

智慧风电体系架构研究

吴智泉¹, 王政霞^{1,2}

(1. 中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司, 北京 石景山 100040;

2. 重庆交通大学信息科学与工程学院, 重庆 南岸 400074)

摘要: 随着人工智能等相关技术的迅猛发展, 国内外各发电公司都在推进智慧风电工程, 提高风电企业的核心竞争力。针对目前风电的基本特征与智能化水平现状, 以异构计算为基础, 采用弹性资源配置策略, 从风电生产管理和信息系统两个维度对智慧风电的体系架构进行探索和研究; 并通过分析关键技术阐述其开放性、学习性、成长性、异构性和友好性的基本特征, 进一步解析了智慧风电系统具备精准感知、快速应对、系统思维和全面开放的不同智慧层级。

关键词: 智慧风电; 体系架构; 智能感知; 弹性计算; 资源配置

Smart Wind Power System Architecture

WU Zhiquan¹, WANG Zhengxia^{1,2}

(1. China Datang Corporation Renewable Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shijingshan District, Beijing 100040, China;

2. Department of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Nan'an District, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: With the rapid development of artificial intelligence and other related technologies, domestic and foreign power generation enterprises are promoting smart power project to improve the core competitiveness. Aiming at the current the basic characteristics and intelligence level of wind power, based on heterogeneous computing and elastic resource configurations, this paper explores and studies the architecture of smart wind power from two dimensions of wind power production management and information system, and expounds its basic characteristics of openness, learning, growth, heterogeneity and friendliness by analyzing key technologies. Then we further analyze different levels of intelligence for the smart wind power system, such as accurate perception, rapid response, systematic thinking and comprehensive opening.

KEY WORDS: smart wind power; system architecture; intelligence sense; elastic computing; resource configurations

0 引言

随着能源行业智能化的长足发展和深度融合的推进, 智慧能源系统日益成为发展的共识。由于风电的单机系统相对简单, 自动化、信息化程度高, 场群分散, 智能远控需求强等特点, 必然是智慧能源的先行者。智慧不是智能的简单升级, 而是要充分展现“类人”的思维模式、价值判断和相机决策。因此, 智慧风电的概念需要进一步明晰, 其体系架构要能满足功能的实现。同时, 研究智慧风电的实现不能离开当前信息化发展水平的现状, 数据的获取、存储、通信和安全等是必须充分考虑的因素。

1 国内外研究现状及面临的挑战

在过去的10多年里, 大多数成熟的工业都经历了一场数字化革命, 风电行业也不例外, 从之前工业化和信息化“两化融合”, 到后来的互联网化、智能化, 数字化的内核精髓已经并将继续影响着风电产业的成长轨迹。风电运营商与周边电网生态系统之间的传感器数据收集和高质量数据传输的频率显著增加, 这些数据将打开产能的新视野, 让行业充分认识到其巨大的潜力。数字化将为风电运营商创造新的经济机会, 创新的数字智能技术还将提高风力发电机产量和生产力, 同时降低设计、运营和维护成本, 从而降低能源成本。美国通用电气

公司(GE)发电与水处理集团总裁兼首席执行官史蒂夫·伯兹表示:“更智慧的数字技术正在推动各行各业的转型,潜力最大的可以说是能源行业。现在问题的关键不在于是否要开始转型,而是要如何充分发挥数字化转型的潜力”。基于数字化转型基础上的智慧风电已引起广泛的关注和研究兴趣。

美国国家可再生能源实验室(NREL)在美国能源署风能技术办公室的大气与电力(A2e)应用研究规划的支持下,提出了“技术支撑下的大气资源系统管理(system management of atmospheric resource through technology)”战略,简称 SMART 战略^[1]。该战略以下一代智能化新技术为支撑,以在风电场设计和运行中实现更高的发电量和材料使用效率、更低的运行维护费用和投资风险、更长的风电场寿命、更强的电网协调能力为目标,建成实时响应大气变化并且提供电网支撑的未来集成化风电场系统,达成 SMART 战略后期望能够降低 50% 的度电成本^[2]。欧洲风能学会(EAWE)联合欧洲 14 国的重要风电研究高校与机构,在《Wind Energy Science》期刊创刊首篇文章中讨论了未来风电领域长期的研究挑战,从 11 个不同的研究领域阐述了当前风电的技术前沿以及技术局限,并进一步提出未来风电发展应优先解决的问题^[3]。GE 公司于 2015 年启动数字化风电场战略,是一个综合性软硬件解决方案,是 GE 扩展服务协议的一部分。GE 数字化风电场的核心在于建立风电机组数字化的模型,以自身长期数据积累上的优势,提供更多基于数据的优化服务,其重点在于基于大数据挖掘的服务应用^[4]。

