

综 述

智慧电厂与智能发电典型研究方向及关键技术综述

尹 峰, 陈 波, 苏 烨, 李 泉, 张 鹏

(国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘 要: 以数字化和自动化为基础的信息化与智能化技术发展为智慧电厂的建设创造了条件, 主要体现在大数据、物联网、可视化、先进测量与智能控制等技术在发电厂生产运行与管理维护中的系统化应用。智能巡检、智能检测与闭环优化、智能燃料、智能诊断、网源协调、决策支持、可视化仿真与运维辅助等是智慧电厂的典型技术研究方向, 部分关键技术正逐步形成应用成果。

关键词: 智慧电厂; 智能发电; 信息化与智能化; 技术方向; 典型应用

Discussion on Typical Research Directions and Key Technologies for Smart Power Plants and Smart Power Generation

YIN Feng, CHEN Bo, SU Ye, LI Quan, ZHANG Peng

(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The development of informatization and intelligent technology based on digitalization and automation provides the foundation for the construction of smart power plants by the systematic application of big data, Internet of Things, visualization, advanced measurement and intelligent control technology in power plant operation, maintenance and management. Intelligent inspection, intelligent detection and closed-loop optimization, intelligent fuel, intelligent diagnosis, grid and power coordination, decision-making support, visual simulation and auxiliary operation and maintenance are the typical research directions for smart power plants, and some of the key technologies are gradually becoming application results.

Key words: smart power plant; smart power generation; informatization and intellectualization; technical direction; typical application

0 引言

智慧电厂的本质是信息化与智能化技术在发电领域的高度发展与深度融合, 体现在大数据、物联网、可视化、先进测量与智能控制等技术的系统化应用, 主要特征是泛在感知、自适应、智能融合与互动化。在智能制造与智慧能源的发展框架下, 智慧电厂与智能发电技术得到了快速发展, 成为能源互联网技术发展的重要组成部分。智慧电厂也称为智能电厂或智能电站, 其技术核心是信息融合与智能发电技术, 目前在水电^[1]、

燃气轮机电厂及新能源电站^[2]均有不同程度的研究与应用, 智能核电概念也已提出^[3], 但范围最广、复杂程度最高的常规燃煤火电厂的智能化发展才是智慧电厂研究与应用的最重要领域, 以下主要就常规火力发电厂的智能化技术展开讨论。

智能发电是智能制造的一部分, 而智能制造则是中国国家发展战略《中国制造 2025》的主攻方向。智能制造的本质就是机器人, 通过人与智能化的检测、控制与执行系统实现对人类专家的替代, 体现在生产制造过程的柔性化、智能化和高度协同化, 将数据挖掘、遗传算法、神经网络和预测控制等先进的计算机智能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, 实现生产过程与管理决策的智能化^[4]。

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211DS15002U)

在发电厂智能化技术的系统性研究与应用方面,国内外都还处于起步阶段,国外研究重点更倾向于新能源发电,如旨在有效运用分布式发电资源的 VPP(虚拟电厂)技术^[5],可提高分布式发电的可控性。而对于常规火电厂,西门子、GE 等部分制造厂商,则将关注重点集中在区域数据共享与可视化辅助运维技术的应用方面,尚未有系统性成果见诸于公开文献。国内在技术体系方面的研究进展较快^[6-8],部分关键技术已逐步进入应用研究^[9-11],自主研发的技术进步显著。

1 智慧电厂的典型研究方向

随着电力转型发展与市场化改革的需要,清洁、高效、安全、电网友好型的智能发电技术是近阶段的重点研究方向,伴随先进检测与控制、人工智能、以及数据利用与信息可视化技术的快速发展,在以下的一些技术领域将首先获得应用性成果,推进火电厂的智能化进程。图 1 是智慧

