

# 新形势下新能源风力发电中的控制技术探究

杜敏

华电新能源集团股份有限公司山西分公司, 中国·山西 太原 030000

**摘要:** 在“双碳”目标引领与能源结构转型的新形势下, 风力发电作为新能源领域的核心构成, 高效稳定运行对控制技术提出了更高要求, 本文基于风力发电系统的能量转换机理, 系统梳理了风力发电控制技术的发展基础与核心架构; 探究了控制系统国产化进展与系统创新, 并提出了融合数字孪生、AI 自适应算法等解决路径, 以期提升风力发电系统的能源利用效率、稳定性及并网兼容性提供了理论参考与技术借鉴。

**关键词:** 新形势; 风力发电; 控制技术; 变速恒频; 智能化控制

## Exploration on Control Technologies in New Energy Wind Power Generation Under the New Situation

Du Min

Shanxi Branch of Huadian New Energy Group Co., Ltd., China Shanxi Taiyuan 030000

**Abstract:** Under the new situation guided by the "dual carbon" goals and the transformation of energy structure, wind power generation, as a core component in the new energy field, imposes higher requirements on control technologies for its efficient and stable operation. Based on the energy conversion mechanism of wind power generation systems, this paper systematically sorts out the development foundation and core architecture of wind power generation control technologies, explores the progress of localization and system innovation of control systems, and proposes solution paths integrating digital twins, AI adaptive algorithms, etc. It is intended to provide theoretical references and technical insights for improving the energy utilization efficiency, stability and grid-connection compatibility of wind power generation systems.

**Keywords:** New situation; Wind power generation; Control technology; Variable-speed constant-frequency; Intelligent control

## 0 引言

在全球能源转型和“双碳”目标推动下, 风力发电已成为能源结构调整的关键力量。根据《风能北京宣言 2.0》, 中国计划在“十五五”期间实现年新增风电装机不低于 1.2 亿千瓦, 到 2035 年累计装机容量不少于 20 亿千瓦。这一宏伟目标的提出, 标志着风电产业将进入规模化、市场化发展的新阶段。

随着风电装机容量的快速增长, 风电控制技术面临着前所未有的挑战与机遇, 一方面, 国家发改委、国家能源局印发的《关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的通知》, 推动新能源上网电价全面由市场形成, 使风电项目经营收益模式发生根本性转变。另一方面, 风机大型化、复杂化以及海上风电的规模化开发, 对风电控制技术提出了更高要求。传统控制方法已难以满足

新形势下风电高效、稳定、智能化运行的需求。

在此背景下, 风电控制技术正经历从单一机组控制向风电场协同优化转变, 从传统控制策略向人工智能算法赋能演进, 从依赖进口技术向自主可控系统发展, 构成了当前风电控制技术创新的主要方向, 特别是自适应控制策略、人工智能算法与国产控制平台的深度融合, 正成为提升风电竞争力、应对市场化改革的关键路径。

## 1 风力发电控制技术的发展基础与核心架构

### 1.1 控制技术的发展演进历程

风力发电控制技术的发展与风机技术迭代同步, 大致可分为三个阶段: 第一阶段为 20 世纪 80 年代至 21 世纪初的定速定频时代, 采用定桨距、恒速异步发电机结构, 控制技术以简单的启停控制和过载保护为主, 风能利用系数较低, 仅能在额定风速附近实现稳定运行; 第二阶段为 21

世纪初至 2015 年的变速恒频时代, 变桨距技术与双馈感应发电机的结合成为主流, 通过转子侧变流器调节实现宽风速范围内的转速控制, 风能利用效率提升 15%–20%, 控制技术进入闭环反馈控制阶段; 第三阶段为 2015 年至今的智能化协同时代, 随着直驱永磁发电机、大数据监测等技术的应用, 控制技术从单机控制向风场集群协同控制演进, 融合 AI 算法实现预测性控制与故障预警, 进一步提升了系统运行效能<sup>[1]</sup>。

## 1.2 控制技术的核心架构与功能需求

感知层通过风速传感器、转速传感器、功率传感器等设备, 实时采集风况参数、机组运行状态及电网参数, 为控制决策提供数据支撑; 决策层基于预设控制策略与实时数据, 通过控制器实现转速调节、功率控制、并网协调等核心功能; 执行层由变桨机构、变流器、偏航装置等执行部件构成, 将控制指令转化为实际运行动作。

新形势下, 控制系统的功能需求呈现多维度拓展, 从能量捕获角度, 需实现宽风速范围内的最大功率追踪 (MPPT), 提升低风速地区的发电效率; 从运行安全角度, 需具备极端风况下的载荷控制能力, 降低台风、阵风对机组的冲击; 从并网适配角度, 需满足电网对无功功率调节、低电压穿越的刚性要求; 从运维管理角度, 需融合状态监测与故障诊断功能, 支撑“无人值守”风场运营模式。

