

双碳目标下智慧风场建设的几点思考

张文忠 汪 锋 李海港
(华锐风电科技(集团)股份有限公司)

摘要：介绍了双碳目标下智慧风场建设的目标、总体原则、总体框架和具体建设内容。

关键词：智慧风场建设；三大协同技术；集群控制技术

0 引言

随着风电行业的不断发展进步，风电技术的不断迭代升级，现有的风电场管理技术和工具已经不能满足新型电力系统和规模化风电发展的需要。双碳目标的实现需要规模化新能源电站的建设，与此同时，也催生了新一代智慧风场的建设、发展和升级。

1 目标与挑战

1.1 目标

智慧风场包含多重要素，其建设需要充分考虑“风、机、场、网、环”等方方面面的因素，主要包括以下五个方面。

1) 风能利用：通过激光测风、功率预测、先进控制、场群控制技术等技术识别不同的载荷工况，实现超前感知和优化控制，提高风电场的发电量和智能化水平。

2) 智能风机：对风机安全度、可靠度和健康度进行评估和管理。开展缺陷识别、预警、诊断及容错控制，制定基于健康度的检修辅助决策。

3) 智慧风场管理：通过精细化管理、信息资源

共享和优化管控实现降本增效。利用大数据、人工智能技术、无人机及辅助机器人，提高风电场的运营管理水平，实现少人值守。

4) 电网友好：实现有功调节和调频惯量，无功调节和电压控制。开展构网电压源型等新型智能技术研究，构建以新能源为主体的新型电力系统。

5) 电力市场：通过高精度功率预测，增强现货市场决策能力。研究适应电力市场的风储资源联合优化调度技术；提供新型储能共享及辅助服务等。

1.2 挑战

智慧风场建设同样也面临着诸多挑战。风电行业、风机制造和风电场运营等不同层面上，都存在很多的问题亟须通过技术革新、产业转型和行业自律等逐步解决和完善。

1) 风电场建设成本：行业的低价无序竞争导致了参与者在智慧风场的建设上投入较少。

2) 数据共享：风机、风场和集控的不同系统之间通讯协议不一致、接口开放难度大，难以实现互联互通。

3) 配储系统的价值：风电项目强制配储在支撑

电网、改善出力的系统价值未得到充分体现。

4) 算法和模型的有效性：各类优化算法及诊断预警模型在实际应用过程中的有效性有待提高。

5) 全生命周期建设：目前的智慧风场建设主要集中在风场项目的生产建设期，缺乏和风机设计、配置环节的有效衔接。

2 总体原则和框架

2.1 总体原则

智慧风场建设是一项庞大的系统工程，需要遵循科学有效的方法。围绕智慧风场建设的目标，智慧风场建设的总体原则应包括“系统工程、循序渐进、因地制宜、以人为本”四个方面，具体如下表所示。

表 智慧风场建设总体原则

系统工程	循序渐进	因地制宜	以人为本
全生命周期： 贯穿规划、开发、设计、建设、运营及退役的全过程	产业发展： 产业发展和新型电力系统带来新的需求	实用为先： 应用价值工程，效用最优，兼顾投入产出	降低风险： 识别、预判危险源，改善作业环境、作业方式及运维工况
全链条电力系统： 覆盖发电、集电、变电及附属系统	技术进步： 新材料、新工艺、“跨界”技术带来新解决方案	纵向联动： 集团、区域公司和现场分工明确，相互配合	智能运维： 机器辅助及专家指导提升智能运维等级
全流程经营管理： 综合静、动态投资，运营成本，风场效益	科学规划： 识别挑战源，合理规划总体目标和阶段性任务	因场施策： 性能和功能设计符合项目特点	提升能力： 通过培训和实操提升人员能力水平
全生产要素： 在时间、空间、人员要素上无死角	不断完善： 预留设计接口，在建设中总结、创新，久久为功	适度调整： 结合产业和技术新要求和新变化适度优化	促进创新： 提倡“创新工作室”模式，促进发明