国内的整机厂商也在一直孜孜以求,探索大数据、互联网和数字化技术如何为风机和风场赋能。远景能源有限公司在国内较早提出智慧风电场概念,主推“智慧风场全生命周期管理系统”,目前进一步延伸为智慧物联网系统。基于全球最大的能源物联网平台 EnOS 打造了“直连、安全、高精度、机器学习”的智慧电场软件解决方案,帮助运营商打造“少人、透明、预测维护、电网友好”的智慧电站^[5]。新疆金风科技股份有限公司的智慧运营系统 SOAMTM,整合了风电场运维过程中各个环节的数据,融入故障诊断、健康状态预警、功率精准预测、风机优化运行等专业技术,打造了强大的智慧运营软件平台。中国明阳风电集团有限公司在 2014 年完成了大数据平台的搭建,将控制策略与互联网技术、大数据、云存储前沿技术融合,进行风电场优化、定制化设计、资源评估、智能风场管理,推进无

人值守智慧风电场建设。明阳大数据中心实现“从气象预测,到风机健康状态监测预警,到风电场优化运行,再到风电场群的协同协调”。国电联合动力技术有限公司开发的新一代智慧风电场服务系统 UP-WindEYE 系统集成高速互联风电场实时通讯、卓越电网支撑技术、先进的能量管理功能、强大的数据采集和分析功能,精准的寿命评估、故障预警诊断等功能,为打造智慧风场提供全面解决方案。上海电气集团股份有限公司的“风云集控”系统在风电行业首创基于互联网技术的分布式数据处理技术,基于 ABC 技术(artificial intelligence + big data + cloud computing)高效利用数据监控资产,预测机组故障,通过预测性控制技术“预言”风机的运行,实现用户资产使用价值的最大化。

各风电运营商也在积极构建大数据平台,利用大数据和人工智能技术进行智能运维和故障预警,进行智慧电厂方面的探索,实现降本增效。如中国华能集团有限公司较早将工业物联网、大数据技术运用到电力生产和物料管理方面,科学指导检修,有效控制成本,优化生产过程。中国能源建设集团广东省电力设计院有限公司的智慧海上风电项目,通过设计海上风电场一体化监控系统、海上风电场智能运维管理系统和海上风电场智能巡检系统,挖掘海上风电场的运行规律和最佳运营模式^[6]。

当前国内外对智慧风电的研究,大多侧重于智能算法、智能运维等局部功能智能化,或仅关注如智慧风电的局部控制或故障诊断,只体现了某一部分的数字化、智能化。智慧风电的建设过程中虽然尝试使用了大量新技术,但无法代表电厂具有了“智慧”,距离智慧风电还有一定的距离,能充分利用人的智慧进行创新的智慧风电体系架构的研究迫在眉睫。

学界对智慧电厂整体概念和体系架构也展开了研究^[7-10]。在智慧电厂的基本概念方面,中国自动化学会发电自动化专业委员会于 2016 年发布的《智能电厂技术发展纲要》对智能电厂作如下定义:智能电厂是指在广泛采用现代数字信息处理和通信技术基础上,集成智能的传感与执行、控制和管理等技术,达到更安全、高效、环保运行,与智能电网相互协调的发电厂。现阶段讨论的智慧电厂的特点和架构,多是针对相对集中的火电、燃机和水电厂,而由于风电场的高度分散特性,这些智慧电厂的架构不能完全适用于风电,智慧风电建设仍然处于初级阶段,智慧风电建设的道路仍然任重道远。

综上所述,国内外围绕智慧电厂的理论研究和

实践工作逐步开展,许多科研单位和行业相关企业从不同层面展开了关键技术和产品的研究工作,针对智慧电厂的概念、内涵、框架结构等进行了广泛的探讨和分析^[8]。但总体来看,现阶段对智慧风电都没有一个准确而全面的描述,建设方向不明,缺乏整体规划和顶层思考,缺乏对发电过程智能化的整体研究,往往只是局部系统的智能化升级,缺乏多个子系统间的协同,对智慧风电技术的系统性研究与应用尚处于起步阶段。本文在总结智慧风电的概念及特点的基础上,全面对智慧风电的概念、体系架构、关键技术进行探索和研究,为智慧风电场的建设做一些有益的探索,让未来的风电场能更好地自我学习、适应和运行。