# 2 风电控制的智能化变革与关键技术

## 2.1 人工智能算法的深度融合

人工智能技术正深刻改变着风电控制的传统模式, 使风机从执行预设规则的“自动化设备”升级为具备自主决策能力的“智能体”。在风电控制领域, AI 算法的应用已渗透到预测、决策与优化等各个环节, 显著提升了系统应对不确定性的能力。远景能源推出的“物理人工智能”产品矩阵集成了自主研发的“天机”气象大模型和“天枢”能源大模型, 能够实现分钟级、20 米精度的气象预测, 并具备百亿级运算能力, 覆盖感知、决策、调度全流程。这套系统通过处理声音、视频、雷达、热力等多维度传感信息, 实现风机运行的智能化升级, 据称可使风电场收益提升 20% 以上。这类 AI 系统的核心价值在于将传统基于历史数据的静态控制策略, 升级为基于实时预测的动态优化策略, 从而大幅提升风电场在市场环境中的竞争力。此外, 机器学习算法在风电控制中的另一重要应用领域是自适应优化。基于强化学习的控制策略能够通过环境的持续交互, 不断调整控制参数, 使系统适应变化的运行条件。这

种自适应能力在风机性能衰减、环境变化等场景中尤为重要, 可有效维持风机在全生命周期的性能水平<sup>[2]</sup>。

## 2.2 数字孪生与虚拟仿真技术

通过构建风机的高保真虚拟模型, 并借助实时数据驱动, 数字孪生实现了从风机结构到性能的全景级可视化与智能化管理。国能智深的数字孪生技术平台集成了螺栓预紧力监测、塔筒倾斜监测、传动链振动监测、叶片健康评估及运行能效分析等功能模块, 形成完整的数字孪生体。该平台依托多源传感、边缘计算与 AI 算法, 可实时识别异常、预测故障趋势, 动态优化风机运行策略。这种基于数字孪生的预测性维护策略, 可将传统定期维护转变为按需维护, 显著降低运维成本, 提高设备可利用率。在风电控制器开发阶段, 实时数字仿真 (RTDS) 与硬件在环 (HIL) 虚拟测试环境提供了安全、经济的验证平台。研究人员可在虚拟环境中模拟各种运行工况与控制策略, 加速控制算法优化与验证流程, 降低实地测试成本与风险<sup>[3]</sup>。

## 2.3 全栈国产化控制系统创新

近年来, 我国在风电控制系统的自主可控方面取得了突破性进展, 实现了从核心硬件到软件平台的全面创新, 龙源电力自主研发的风电行业首套全栈式国产控制系统, 在主控、变桨、变流三大核心控制领域均实现突破。该系统搭载国产化控制器件, 其控制策略、中间件、通讯接口程序全部基于国产编程平台设计开发, 具有 100% 自主知识产权, 兼具高频通信、逻辑可视、参数可调、一体集成等技术优势。这类系统不仅打破了国外技术垄断, 而且通过优化配置参数与消除信息孤岛, 提升了整体电网支撑性能。

# 3 控制系统国产化进展与系统创新

## 3.1 硬件层国产化突破

风电控制系统的硬件国产化主要集中在主控 PLC、变桨系统与变流器等核心部件, 例如, 龙源电力通过攻克国产 PLC 控制器整体技术水平落后、国产组态编程软件功能缺失、进口变桨及变流控制系统故障率高等难题, 成功研制出行业首套全栈式风电机组控制系统。该系统采用国产化控制器件, 满足新型电力系统的涉网性能要求, 可有效解决控制系统信息孤岛、配置参数不合理、电网支撑性差等问题。在大型风机主控系统方面, 国能智深联合三一重能实现了 10MW 陆上风机主控国产化的突破。该系统的成功应用不仅填补了大兆瓦风机主控国产化空白, 更重要的是解决了芯片与操作系统兼容性、极端环境适应性等“卡脖子”问题。这种高可靠性系统在极端环境下的稳定表

现,为风电在复杂地理条件下的规模化开发提供了技术保障<sup>[4]</sup>。

### 3.2 软件层与平台层创新

风电控制系统的软件层创新主要集中在编程平台、控制算法与组态软件等方面,控制算法是软件层的核心,国产化进程中重点发展了自适应控制算法与智能运维算法两大方向。自适应控制算法通过实时感知风机运行状态与环境参数,动态调整控制参数,确保机组在不同工况下的最优性能。智能运维算法则基于设备运行数据,构建故障预测与健康模型,实现从定期维护到预测性维护的转变。在算法验证方面,建立了完善的软件在环与硬件在环测试体系,通过大量仿真与实测数据对比,持续优化算法性能与可靠性。