2.2 总体框架

智慧风场建设的总体框架，包括三个协同和六个专项。

“三个协同”是指风机安全要素的协同、监测方式的协同、专项平台的协同，分别从整机安全设计及运行管理、在线及离线传感技术应用和多层次平台融合等维度阐述系统发展的价值与意义。

“六个专项”是指风机智能控制技术、集控控制技术、数字孪生技术、AI和人工智能技术、无人化技术以及典型特征场景的智能运维等。从风机控制和风场管理，再到智能运维，全面介绍了智慧风场建设的关键技术和研究重点。

(1) 风机的安全设计

如图 1 所示，安全是风机运行的首要条件，风机的安全设计是风机设计中最重要的一环，传统的风机安全设计主要遵循高本体安全裕度的设计原则，设计裕量较大，风机重量较高，如基于设计导则，设计软件及包络边界开展基础设计，结合极限、疲劳载荷评估提高生产工艺裕度，提升机组在各种工况下的安全运行能力等。



图 1

3 建设内容

3.1 三大协同技术

随着智能传感技术、信息技术和控制技术的不断发展和跨界融合，风机安全设计正从高本体安全裕度设计向精准的检测保护设计方向发展，主要体现在：

- 1) 智能传感器：通过净空监测、螺栓监测、软传感器技术建立智能传感器网络，实现全方位安全监测。
- 2) 风机设计优化：开展精细化的风资源评估和选址、更加科学的材料特性分析、精细化载荷计算，应用独立变桨、激光测风等载荷优化控制算法。
- 3) 安全保护控制算法：应用基于超感知的安全保护算法，如净空保护，结冰监测及保护等，基于前馈测风的极限工况避让策略，以及风机容错控制等。

(2) 风机检测方案的选择

风电场传感器类型较多，为了实现风机的智能控制、检测保护等目标，需要合理选择传感器，在线传感器（见图 2）和离线传感器（见图 3）各有应用场景，随着技术进步、成本下降和智能化需求的增加，在线、智能传感器的比例在不断上升。



图 2 图 3

(3) 专项平台间的协同及融合

随着对风场风机各类专项指标的细化，不同功能的监控平台也应运而生，这些平台多数由不同时期的不同厂商提供，虽然对专项信息相关内容显示颇多，但对其他的风场关注信息显示不足，运维人员需操作多个平台才能完成目标任务，耗时费力、操作错误率高。

建立风电场智慧管控平台，可以有效地提升风电

场的管理效率、集约运维人力资源、提升设备运行水平、提高整体发电效率，主要包括：

- 1) 将风机现场的各种设备运行数据、现场环境状态、视频监控信息等在统一的平台上实现集中管理、监控，帮助运维人员对问题进行快速响应。
- 2) 辅以移动化的作业终端等手段，实现现场与控制中心的实时、直观的互动。

3.2 六个专项技术

(1) 风机智能控制技术

风机智能控制技术是实现载荷优化、风机可靠性提升和发电性能优化的核心方法。以风机建模、高精度模式识别为基础，结合部件设计和工艺，整机集成设计及工艺，实现激光前馈控制、独立变桨等先进控制算法。

智能控制技术由超感知技术、前馈控制技术、基于模型的控制技术以及容错控制技术 ETS 等组成，如激光前馈技术、独立变桨技术的应用能够有效降低机组的极限和疲劳载荷；容错控制技术及模糊控制技术能够有效提升风机发电性能。

(2) 集控控制技术

如图 4 所示，风电场集群控制技术和风机智能控制技术相互依存，协同发展。集群控制技术可以从风电场整体布局、综合寻优的角度降低机组的运行载荷和风险，提高风电场发电量和经济效益，实现风电场智能管理和高效运维。



