

数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术

刘吉臻, 王庆华, 房方, 牛玉广, 曾德良

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Data-driven-based Application Architecture and Technologies of Smart Power Generation

LIU Jizhen, WANG Qinghua, FANG Fang, NIU Yuguang, ZENG Deliang

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: To relief the globally severe situation on energy shortage, environmental pollution and climate change, the main trend in energy and power arena is to achieve safe, efficient, clean, low carbon, flexible and intelligent. The intelligent technology characterized by data depth utilization will be the core area of future electric power development. In this paper, the concept and the system structure of smart power generation system were further elaborated. Firstly, from the point and view of data application, five data characteristics of smart power generation were proposed. It should be capable of ubiquitous perception (data acquisition), information fusion (data interaction), intelligent algorithm (data monitor), intelligent management and control (data decision), and full life cycle management (data archiving). Secondly, the data application architecture of smart power generation control system was proposed, which includes intelligent control system (ICS) and intelligent service system (ISS). Finally, the corresponding data application functions of two systems were presented.

KEY WORDS: smart power generation; data driven; physical architecture; data application architecture; intelligent control system; intelligent service system

摘要: 面对能源短缺、环境污染、气候变化等人类共同的难题,安全高效、清洁低碳、灵活智能已成为能源电力转型发展的大趋势,而以数据深度利用为特征的智能化技术将是未来电力发展的核心领域。该文在前期研究的基础上,对智能发电系统的概念、体系架构进行了进一步阐述,从数据应用的角度阐明了智能发电的五大数据化特征:泛在感知(数据获取)、信息融合(数据交互)、智能算法(数据监控)、智能管控(数据决策)、全生命周期管理(数据归档)。提出包括智能发电运行控制系统(intelligent control system, ICS)和智能发电公共服务系统(intelligent service system, ISS)的智能发

电系统数据应用架构,在此基础上,给出了与2个系统相对应的数据应用功能。

关键词: 智能发电; 数据驱动; 物理架构; 数据应用架构; 运行控制系统; 公共服务系统

0 引言

电力是关系国计民生的基础产业^[1]。2000年以来,我国电力工业取得了举世瞩目的成就,发电装机、电网规模等多项指标居世界首位,有力支撑了国民经济的发展和人民生活水平的提升。新常态下,我国电力需求增速明显放缓,供需宽松呈现常态化趋势^[2-3]。电力工业发展的主要目标已由长期以来的保障供应,向以调整优化、转型升级为主线,构建安全高效、清洁低碳、灵活智能的现代电力工业体系转变^[4]。

进入近代社会以来,人类文明的每一次重大进步都推动能源技术的变革。如图1所示,第一次工业革命的标志是蒸汽技术,第二次工业革命的标志是电力技术,这2次工业革命都是化石能源的革命。第三次工业革命的核心是计算机与信息技术,标志是工业化与信息化的融合,即“两化融合”,对于能源电力领域,更多体现在数据信息的集成和

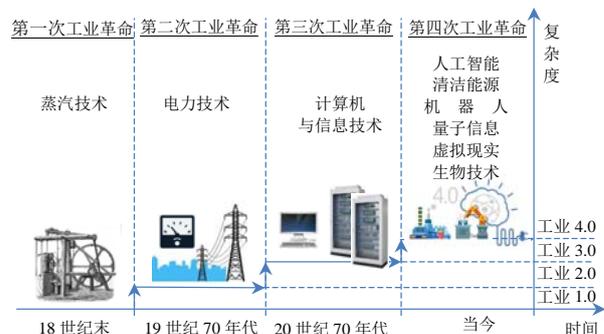


图1 智能化与第四次工业革命
Fig. 1 Intelligitization and the fourth industrial revolution

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0602105); 北京市科技计划项目(Z181100005118005)。

Supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0602105); The Science and Technology Project of Beijing (Z181100005118005).

自动化水平的提升。目前,以数据信息深度利用、仿人智能为特征的智能化已成为第四次工业革命的核心内容,涉及清洁能源、机器人、量子信息、虚拟/增强现实、生物工程等技术领域。

能源电力的清洁化、智能化发展已上升到国家战略层面。2014年,国务院在《能源发展战略行动计划 2014—2020 年》中提出“绿色低碳”的发展战略,到 2020 年和 2030 年非化石能源占一次能源消费比重将分别达到 15% 和 20%^[5]。2015 年 5 月,国务院正式发布《中国制造 2025》行动计划,大力促进工业互联网、云计算、大数据在企业研发设计、生产制造、经营管理和销售服务等全流程和全产业链的综合集成应用^[6]。2016 年 2 月国家发改委发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,明确提出促进能源和信息深度融合,鼓励能源企业运用大数据、智能化技术对设备状态、电能负载等数据进行分析挖掘与预测,开展精准调度、故障判断和预测性维护,提高能源利用效率和安全稳定运行水平^[7]。