2 智慧风电的概念

智慧是一个哲学范畴,是由智力系统、知识系统、方法与技能系统、非智力系统等多个子系统构成的复杂体系所蕴含的能力,该能力表现为及时做出正确抉择,且具有较强的相对性。智慧风电是先进风力发电技术发展的产物,与数字化、信息化、智能化发展水平密切相关,具有更强的发现问题、分析问题、解决问题能力,具有更强的创新发展能力。

研究认为:未来的智慧风电以数字化、信息化、标准化为基础,以管控一体化、大数据、云平台、物联网为平台,以数字孪生技术为辅助,以计算资源的弹性配置为保障,以异构计算(包括计算能力、计算方法和计算层次)为核心任务,高效融合计算、存储和网络,通过“人-机-网-物”跨界融合,形成边缘+云端结合的全层次开放架构,实现不同层级的智慧,追求不断提升风电智能化水平(包括智能感知、智能运维、智能控制、智能决策)目标,完成更加友好和安全、高效、可靠的能源供应^[11]。

智慧风电具有学习性、成长性、开放性、异构性、友好性等基本特征。智慧风电体系从感知层到决策层,在数据的全生命周期过程中,一方面不同层级的计算能力和侧重点不同,而每层随着系统的演化,持续自我学习,有所侧重地提升,具备自我成长性。下层对上层提供该层任务内容计算处理后的数据支撑,上层在此基础上完成更加综合的数据计算和处理,并对下层予以指导、指挥、协调、完善,构成一个不断自我成长完善的生态系统。智慧风电体系每层提供标准化、模型化的开放接口,避免了封闭、孤立,受特定标准的限制,通过“人-机-网-

物”跨界融合,实现架构的全层次开放。智慧风电需要构建融合不同计算架构的多元异构智慧风电体系架构,研究解决新能源大数据应用的技术瓶颈,实现多种智能技术在风电行业的集成应用。同时,智慧风电系统要实现与自然环境、生态环境、人文环境、电网环境的高度融合,必须是环境友好的,其内部的交互性也必然是友好的^[12]。

3 智慧风电的体系架构

在一定意义上,每一个风电场都相当于一个小型电网,是地理位置较广、具有一定规模的网络结构,且控制手段复杂多样^[13]。构建智慧风电,离不开对广域分布的“小型电网”的智能化及其与骨干电网智能交互的研究。智慧风电架构可从以下2个维度展开研究:

1) 智慧风电的生产管理维度。分为:①风机级,也就是要有自我调节、自我保护,对重大故障直接反应等基本功能的智能风机;②场站级,也就是基于智能电网技术,能自主控制、自主优化,具有对环境(包括风资源、电网)的快速反应能力;③集控级,要求全面分析、全面统筹,对所属场站智能化管理,实现智能运维;④集团化管控级的任务是实现智慧发展,要求持续学习、持续优化,分类指导风电智慧化发展。

2) 智慧风电的信息系统维度,分为基础设施级(硬件基础)、支撑平台级(软件基础架构)、应用平台级(建设目标的各类应用)3个部分。

对上述2个维度的有机融合是智慧风电建设的基本要求,其体系架构如图1所示。

智慧风电体系架构高效融合计算、存储和网络,以多元异构计算为基础来构建,形成边缘+云端结合的智能架构,不同层级的计算能力和侧重点不同,整个体系结构的不同层次引入不同计算能力使之更加高效、实时地处理数据,使风电系统达到不同层级的智慧,如图2所示。

智慧风电体系结构的最高层在集团或更高级别云平台,所有数据处理结果汇聚到集团云平台,辅助决策分析。边缘计算近设备端,云计算构建在云平台之上,因此各风电机组数据在风场端融合汇聚后,到集团云平台之前,各风场数据仍需在区域级汇聚利用雾计算融合处理,减少网络传输的压力。