### 3.3 标准化与产业化路径

风电控制系统国产化的可持续发展,离不开标准化体系与产业化路径的支撑,在标准化方面,IEC61850 和 IEC61400-25 等国际标准为厂商无关的协调提供了通信基础,然而,这些标准目前主要应用于监控和保护领域,在整体自适应运行方面的应用仍有待拓展。在产业化方面,风电控制国产化已形成可复制的推广路径,建立从芯片、元器件到整机系统的垂直整合机制,通过上下游企业深度合作,共同攻克技术瓶颈。这种协同机制有效降低了研发成本,加速了产品迭代,形成了具有竞争力的产业链条。

## 4 风力发电控制技术应用瓶颈与突破路径

### 4.1 主要应用瓶颈

复杂极端工况的控制适配能力不足是当前最突出的瓶颈。我国风电开发已向西北戈壁、东南沿海等极端环境延伸,极端低温、强台风等工况对控制技术提出更高要求,传统控制策略基于常规工况设计,在极端工况下易出现控制失准;多目标控制协同性不足问题日益凸显,风力发电系统需同时满足风能捕获效率、载荷控制、并网稳定性等多重目标,现有控制技术多采用权重分配方式实现多目标平衡,难以在动态工况下实现全局最优,如在风速突变时,为保证功率稳定往往牺牲载荷控制效果;核心器件与算法的自主化程度有待提升,高端变频器核心芯片、AI 控制核心算法等仍依赖进口,不仅增加了控制成本,还存在技术“卡脖子”风险,如某进口变频器的控制模块故障导致风场停机 3 天,造成重大经济损失<sup>[5]</sup>。

### 4.2 技术突破路径

在算法创新层面,重点发展多目标自适应优化算法,基于强化学习理论,构建能够自主学习不同工况下目标优

先级的控制模型,实现风能捕获、载荷控制、并网适配的动态协同优化,目前该方向的实验室研究已实现极端工况下控制精度提升 15% 的效果;在核心器件层面,加快高端控制器件的国产化研发,联合芯片设计企业开发适用于风电控制的专用 MCU 芯片,提升变频器、控制器等核心部件的自主化率,同时研发高精度传感器,如基于 MEMS 技术的微型风速传感器,降低对进口器件的依赖;在系统集成层面,构建“感知-决策-执行”一体化智能控制平台,融合激光雷达、卫星遥感等多源感知技术,结合边缘计算与云计算,实现单机控制与风场集群控制的深度协同,风电控制的未来发展将更加注重与多元能源系统的深度融合,单一风电项目的发展已接近天花板,仅靠“发电上网”的传统模式难以为继,必须拥抱综合能源解决方案,此外,还需加强产业协同与标准建设,建立风电控制技术产学研用合作机制,推动实验室技术向工程化转化;制定智能化控制、海上风电控制等新兴技术的行业标准,规范技术应用场景与考核指标,为技术创新提供制度保障。

## 5 结语

新形势下,风力发电控制技术正经历从传统闭环控制向智能化协同控制的转型,变桨距、变速恒频等核心技术通过算法优化实现性能跃升,AI、数字孪生等新技术的融合应用推动了控制技术的创新突破,有效提升了风力发电系统的风能利用效率、运行稳定性及并网兼容性。

同时,研究发现当前控制技术仍面临复杂极端工况适配不足、多目标协同性欠缺、核心器件自主化率低等瓶颈,需通过多目标自适应算法研发、高端器件国产化、一体化系统集成等路径实现突破。未来,随着新能源技术与数字技术的深度融合,风力发电控制技术将呈现三大发展趋势:一是控制精度的极致化,基于量子计算与超算的控制算法将实现纳秒级响应;二是控制范围的全域化,从单机控制延伸至“风-光-储-网”多能协同控制;三是控制模式的自主化,具备自学习、自诊断、自修复能力的智能控制系统将成为主流。

风力发电控制技术的创新发展,不仅是提升风电产业竞争力的核心抓手,更是推动我国能源结构转型、实现“双碳”目标的关键支撑。未来需持续加强技术研发与工程实践,突破核心技术瓶颈,构建自主可控的控制技术体系,为全球新能源产业发展提供中国方案。

### 参考文献:

[1] 宋娟. 飞轮储能控制技术在新能源风力发电系统中的应用[J]. 储能科学与技术, 2025,14(09):3431-3433.

[2] 刘轩. 新能源风力发电中的控制技术分析[J]. 集成电路应用, 2023,40(12):260-261.

[3] 邓民炜. 新能源风力发电中的控制技术分析[J]. 集成电路应用, 2023,40(03):350-351.

[4] 陈文静. 新能源风力发电系统中自适应控制技术的应用及未来前景[J]. 电子测试, 2022,(16):104-106.

[5] 鲁民, 李冰皓. 新能源风力发电系统中自适应控制技术的应用及未来前景探讨[J]. 时代农机, 2020,47(06):81-82+84.

作者简介: 杜敏(1988-), 女, 汉族, 山西大同, 中级工程师, 本科, 研究方向: 新能源。