在国家战略及相关政策的引导下,国内各发电集团高度重视发电系统的智能化建设与改造,积极推进智慧电厂建设。2016 年大唐集团与 GE 建立北京国际电力数据监测诊断中心,用于 11 台燃机及 2 台燃煤机组的数据收集和分析;神华国华电力对所属电厂中 75 类重要设备的全部相关信息集中采集和处理,以实现电厂大数据管理。此外,大唐姜堰电厂、大唐南电电厂、京能集团高安屯热电及十堰热电厂、江苏国信集团高邮及仪征燃机电厂、国电大渡河公司、中广核等均在积极推进智慧电厂示范项目。与此同时,在智能发电系统理论研究工作方面,围绕火电机组蓄能深度利用、供热机组热电解耦、机组灵活性调节、多能源互补调度、厂级优化分配等方面已开展了系统性研究工作^[8-15]。

就目前的发展情况看,发电系统的深度智能化还需要攻克更多的理论和技术难题,智能化装备尚需进一步的实质性突破。因此,现阶段的智能发电更多地集中在基于数据深度挖掘的智能化管控应用方面,目标是提升系统运行管理的综合性能。本文在前期研究的基础上,对智能发电系统的概念、体系架构进行了进一步阐述,从数据应用的角度阐明了智能发电的五大数据化特征:泛在感知(数据获取)、信息融合(数据交互)、智能算法(数据监控)、智能管控(数据决策)、全生命周期管理(数据归档)。提出了包括智能发电运行控制系统(intelligent

control system, ICS)和智能发电公共服务系统(intelligent service system, ISS)的智能发电系统数据应用架构,在此基础上,给出了与 2 个系统相对应的数据应用功能。

1 智能发电系统的数据化特征

智能发电以发电过程的数字化、自动化、信息化、标准化为基础,以管控一体化、大数据、云计算、物联网为平台,集成智能传感与执行、智能控制与优化、智能管理与决策等技术,形成一种具备自主学习、自适应、自趋优、自恢复、自组织的智能发电运行控制管理模式,实现更加安全、高效、清洁、低碳、灵活的生产目标^[8]。从上面的描述可知,智能发电系统中的“智能”与数据深度利用密切相关,其数据特征鲜明、功能多样。

1.1 智能发电系统的数据特点

1) 多源获取、范围明确、位置分散、数据体量大、结构多样。发电过程数据分布于主辅机设备、生产流程、管理系统、工业以太网等各个环节,数据获取频率高、类型多,既有结构化和半结构化的传感数据,也有非结构化数据。

2) 蕴含信息复杂,数据间的关联性强。一方面,发电机组生命周期同一阶段的数据具有强关联性,如系统工艺流程、工况、设备状态、维修情况、零部件补充采购等;另一方面,发电机组生命周期中的技术改造、生产、服务等不同阶段的数据之间也具有强关联性。

3) 持续采集,采样速率多样化,具有动态时空特性。发电机组长时间连续运行的特性决定了其监控过程必然是连续不间断的,且根据生产流程各个环节的特性和重要程度,可采取实时、半实时、离线等采样方式。

4) 采集、存储、处理、分析、挖掘的时序性和实时性要求高。电力生产大数据具有较强的时序性,如设备的顺序启停、设备状态的依次转换、运行故障的发生先后等,且生产层级数据流的实时性要求高,往往达到毫秒级。

5) 数据应用具有闭环要求。智能发电的关键就是各种分析、挖掘、优化结果的闭环运行。因此,在发电系统全生命周期的各个阶段中,数据链条应具有封闭性和关联性;同时,在能量转换过程的数据采集和处理过程中,需要支撑状态感知、分析、反馈、控制等闭环场景下的动态持续调整和优化。

1.2 智能发电系统的数据功能

1) 泛在感知——数据获取。

通过先进的传感测量手段及网络通信技术,实现对电力生产和管理过程中环境、状态、位置等信息的全方位监测、识别和多维感知。高密度(包括测点数及数据量)、多类型、网络化将是智能发电系统信息感知的重要特点。获取的数据经处理、分析和融合,将与业务流程深度集成,成为发电系统智能化管控的基础和驱动力。

2) 信息融合——数据交互。

利用云计算、边缘计算、大数据处理、物联网等先进技术,对电力生产与管理过程中的海量数据进行规划、处理与分析,实现多源数据的深度融合。建立电力生产中设备与设备、人与设备、人与人、电厂与电网(用户)、电厂与环境之间的信息交互与共享机制。通过智能设备间的信息融合提高状态估计的准确性,通过生产过程的关联分析发掘机组安全、高效、清洁、低碳、灵活运行潜力。

3) 智能算法——数据监控。

通过将数据挖掘、遗传算法、神经网络、机器学习、专家系统等智能化方法应用于工程设计、生产调度、过程监控、故障诊断、运营管控等,使发电过程具有环境自适应、工况自学习、故障自恢复、运行自趋优等能力。