智慧风电体系架构应具备计算资源弹性配置的能力,以满足不同需求。体系架构从场站侧的边

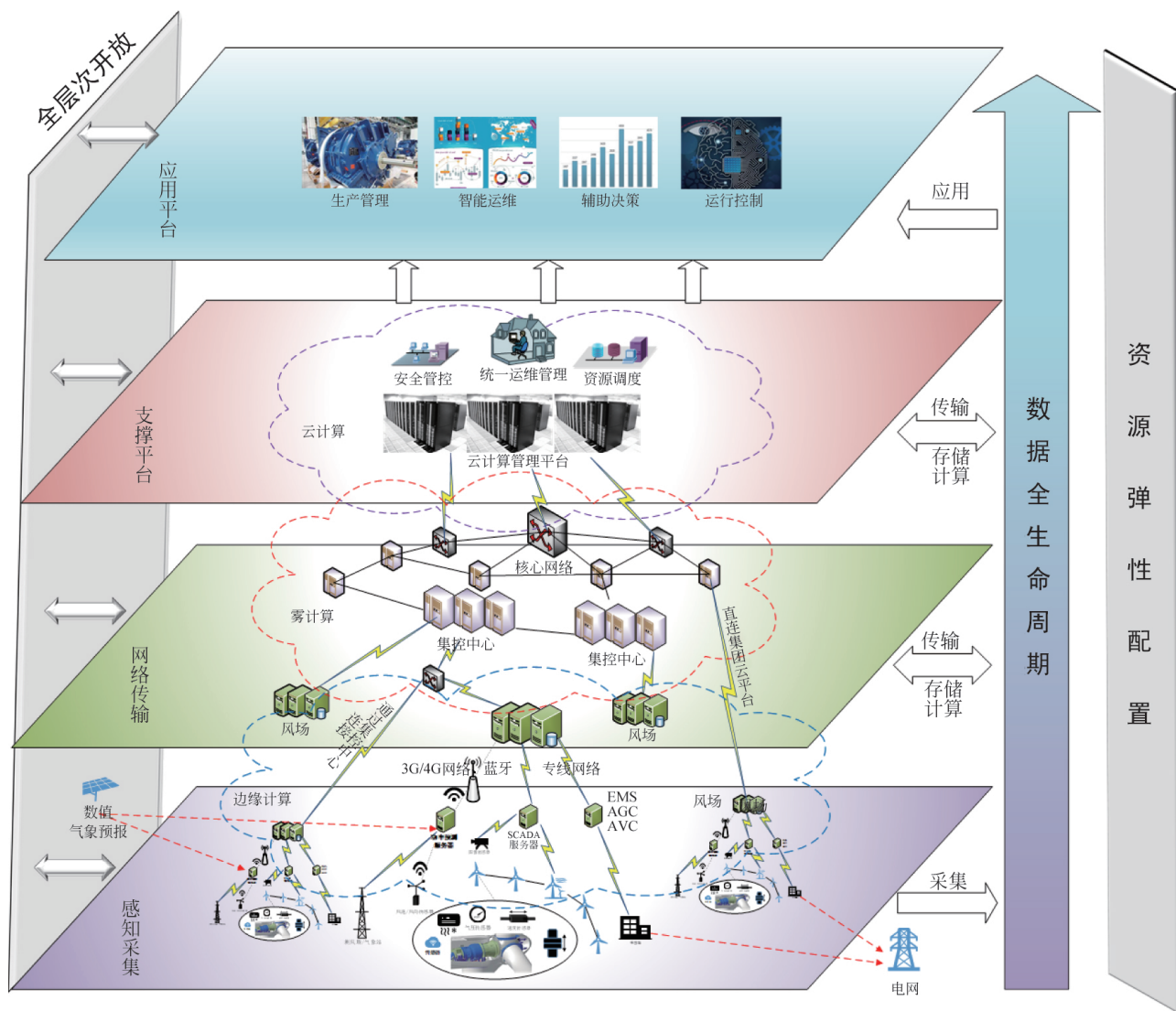


图 1 智慧风电体系架构

Fig. 1 System architecture of smart wind power

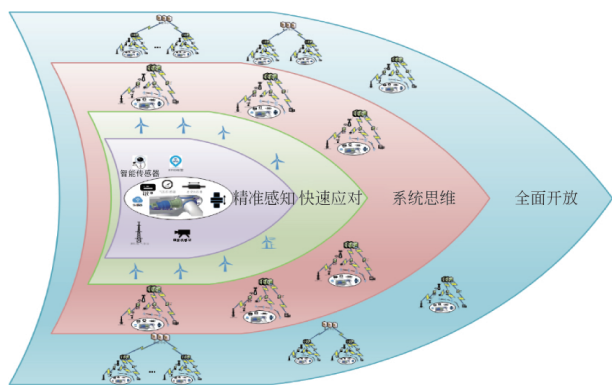


图 2 智慧风电体系智慧层级

Fig. 2 Intelligence level of smart wind power

缘计算到集团云端的云计算,由于建设对象的不均衡发展,存在着计算能力提升的速度不同、计算力发展不均衡的状况,因此需要对智慧风电体系架构的异构计算资源实行弹性配置来满足不同场景的

