结语

电气工程正处在能源转型和数字革命相互交汇的节点上。“十五五”时期,是新型电力系统建设承上启下的攻坚时期、攻坚时期。新能源并网消纳、核心装备自主化、

数据融合治理、网络安全防护、复合型人才短缺等多重挑战之下,必须依靠技术创新和体制机制改革双轮驱动。创建源网荷储协同的新型电力系统,加快关键装备国产替代,推进全生命周期数据治理,健全主动防御安全体系和人才培养机制,电气工程将在保证能源安全、推动绿色低碳转型方面起到更加重要的作用。伴随着人工智能、数字孪生、虚拟电厂等新技术的不断深入到电气工程中,电气工程也向更加智能、更加环保、更加高效的方面发展。这不是简单的取舍,而应该用系统性的变革来达到动态平衡。

[参考文献]

- [1]姜海峰.电气工程自动化控制中智能化关键技术及其应用分析[J].智能物联技术,2026,58(4):127-130.
- [2]李晓峰.电气工程及其自动化中虚拟现实技术的创新应用[J].现代工业经济和信息化,2026,16(3):145-147.
- [3]张永进.电力系统电气工程自动化的智能化应用[J].产品可靠性报告,2024(12):89-90.
- [4]史梅春.浅谈电气工程及其自动化施工关键技术[J].中国设备工程,2023(2):197-199.

作者简介:杨清亮(1984—),男,汉族,河北省武安市人,电气工程师,2022 年 6 月毕业于广东理工学院电气工程及其自动化专业,本科学历,现主要从事电气设计研发。