4) 智能管控——数据决策。

建立生产控制系统与生产管理信息系统之间的数据共享、业务联动机制,根据实时管理要求,调整生产计划和生产任务,将管理要求及时反映到智能发电运行控制支撑系统,根据调度要求和生产资料情况,调整生产控制策略,实现各项生产指标的最优化与企业经济效益的最大化。

5) 全生命周期管理——数据归档。

将设计过程中设备与系统的三维模型、图纸和文档,建设过程中产生的制造、安装和调试文档,以及运营过程中产生的检修台账及实时数据在同一平台上集成,利用可视化技术和三维定位技术,实现设备安装、运行和巡检的三维仿真和实时互动,实现全生命周期的状态预测和管理。

2 智能发电系统的数据应用架构

1974年, Honeywell 推出世界上第一套分散控制系统(distributed control system, DCS),融合了计算机技术、控制技术、通讯技术和图形显示技术,以高速数据网络、现场控制站、人机界面为核心,

实现数据采集、过程控制、显示操作等功能。20世纪80年代以来,DCS的普及和管理信息系统(management information system, MIS)的广泛使用为实现我国电力生产的现代化管理奠定了基础。

2004年,华北电力大学成功研制出我国第一套火电厂厂级监控信息系统(supervisory information system, SIS)。针对火电厂生产运行对网络信息系统可靠性、安全性的要求,首次提出并实现了具有三级可靠性、二级安全性的发电厂网络结构。提出的DCS+SIS+MIS的火电厂厂级运行监控及生产管理新模式,已成为我国火电厂设计与建设的标准配置。但是,由于结构和功能定位的限制,SIS系统与DCS系统之间只能进行数据的单向传输,机组运行性能在线诊断及优化结果不能与实际生产过程形成闭环。

随着互联网、大数据、云平台以及新的安全理念和管理技术的发展,为了适应智能化管控的需求,原有DCS+SIS+MIS的3层物理架构应进一步简化为如图2所示的2层架构。

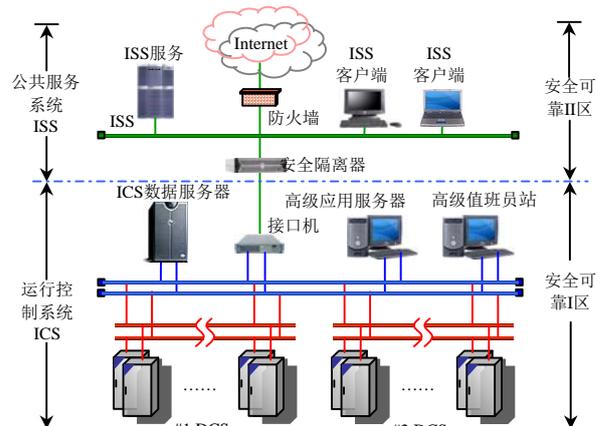


图2 智能发电系统的物理架构

Fig. 2 Physical architecture of smart power generation system

在此架构中,与生产运行密切相关的生产过程层网络和监控优化层网络被统一在一个物理层,具有相同的安全可靠性要求,在功能上被统称为“智能发电运行控制系统(ICS)”。管理服务层网络属于一个单独的物理层,主要提供巡检、设备维护、分析核算、移动应用等功能,称为“智能发电公共服务系统(ISS)”。2个物理层之间按照“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证、综合防护”的原则实现逻辑隔离和物理隔离。

基于上述2个物理层、2个系统的划分,可以进一步梳理出如图3所示的智能发电系统数据应用架构,其核心仍然是数据的深度利用。

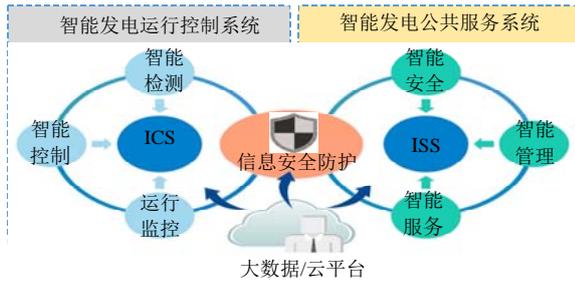


图 3 智能发电系统数据应用架构

Fig. 3 Data application architecture of smart power generation system

智能发电运行控制系统(ICS)以智能分散控制系统(DCS)为核心, 为用户提供高度开放的应用开发平台, 如图 4 所示。该平台在控制回路层以算法容器和宏算法封装的形式为用户提供统一的组态调试环境和冗余机制, 实现算法实时高效运算。在监控优化层面为用户提供统一接口规范和运行环境的高级应用服务, 同时为第三方独立应用提供统一图形化组态和高级应用监控。