需求。另一方面,由于技术发展的不均衡,区域集控的软硬件基础设施条件差别较大,智慧风电体系结构需要根据这种不均衡现状灵活配置计算资源,对于基础设施差的风场或集控,可将计算部署于集团云平台,对于软硬件设施先进的单位,可直接将计算过程部署在本地,条件好的风场还可部署边缘人工智能(artificial intelligence, AI)运算。

4 智慧风电生产管理体系架构的关键技术

1) 智能风机技术。

风机作为风电场中的最重要部分,是决定项目造价和收益率的关键。《智能风机白皮书》中指出,智能风机应具备深度感知、自我认知和控制、协同决策的特征。针对不同应用场景和特征,智能风机

在不同层级有不同的要求,智能风机不仅能独立控制实现自身最优,还可以协同风电场其他风机实现风电场收益最优。通过智能控制风机做出最优响应动作,提升发电量的同时,有效降低机组载荷,提升机组在恶劣工况下的稳定性和适应能力。

2) 风资源评估及微气象预测技术。

风电场风能资源评估的准确性对风电场的运行效益有重要的影响。风能资源评估技术需要完成风场高精度短期和中长期气象预测和趋势分析。为解决测风塔缺失或测风塔代表性不足等客观因素造成的气象数据缺失,可采用虚拟测风塔技术,模拟出风电场所在区域或者所需点位的气象数据。微气象预测技术为风电机组进行个性化控制策略研究提供精准的气象数据,为风电场检修维护提供合理的作用时间窗口预测,为风电场大部件吊装、道路维修等大型作业提供施工组织依据。

3) 多尺度风功率预测技术。

风电场输出功率的波动性和间歇性,给电力系统的调度运行带来巨大的挑战。风电场输出功率预测是缓解电力系统调峰、调频压力,提高风电接纳能力的有效手段。根据电场所处地理位置的气候特征、地形地貌和风电场历史数据(如功率、风速)、数值天气预报、风电机组运行状态等数据建立风电场输出功率的预测模型,得到风电场未来的输出功率,为电场管理工作提供辅助手段,为风电场自动发电控制(automatic generation control, AGC)有功自动调节系统提供技术支撑。

4) 风电场精细化网络建模及全状态感知。

风电场可视为一个小型的辐射状电网,风场内部的有功、无功、电压分布差异较大。建立风电场内部的精细化网络模型,并准确感知风场内部的各种运行状态,是实现智慧风电的关键技术。在风电场精细化网络模型及运行实测数据的基础上,对风场内部进行实时状态估计,获得每台风机的机端电压、输出功率及每条馈线的潮流状态,为后期的智能分析提供初始的风场运行状态。

5) 智能优化控制技术。

建立多机型统一的能量管理平台,保证风力发电机组安全可靠运行、获取最大风能,并提供良好的电力保证,实现机组的功率优化控制和场群优化控制。研究优化控制策略^[14],实现对风电场有功功率的智能管理;研究先进的储能技术,削峰填谷,实现电力调峰调频,自由控制风电场上网电量,减轻

电网波动;研究无功功率控制方式,在风机允许的范围内,完全响应调度对无功控制的要求;结合尾流效应研究场群协调控制策略,有效提高场群的风电出力、降低网络损耗及增强电压稳定性,有效提高发电量^[15-16]。风电场智能优化控制技术可增强风电对电网安全稳定的支撑能力,是智慧风电系统稳定灵活运行的保障。

6) 风场智能巡检技术。

借助振动、声音、图像等多种智能传感器,利用物联网、边缘计算和人工智能等技术,通过对风电场设备、人员及周围环境的全维度信息感知,进行风场智能巡检,与运维人员的巡视互相补充建立协同巡检机制,最终实现风电场“无人值班、少人值守、智慧运维”的根本目的。

5 智慧风电信息系统体系架构的关键技术

1) 智能传感器技术。

风电机组、升压站、测风塔安装的传感器节点以有线或无线的方式构成传感器网络,可以全方位实时感知、监测和收集覆盖区域内的风、风电机组和风场环境等各种信息,并实时传输到控制中心,减少设备故障,降低维修成本。智能传感器本身的设计^[17]、传感器节点的部署策略^[18-19]以及能量优化策略是传感器网络高效准确工作的重要因素。智能传感器技术是智慧风电实现精准感知的基本硬件保证。