图 4

通过抗涡激策略，虚拟测风技术和集群运行数据对比分析，识别安全隐患、预警风险，可以降低机组极限载荷冲击，保障机组运行安全。

通过将风功率预测及 CFD 技术用于机组的超前控制，风机偏航变桨误差分析，不同风场特性下的运行参数优化等技术提升机组控制精度和发电量。

通过开展风机健康度量化分析，并基于健康度优化风电场能量分配策略、风电场智能运维方式，以及基于功率预测的风电场计划进行派单，提高风电场智能管理水平，实现高效运维。

(3) 数字孪生技术的价值挖掘

数字孪生技术是融合大数据、机理特性、信息技术于一体的新型管理优化方法，充分挖掘数字孪生的技术的价值，可以为智慧风场的建设提供新的思路 and 方案，数字孪生可应用于：

- 1) 数字孪生技术应用于风机控制过程的故障预警、建模和容错控制；
- 2) 数字孪生技术应用风机故障诊断和剩余寿命预测；
- 3) 提供 3D 人机交互解决方案。
- (4) AI 技术赋能智能风电场

人工智能技术的跨界应用，将助力智慧风电场的建设，主要体现在以下三个方面：

- 1) 提升风机的智能感知及数据综合利用，如图像识别、特征提取、数据建模及功率预测等；
- 2) 提升风电场可靠性及运维管理水平，风电机组的故障预警、诊断及寿命管理等；
- 3) 实现风电场提质增效，模式识别、边缘控制和风机控制系统优化等。

在 AI 技术的应用较多，包括螺栓图像识别及建设、风机智能感知、模式识别及边缘计算、风机模糊控制和自适应控制、大数据挖掘和建模、故障处理专家系统建设等。

(5) 无人化技术的应用

机器人辅助在风机及升压站维护、管理上将发挥着越来越重要的作用，主要体现在机器人巡检、机器人维护和机器人消缺三个方面，具体来说：

- 1) 叶片、线路的无人机巡检及图像识别；
- 2) 在风机内，主要采用微距或轨道机器人的方式进行巡检。
- 3) 在升压站内，行走机器人在拍照识别、测温、抄表等方面应用较多。
- 4) 在机器人维护上，对于塔筒清洗、叶片清洗、塔筒螺栓力矩维护等方面已经实现了自动化工作。
- 5) 在机器人消缺方面，由于消缺的难度较大，目前可以实现专家库的搭建工作，以专家系统指导人开展消缺工作。

(6) 典型特征场景智慧运维能力的强化

随着产业的不断发展以及国家规划，沙戈荒大基地及海上大基地建设是新增风电装机的主要组成部分，以海上风电场为例，由于出海条件制约，设备维护难度大，传统的故障诊断能力不足以支撑运维成本的降低，是海上风电产业依然面临的主要问题之一。主要体现在：

- 1) 机组运行、故障数据的匮乏等原因影响了远程诊断和预警水平的提高。
- 2) 海况的不确定性常引起连续停机，而海上交通很不便利，加之恶劣条件影响，导致维护作业有效时间短、效率低。

通过应用新技术和新的管理工具能够有效强化海上风电场的运维能力，主要包括：

- 1) 提高风机的容错能力，降低登记运维的频次。
- 2) 提高风机的预警能力，提前规避风险点，减少风机故障停机时间。
- 3) 提高风机的故障诊断能力，配合专家库提升运维效率。

4 总结和展望

双碳目标、能源革命和新型电力系统对于新能源场站建设提出了更多的需求，分散式风电、沙戈荒、深远海等不同的应用场景对智能运维提出了新的挑战，新型电力电子，储能、氢能等新型产业融合对风电场并网运行和电力消纳提出了新的要求，因此，双碳目标下的智慧风电场的建设是风电产业发展的必然趋势，也存在诸多需要解决的挑战和问题，如高比例新能源接入电力系统的调节、大功率机组的控制、深

远海风电场的运维等。

未来，随着智能传感、人工智能等技术的不断发展和应用，智慧风电场将会迎来更加广阔的发展空间和前景；通过产业的深度研究及跨界技术引进和融合，未来智慧风电场的建设将会更加智能化、数字化和可持续发展，在风机多层智能控制、集群控制、基于大数据的应用、机器替人和无人值守、两个“一体化”上将取得更多的创新和突破。

(收稿日期：2023-10-07)