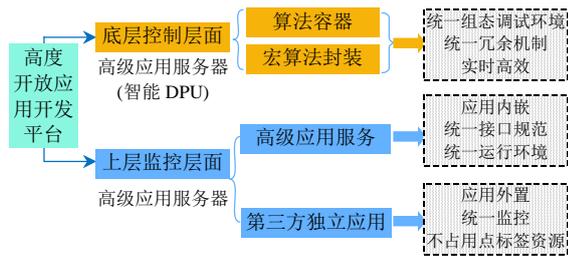


图 4 开放的应用开发平台

Fig. 4 Open platform of application and development

智能发电公共服务系统(ISS)以大型数据库系统、大数据、云平台为基础, 整合运行控制系统实时数据资源, 机组设计、施工、维修数据资源, 全厂人力、财务、设备数据资源, 以及电网、集团、市场信息, 实现发电企业的智能安全、智能管理与智能服务, 为人员与设备的安全、精细化管理及优化决策提供一体化数据平台。

3 智能发电系统数据应用技术

智能发电是一个多学科交叉的高新技术领域, 在数据深度利用方面涉及面广, 其细分技术按照智能发电系统的数据应用架构, 同时考虑数据交互应用中的安全性需求, 可归纳为如图 5 所示的 7 类。

3.1 智能检测技术

检测是数据获取的源头, 也是发电系统智能化的源动力。智能检测既要有现代化的检测装置^[16], 也要有高水平的检测技术^[17]。

1) 智能检测设备。

基于现场总线、无线传感器网络等先进通信技

术, 利用高精度、低功耗、智能型测量仪表和分析仪器, 实现对发电过程中环境、状态、位置等信息的全方位监测、识别与自适应处理; 采用智能变送器、智能执行机构、采集一体机等智能测控单元, 为系统提供多维数据。

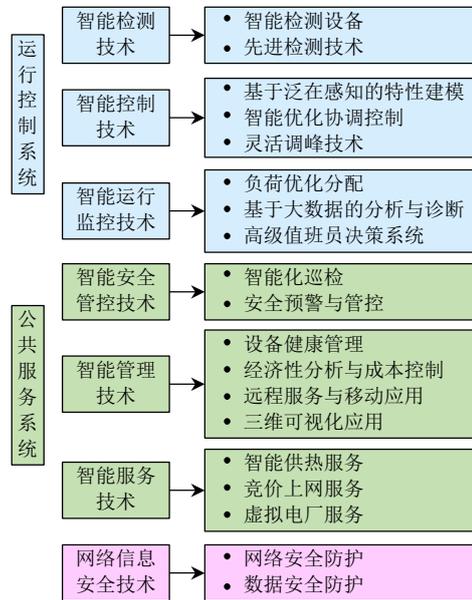


图 5 智能发电系统的数据应用技术

Fig. 5 Data application technologies of smart power generation system

2) 先进检测技术。

基于微波、激光、红外、静电、声波等先进测量技术, 实现发电过程参数的在线检测; 基于机理模型和可测变量建立软测量模型(如图 6 所示), 实现发电设备不可测关键状态的在线监测。

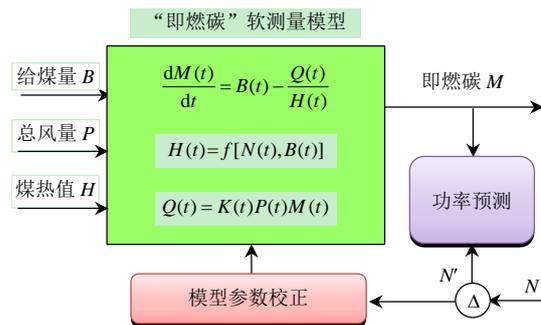


图 6 循环流化床锅炉“即燃碳”软测量

Fig. 6 Soft-sensing of burning carbon storage capacity in circulating fluidized bed boilers

3.2 智能控制技术

就智能控制的类型而言, 智能控制包括模糊控制、神经网络控制、专家控制、分层递阶控制、学习控制、仿人智能控制以及各种混合型方法^[18]。基于机理分析和数据驱动模型, 进行高性能多目标优化控制器设计及快速优化求解。发展具有模型自学习、工况自适应、故障自恢复能力的控制策略, 满

足环境条件、设备状态、燃料品质变化下的控制需求，实现机组全范围、全过程的高性能控制。例如，机组自启停优化控制^[19]、燃烧优化控制^[14, 20]、灵活调峰控制^[4, 12-13]等。

1) 基于泛在感知的机组特性建模。

研究热力系统多时空动态特性精细化表征方法，包括结合大数据的复合建模方法、基于鲁棒学习的数据驱动建模方法等，如图 7 所示。在海量检测数据的支撑下，可进行工况识别、工况特性分析，综合状态重构，进而建立发电机组多时空尺度、全工况状态感知模型，并基于机组实时/历史数据实现对模型的定期维护和在线更新，提高建模精度。