2) 数据采集技术。

精确的风机数据采集是评估风机和风电场性能和运行状况,预测风机和风电场年发电量的基本保证。而风电场单位时间数据采集量巨大,数据质量难以把控。针对风电大数据采集成本高、可靠性低、状态分类少、标准不统一和获取数据少的现状,同时为解决后续场站、区域集控、总部生产调度等信息建设的数据获取问题,标准化的风电机组采集技术亟待研发。风机数据直采,作为一种可以屏蔽不同机型差异的数据采集技术,是风电机组数据采集的有益尝试,涉及数据主动采集、通信规约破解、数据标准输出和风机状态精准识别等技术。

3) 异构资源的弹性配置技术。

智慧风电体系架构计算资源的弹性配置包括以下几个方面:

① 计算边界的弹性划分。边缘计算、雾计算和云计算的边界根据风电场的实际情况灵活配置。

有区域集控中心的,其雾计算的边界可以拓展到区域集控;风场直连集团数据中心的,其雾计算的边界也可以拓展到风场或者风机层面。

② 计算方法的弹性配置。各种机器学习和人工智能算法可根据不同需求在不同的层配置相应功能版本。

③ 计算力的弹性配置。计算力是算法快速运行实现的保证,随着计算机软硬件技术的发展,智慧风电体系架构可以根据需要将不同的计算力灵活配置到不同的功能层,例如由于计算资源的限制,之前 AI 算法的训练需要在云端完成,边缘端只部署模型,随着边缘计算技术的发展,可以将云计算服务部分下沉,行成边缘云计算。异构计算资源的弹性配置技术是智慧风电体系架构的核心特征,也是智慧风电适应不同外部环境,实现智慧风电系统思维,构建良好风电生态的有力保证。

4) 多源异构数据融合技术。

风电机组装有大量如振动传感器、拾音器、红外传感器、视频传感器以及温度湿度传感器等不同类型的传感器,这些不同信号类型传感器节点产生的大量风电数据呈现出多维异构、时空关联等物理特性。如何将来源不同、异构且具有实时要求的时间序列数据融合起来处理,让运行系统快速决策与控制将会是一大挑战。数据融合分为像素级、特征级和决策级融合策略^[20-21],不同阶段不同目标的数据融合需要结合不同的融合策略^[22-23]。多源异构数据融合的核心问题是选择合适的融合策略^[24]。多源异构数据融合的研究为后期的智慧风电精准系统的决策分析提供数据质量保证。

5) 智能诊断预警技术。

由于工作环境恶劣、载荷复杂多变,风电机组容易发生故障。对风电机组展开状态监测和故障诊断预警研究,及时掌握其运行状态,及早发现潜在故障征兆,降低故障率和减少运行维修成本,从而加强风电机组运行的可靠性^[24],是智慧风电系统需具备的最基本智慧。充分挖掘现有的故障诊断与预警方法,结合数据挖掘、人工智能等现代技术,研究智能故障诊断与预警方法^[25-30]。借助全开放的智慧风电体系架构,故障预警算法通过与外界交互随时自我更新,为智慧风电系统运维和检修提供强有力的技术支撑。

6) 风场数字化技术。

数字孪生技术可以利用风机的物理模型和历

史运行数据,在虚拟空间中完成风机实体的映射,以反映相对应的风机的全生命周期过程。风机/风场都可以有一个数字复制体,不仅能看到产品外部的变化,还能看到风机内部每一个零部件的工作状态。借助数字孪生技术和 5G 通信技术,获取风机的实时运行数据,构建多种主控风机数字孪生体的实验平台,通过大数据分析技术分析风机/风场实时状态,实现机组的功率优化控制,使智慧风电系统具备快速应对的智慧。

7) 数据存储策略。

智慧风电系统需要实时跟踪风机动态变化,并按照时间序列存储完整的历史数据。一方面需要支持每秒钟上千万数据点的写入,并在秒级上对海量数据进行分组聚合运算;另一方面需要考虑如何更低成本地存储这些历史数据。在场站侧采取节点级计算存储融合策略,节点级计算存储融合采用新型存储级内存器件,将内存与本地外存有机地融合在一起,设计成为新内存计算体系。在集团云端可将存储中心与计算中心有机融合到一个系统中,有效降低网络传输瓶颈造成的系统性能下降。快速有效的数据存储策略是智慧风电数据高效传输和快速挖掘的可靠保障。

8) 网络通信技术。

风机通信系统需要完成风机内部、就地监控、中央监控和远程监控之间数据与命令的通信。现有的风电场有线通信网络已不能完全满足风电场监控系统、通信系统对可靠性和安全性的要求。一方面针对各风机厂家通信规约不同,风电场需制定统一的通信传输技术标准;另一方面随着风电场容量的增大以及海上风电场对监控需求的提高,先进的网络通信技术迫切需要研发,考虑到有线介质的不可预知的破坏,无线通信的灵活机动特性使其可能成为更佳选择。

9) 系统架构信息安全技术。

智慧风电一方面本身复杂的架构和众多的支撑技术容易出现漏洞,另一方面全开放交互的架构也为智慧风电系统的安全防护带来很大的挑战。智慧风电体系架构的安全防护满足多层次防护的同时还需能够灵活配置和功能扩展。因此,探索融合边缘计算、雾计算和云计算等多种异构计算体系的智慧风电体系架构的运行安全、数据安全和安全管理等技术,是智慧风电系统实现精准感知、快速应对、系统思维、全面开放智慧的安全保障。

智慧风电体系架构在数据的全生命周期,通过各功能层不同的计算能力、计算方法,使得风电系统达到不同层级的智慧。全层次的交互开放架构将“人-机-网-物”有机融合起来,从而将人的智慧融入智慧风电的体系架构,使智慧风电系统具有持续学习成长的能力。

6 结论

智慧风电是发电过程中数字化、信息化和标准化发展的必然产物,是物联网、大数据、云计算、人工智能、数字孪生等多种技术的深度融合,具有开放性、学习性、成长性、异构性和交互性的特点。本文从智慧风电体系架构的生产管理和信息系统2个维度展开研究,以异构计算为基础,在数据的全生命周期过程中,不同层级采用不同计算方法(边缘计算、雾计算和云计算),具有不同的计算能力,完成不同的计算层次,达到了不同的智慧层级(传感设备的精准感知、场站级的快速应对、区域级的系统思维和整个系统的全面开放的智慧),构建了良好的智慧风电生态。

智慧风电是一个复杂的系统工程,包括:与智慧风电相关的标准和参考体系架构的规划、设计,硬件基础设施搭建,网络拓扑结构设计,数据和系统安全,计算模型的构建,应用模块设计等。智慧风电重新定义风电场管理,提高风机基于时间的可利用率,降低设备故障发生率和故障时间,提高风电场发电量,降本增效,实现了“无人值守、无人值班”的目的。智慧风电对推动风电行业发展,打造风电行业的竞争优势,打造安全、绿色、低碳、经济和可持续的现代智慧新能源产业体系具有重要的意义。

参考文献

- [1] DYKES K, HAND M, STEHLY T, et al. Enabling the SMART wind power plant of the future through science-based innovation [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2017.
- [2] HEWITT S, MARGETTS L, REVELL A. Building a digital wind farm [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018, 25(4): 879-899.
- [3] KUIK V G A M. Long-term research challenges in wind energy: a research agenda by the European Academy of Wind Energy[J]. Wind Energ. Sci., 2016, 1(1): 1-39.
- [4] SHARMA R N, MADAWALA U K. The concept of a smart wind turbine system[J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 403-410.
- [5] 朱程. 远景“智慧风场管理”: 运用物联网技术实现“无人值守”[J]. 中国信息安全, 2016(10): 60-62.
ZHU Cheng. Envision “intelligent wind field management”: using internet of things technology to realize “unattended”[J]. China Information Security, 2016(10): 60-62.
- [6] 李易珊. 智慧风电场: 探索最佳运营模式[J]. 海洋与渔业, 2018(5): 68-69.
LI Yishan. Smart wind plant: exploring the best operating mode[J]. Marine and Fisheries, 2018(5): 68-69.
- [7] 何立荣, 刘春波. 构建云、大、物、移的智能电厂[J]. 中国设备工程, 2018(4): 12-17.
HE Lirong, LIU Chunbo. Building intelligent power plants based on cloud computing, big data, internet of things and mobile internet [J]. China Plant Engineering, 2018(4): 12-17.
- [8] 王刚. 关于智能化电厂建设的思考[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(2): 1-3, 21.
WANG Gang. Thought on the construction of intelligent power plant[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(2): 1-3, 21.
- [9] 张晋宾, 周四维. 智能电厂概念及体系架构模型研究[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 2-7.
ZHANG Jinbin, ZHOU Siwei. Study on the concept of the smart power plant and its architecture model [J]. Electric Power, 2018, 51(10): 2-7.
- [10] 崔青汝, 李庚达, 牛玉广. 电力企业智能发电技术规范体系架构[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 32-36.
CUI Qingru, LI Gengda, NIU Yuguang. Architecture of the intelligent power generation technical specification for electric power enterprises[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 32-36.
- [11] 刘吉臻. 智能发电系统体系架构及其关键技术[EB/OL]. [2018-05-08]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180508/896259.shtml>.
- [12] 吴智泉, 许昊煜, 陈建文. 环境友好型风电项目开发策略研究[J]. 中国经贸导刊(理论版), 2018(2): 25-28.
WU Zhiqun, XU Haoyu, CHEN Jianwen. Research on development strategy of environment-friendly wind power projects[J]. China Economic & Trade Herald, 2018(2): 25-28.
- [13] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 风电场分布式能量管理系统: 体系架构和关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 26-31.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WU Wenchuan, et al. Wind farm distributed energy management system: architecture and key technologies[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 26-31.
- [14] 刘细平, 林鹤云. 风力发电机及风力发电控制技术综述[J]. 大电机技术, 2007(3): 17-20, 55.
LIU Xiping, LIN Heyun. Overview of wind power generators and the control technologies[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007(3): 17-20, 55.
- [15] 郭鑫. 广域风电集群的功率控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
GUO Xin. Research on power control strategy of wide area wind farm clusters[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [16] 林俐, 朱晨宸, 郑太一, 等. 风电集群有功功率控制及其策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 9-16.