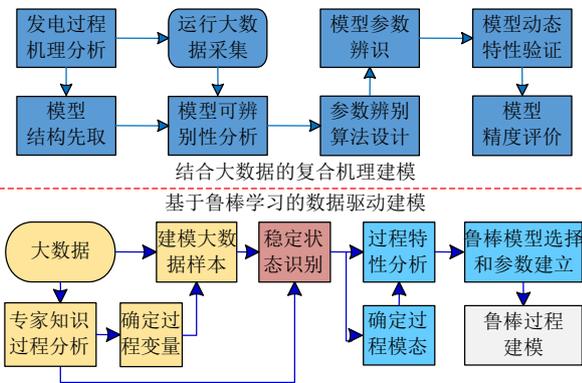


图 7 智能发电系统建模

Fig. 7 Modeling of smart power generation systems

2) 火电机组智能优化协调控制。

基于对机组特性的深度感知，通过高加给水旁路节流、凝结水节流、凝汽器冷却工质节流及供热抽汽节流控制等对机组蓄能的高效利用，提升机组 AGC 和一次调频控制品质，即快速变负荷能力；基于机组灵活运行及热电解耦，实现机组在不同工况下的快速、深度、稳定调节。以图 8 所示超超临界直流炉机组智能协调优化控制为例，以带前馈的阶梯式单变量预测控制算法为核心，融合传统前馈控制和解耦控制理念，配合智能感知和非线性动态模型在线更新，实现数据驱动下基于精准能量平衡的火电机组智能协调控制。

3) 新能源(风/光)智能优化控制。

以高分辨率的数值天气预报数据为基础，结合新能源场站的微地形特点，实现场站功率的智能化精细预测。基于新能源场站发电单元的出力特性、状态参数和电网环境，实现区域智能化能量综合管理。研究风力发电、光伏发电的并网特性，揭示不同场景下其规模化并网与电网的相互作用机理，实现新能源场站对电网的动态主动支撑。设计包括智能叶片/变桨控制、智能变频器控制的自适应协调控

制策略，实现新能源发电系统控制装备的智能化。

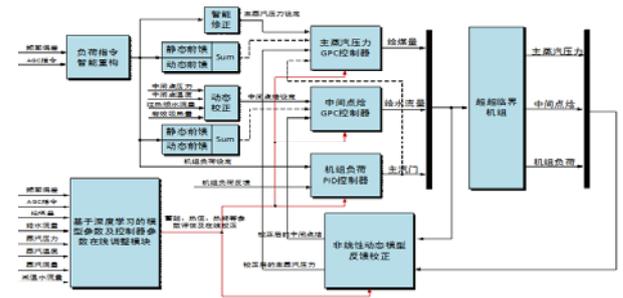


图 8 智能优化协调控制系统

Fig. 8 Intelligent optimization coordinate control system

4) 水电智能优化控制。

以气象、防汛、大坝及机组运行等数据信息为基础，构建预报、调度、运行各环节的协调互动机制，实现基于数据驱动的区域水电厂 AGC/AVC 一体化运行控制，提高源网智能协调运行能力。

3.3 智能运行监控技术

通过安全、经济、环保指标在线计算与偏差分析，实现机组及厂级性能指标的闭环控制；采用大数据分析、机器学习等方法，实现设备及系统的状态监测、故障定位、在线诊断、优化决策。主要包括性能计算与耗差分析^[21]、节能减排优化控制^[22]、设备状态在线监测与故障诊断^[23]等。

1) 负荷优化分配。

针对火电厂，通过数据挖掘建立负荷煤耗特性模型，考虑机组功率平衡、旋转备用、机组出力上下限、机组爬坡速率、调峰时间、机组调峰变动及频繁反调等约束条件，根据电厂实时的机组状态、机组发电效率、脱硫脱硝效率、上网电价、负荷响应速率等性能参数，利用智能化算法是实现全厂各机组的多目标负荷优化分配。

针对流域梯级水电站，通过对上下游电站间电力关联信息和水文水力关联信息的全面感知，综合入库流量、水位、负荷、可调区间、出力变幅、振动区等约束条件，以满足机组运行安全和供电需求情况下调度周期内总耗水量最小等为目标，利用智能化方法，构建梯级水电站间负荷优化调度及水电站内负荷优化分配新模式。

2) 火电机组关键环节智能运行控制。

针对机组关键生产环节，研究基于机器学习的最优目标值挖掘技术，结合先进控制理论方法与专家知识，建立专用智能控制算法库。通过性能计算、耗差分析、工况分析等手段，确定不同工况下最优控制目标，实时指导运行人员进行优化操作；通过制粉系统状态综合感知、风煤配比动态调整、NO_x

排放控制(如图 9), 实现燃烧过程整体智能优化。

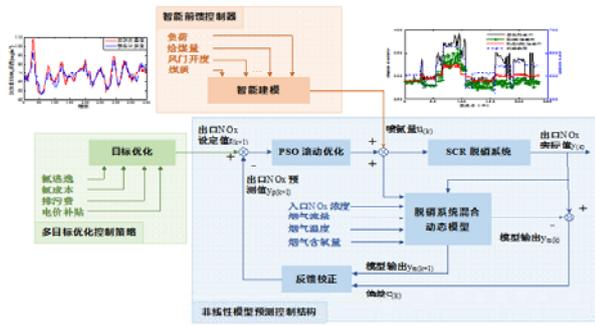


图 9 脱硝系统智能优化控制

Fig. 9 Intelligent optimization control of selective catalytic reduction system

3) 基于大数据的设备分析与诊断。

通过对机组设备重要状态参数的劣化分析、基于深度学习的设备故障诊断、基于专家系统的系统运行诊断, 实现对工艺系统和大型设备运行状态在线监测及故障实时超前预警; 通过数据处理与控制、状态诊断的最新技术, 实现控制系统传感器、执行器故障的自动诊断。

4) 高级值班员决策系统。

围绕机组运行控制过程, 基于深度学习等机器学习方法, 通过对全厂机组运行数据的统计分析, 实现厂级安全、经济、环保指标的实时计算; 通过对同类机组运行工况与能效指标的对标分析, 融合专家知识, 给出机组在不同工况下的最优控制目标, 指导运行人员优化操作。建立科学的考核指标模型和竞赛规则, 提高全厂运行管理水平。

3.4 智能安全管控技术

1) 智能化巡检。

利用智能穿戴设备、手持智能终端、无人机、智能巡检机器人^[24](如图 10)等智能设备, 整合智能检测技术, 开发智能巡检系统, 使其具备视频图像识别、红外测温、激光测振、声音拾取、(水、酸、碱、气、汽)跑冒滴漏检测、手机 APP 远端在线监控等满足发电厂日常巡检需求的功能。对发电生产



图 10 智能机器人巡检

Fig. 10 Intelligent inspection robots

区域的表计, 包括压力表、温、度表、数显表、液位计、轴承油位、避雷器泄露电流和动作次数、电气开关和阀门状态等示值和位置进行数据读取, 并完成巡检数据的自动记录、上传。

2) 安全预警与管控。

通过人员定位、门禁、人脸识别等物联网技术与智能视频等技术, 结合三维可视化、电子围栏等, 实现职工、外来人员的全方位管控; 与智能巡检、智能两票等功能进行联动, 实现对人员安全与设备操作的主动安全管控, 保障安全生产。

3.5 智能管理技术

利用大数据云平台、移动互联网、三维可视化(如图 11)等技术手段, 通过生产信息与管理信息之间的数据共享与业务联动, 追踪所有系统和设备的更新、维护活动及运行状态, 形成人、设备、资产之间的协作机制, 提高精细化管理水平, 实现企业资产优化配置和整体效益的最大化。

1) 设备健康管理。

采用先进人工智能与互联网技术, 利用电站从设计、建设到运行各个时期的数据, 建立健康状态管理知识库, 构建设备状态管理与故障预警诊断系统, 实现对重要系统和设备故障的深度学习, 提取设备故障的早期特征, 实现机组故障的自分析、自诊断, 以及基于预测性运维的备品备件管理, 提高机组安全运行水平和设备可靠性水平。

2) 经济性分析与成本控制。

通过实时性能计算与分析、厂用电计算等重要指标, 全面、精确、直观的反应当前机组运行状况;



图 11 基于现代信息技术的智能管理技术

Fig. 11 Intelligent management based on modern information technologies

分析燃料、水、排污、环保消耗等成本的影响因素,结合发电生产数据,运用大数据技术,构建实时成本控制模型;结合弃风、弃光问题,分析场内、外受累损失电量及维护损失电量,运用大数据技术,建立能效管理体系,实现最优度电成本运维。

3) 远程服务与移动应用。

采集电厂生产、经营数据,建立大数据中心,建立远程专家系统,构建企业级移动应用平台,满足智能发电过程各环节的移动应用功能需求,做到用户统一接入和认证,打造安全、高效的移动办公和技术服务体系。利用智能识别技术,实现机组设备扫码识别、参数就地与远方查询、远程指导、检修辅助等功能。

4) 三维可视化应用。

通过数字化移交或三维扫描等方式实现三维建模和可视化展示,并以此为基础实现生产流程模拟、生产作业指挥、沉浸式培训。与虚拟现实和增强现实技术相结合,开展可视化安全管控、可视化技术监督、可视化智能点巡检、可视化状态检修等。

3.6 智能服务技术

在推进电力供需市场化的大趋势下,发电企业应肩负起服务用户的职责,在提供优质电能的同时还要适应复杂的市场竞争。因此,利用现代信息技术、智能数据分析技术、多尺度预测技术等提升发电企业的服务水平将是提升企业核心竞争力的重要手段。