- LIN Li, ZHU Chenchen, ZHENG Taiyi, et al. Active power control of wind farm cluster and its strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 9-16.
- [17] WANG Y, MA X, JOYCE M J. Reducing sensor complexity for monitoring wind turbine performance using principal component analysis[J]. Renewable Energy, 2016, 97: 444-456.
- [18] CARBAJO S R. Routing in wireless sensor networks for wind turbine monitoring [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 39: 1-35.
- [19] PACHECO J. Wind turbine vibration based SHM system: influence of the sensors layout and noise [J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 2160-2165.
- [20] DE FARIAS C M. A multi-sensor data fusion technique using data correlations among multiple applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 92: 109-118.
- [21] TAYLOR C N, BISHOP A N. Homogeneous functionals and Bayesian data fusion with unknown correlation[J]. Information Fusion, 2019, 45: 179-189.
- [22] 贺雅琪. 多源异构数据融合关键技术研究及其应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
HE Yaqi. Research and application on the key technology of multi-source heterogeneous data fusion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [23] 师春雨. 电力设备多源异构大数据融合方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
SHI Chunyu. Research on method of multi-source heterogeneous data fusion for electric power equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [24] HABIBI H, HOWARD I, SIMANI S. Reliability improvement of wind turbine power generation using model-based fault detection and fault tolerant control: a review[J]. Renewable Energy, 2019, 135: 877-896.
- [25] CHO S, GAO Z, MOAN T. Model-based fault detection, fault isolation and fault-tolerant control of a blade pitch system in floating wind turbines[J]. Renewable Energy, 2018, 120: 306-321.
- [26] HELBING G, RITTER M. Deep learning for fault detection in wind turbines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 98: 189-198.
- [27] LEBRANCHU A. A combined mono- and multi-turbine approach for fault indicator synthesis and wind turbine monitoring using SCADA data[J]. ISA Transactions, 2018, 87: 272-281.
- [28] RUIZ M. Wind turbine fault detection and classification by means of image texture analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 107: 149-167.
- [29] TENG W. Compound faults diagnosis and analysis for a wind turbine gearbox via a novel vibration model and empirical wavelet transform[J]. Renewable Energy, 2019, 136: 393-402.
- [30] YU D. A radically data-driven method for fault detection and diagnosis in wind turbines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 577-584.



吴智泉

收稿日期:2019-01-05

作者简介:

吴智泉(1974—),男,博士,数量经济学博士后,高级工程师,主要从事能源战略与气候变化应对、能源开发与利用评价、能源规划、可再生能源技术、电力工程技术等方面的研究工作,wuzhiquan@cdt-reri.com;

王政霞(1977—),女,博士,教授,主要从事智能计算、机器学习、图像处理、风电大数据方向的研究工作,zxiawang@163.com。

(编辑 谷子)