1) 智能供热服务。

面对我国清洁供暖和可再生能源消纳领域的切实需求,分析电能和热能生产、传输和使用过程中的时空特性差异,利用二者的互补耦合关系,在充分了解用户用能需求的基础上,形成多能流协同调控机制,为智能供热提供策略支持服务。

2) 竞价上网服务。

基于固定成本和变动成本分析,采用深度学习和增强学习技术,对供需关系、保本电量、发电测出力、全网负荷预测、市场竞争电价、市场交易规则等进行精准挖掘,为电厂提供立体化、多层次、多视角的竞价上网决策服务。

3) 虚拟电厂服务。

为适应我国区域综合能源系统的快速发展,在市场化运营模式下,通过信息流与能量流的交互,研究多能互补、虚拟集成中的协同、博弈、预测等关键技术,为虚拟电厂及其各参与方提供智能化的能量聚合服务。

3.7 网络信息安全技术

智能发电系统网络信息安全是指保护发电过程产生的海量生产数据及运营管理数据等信息的真实性、完整性和私密性。通过构建智能发电系统的安全防护体系和架构,可以实现智能发电系统的设备安全、控制安全、应用安全、网络安全与数据安全^[25],如图12所示。

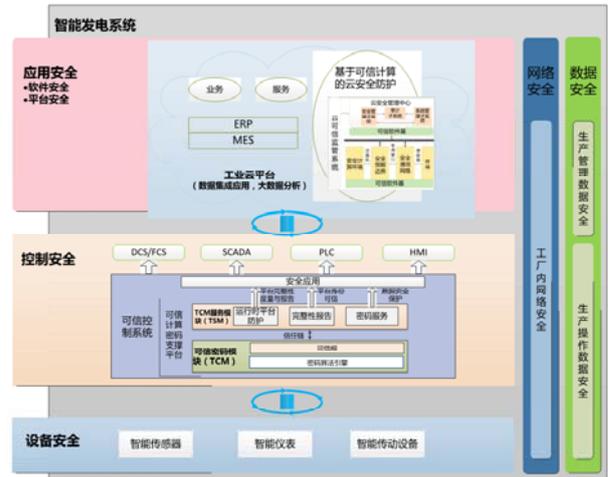


图12 智能发电系统信息安全防护架构

Fig. 12 Information security protection architecture of smart power generation systems

1) 网络安全防护。

在信息安全隔离基础上,智能发电运行控制支撑系统部署入侵检测、安全审计、恶意代码防范、主机及网络设备加固等系统,提升网络安全防护能力,保障工控系统的安全稳定运行。

2) 数据安全防护。

为避免智能发电系统数据被盗取或丢失,借助加密技术、身份认证等数据安全防护技术;为确保数据信息的安全访问,结合数字证书、常规口令、安全芯片、USBKey等身份认证技术。

4 结论与展望

智能化已成为我国能源电力转型发展的必然趋势。智能发电是一个多学科交叉的高新技术领域,需要基础理论、关键技术、体制机制的创新,需要通过“产学研用”合作加以推进。数据是智能发电系统运行的源动力,在信息流与能量流的融合发展中,支撑数据的基础设施已较为完善,但相应的数据深度处理与应用技术还需要不断加强,在推进电力工业智能化的道路上,围绕数据的装备与技术突破将起到至关重要的作用。

我国几个主要的互联网公司在信息化、智能化技术创新方面十分活跃,在一定程度上引领了世界

民用互联网技术的发展潮流; 而电力行业对现代信息技术的应用在工业界最为活跃, 需求最为旺盛。因此, 加强二者的技术交流和融合是推进智能发电系统走向成熟的有效途径。但是, 需要指出的是, 智能发电更多体现的是在信息化、智能化技术基础上的业务应用, 具有很强的专业性, 因此基于领域专家的应用功能研发将是智能发电的核心。

智能发电的发展需要经历由初级形态向高级形态、由局部应用到系统应用的历程。由于发电系统智能化装备与技术的发展还不充分, 对应用需求的分析和理解还须进一步深化, 因此在数字化电厂框架下的局部智能化将是当前的主要发展模式。

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[EB/OL]. [2016-11-07]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170605_849994.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. "13th Five-Year" plan for electric power development [EB/OL]. [2016-11-07]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170605_849994.html(in Chinese).
- [2] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
Liu Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8(in Chinese).
- [3] 刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1555-1561.
Liu Jizhen, Wang Wei, Hu Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(12): 1555-1561(in Chinese).
- [4] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
Liu Jizhen, Zeng Deliang, Tian Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394(in Chinese).
- [5] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014-2020年)[EB/OL]. [2014-11-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
General office of the State Council. Energy development strategy action plan(2014-2020)[EB/OL]. [2014-11-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm(in Chinese).
- [6] 国务院办公厅. 《中国制造 2025》[EB/OL]. [2015-05-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
General office of the state council. China Manufacture [EB/OL]. [2015-05-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm(in Chinese).
- [7] 国家能源局. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. [2016-02-29]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
National Energy Administration. Guiding opinions on promoting the development of smart energy with internet plus[EB/OL]. [2016-02-29]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm(in Chinese).
- [8] 刘吉臻. 智能发电: 第四次工业革命的大趋势[N]. 中国能源报, 2016-07-25(3).
Liu Jizhen. Smart power generation: the trend of the fourth industrial revolution[N]. China Energy News, 2016-07-25(3)(in Chinese).
- [9] 刘吉臻, 胡勇, 曾德良, 等. 智能发电厂的架构及特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6463-6470.
Liu Jizhen, Hu Yong, Zeng Deliang, et al. Architecture and feature of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6470(in Chinese).
- [10] Gao Mingming, Hong Feng, Liu Jizhen. Investigation on energy storage and quick load change control of subcritical circulating fluidized bed boiler units[J]. Applied Energy, 2017, 185: 463-471.
- [11] 高明明, 岳光溪, 雷秀坚, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(35): 6319-6328.
Gao Mingming, Yue Guangxi, Lei Xiujian, et al. Research on control system of 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(35): 6319-6328(in Chinese).
- [12] Hu Yong, Zeng Deliang, Liu Jizhen, et al. Dynamic model for controller design of condensate throttling systems[J]. ISA Transaction, 2015, 58: 622-628.
- [13] Wang Wei, Liu Jizhen, Zeng Deliang, et al. Modeling for condensate throttling and its application on the flexible load control of power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 303-310.
- [14] 房方, 李荣丽, 刘吉臻. 基于多变量内模结构的循环流化床锅炉床温自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 172-180.
Fang Fang, Li Rongli, Liu Jizhen. Active disturbance rejection control for bed temperature of circulating fluidized bed boiler based on multivariable internal model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 172-180(in Chinese).
- [15] Liu Jizhen, Hu Yong, Zeng Deliang, et al. Optimization

- of an air-cooling system and its application to grid stability[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 206-212.
- [16] 王仲生. 智能检测与控制技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
Wang Zhongsheng. Intelligent detection and control technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2002(in Chinese).
- [17] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1-7.
Wang Baoyun. Review on internet of things[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(12): 1-7(in Chinese).
- [18] 辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1831-1848.
Xin Bin, Chen Jie, Peng Zhihong. Intelligent optimized control: overview and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1831-1848(in Chinese).
- [19] 张恒良, 谢诞梅, 刘静宇, 等. 调峰机组启停优化控制[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 300-302.
Zhang Hengliang, Xie Danmei, Liu Jingyu, et al. Optimized control of the startup and shutdown of peaking units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(3): 300-302(in Chinese).
- [20] 高海东, 高林, 樊皓亮, 等. 火电机组实用智能优化控制技术[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 1-5.
Gao Haidong, Gao Lin, Fan Haoliang, et al. Discussions on practical intelligent optimization control technologies for thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 1-5(in Chinese).
- [21] 许振宇, 陈鸿伟, 高建强. 火电厂锅炉主要运行参数的耗差分析[J]. 热力发电, 2007, 36(2): 16-18, 30.
Xu Zhenyu, Chen Hongwei, Gao Jianqiang. Analysis of consumption deviation for main operation parameters of boilers in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(2): 16-18, 30(in Chinese).
- [22] 杨婷婷, 曾德良, 刘继伟, 等. 大型火力发电机组节能优化研究与展望[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 898-902.
Yang Tingting, Zeng Deliang, Liu Jiwei. Research and prospect on energy saving and optimization for large scale thermal power generation unit[J]. East China Electric Power, 2010, 38(6): 898-902(in Chinese).
- [23] 董晓峰. 基于RCM分析的智能化汽轮机故障诊断系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
Dong Xiaofeng. Study on intelligent fault diagnosis system for turbogenerator based on RCM analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012(in Chinese).
- [24] 张燕东, 田磊, 李茂清, 等. 智能巡检机器人系统在火力发电行业的应用研发及示范[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 1-7.
Zhang Yandong, Tian Lei, Li Maoqing, et al. Application and development of intelligent inspection robot system in thermal power plant[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 1-7(in Chinese).
- [25] 马虹哲. 智能电网信息安全威胁及防护关键技术研究[J]. 信息通信, 2017(12): 162-163.
Ma Hongzhe. Research on the key technology of information security threats and defense in smart grid[J]. Information & Communications, 2017(12): 162-163(in Chinese).



刘吉臻

收稿日期: 2018-07-12。

作者简介:

刘吉臻(1951), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为智能发电理论与技术、发电过程建模与控制、工业过程测控理论与技术, ljz@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)