电厂部分核心功能的简化拓扑结构示意图。

1.1 三维空间定位与可视化智能巡检

随着计算机运算能力与软件应用水平提高,大范围的三维空间设计建模成为可能。通过三维空间定位,实现设备、管道、仪表取样点及隐蔽工程信息可视化。图 2 为 DCS 监控系统与设备空间布局对应关联的意向图,可体验逻辑操作场景与实际物理场景信息互动的感受,将传统运行人员的操作界面在物理维度上延展,共享智能巡检系统的现场信息。

基于 WIFI 或 RFID 无线自组网技术的三维定位结合巡检人员智能终端,借助图像识别与无线通信技术,实时关联缺陷管理数据库,可实现现场设备的智能巡检与自动缺陷管理。借助设备与人员定位,还可同时实现智能安防与区域拒止等智能管理功能。在技术成熟时,借助各类型机器人的应用,可实现无人化的智能巡检方式。其中涉及的关键性技术还包括设备参数自动识别、

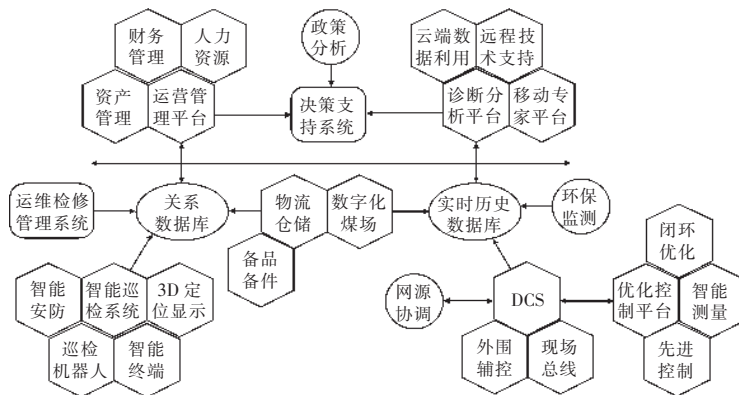


图 1 智慧电厂简化拓扑结构

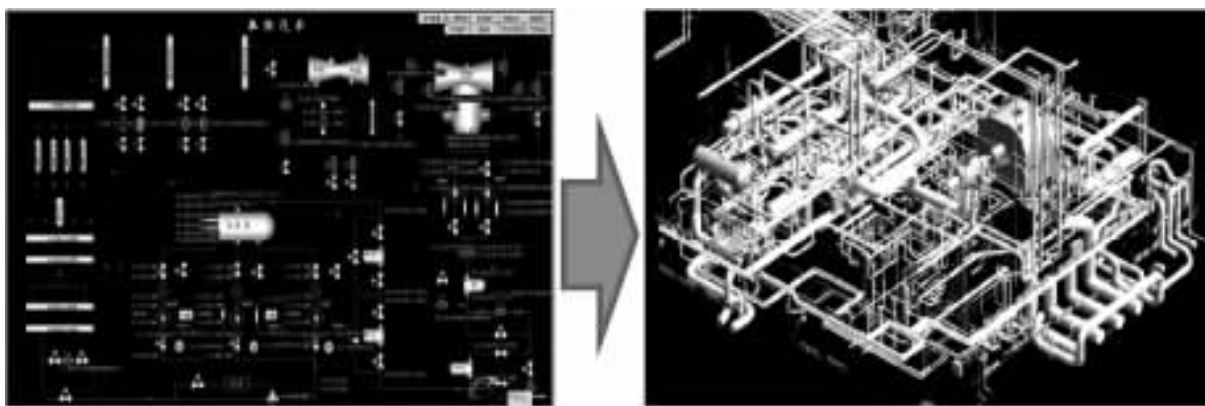


图 2 DCS 监控画面与巡检定位系统关联意向

信息可视化记录存取、异常数据实时归档、巡检人员实时定位、现场风险预警、数据加密传输等。

1.2 炉内智能检测与燃烧优化控制

近年来,基于光学图像、光谱、激光、放射、电磁、以及声学、化学的各种先进检测机理的炉内测量技术实用化研究进展较快,在炉内煤粉分配、煤种辨识、参数分布、排放分析等方面为多目标全局闭环优化控制创造了条件。同时随着计算机技术的快速发展,先进智能控制技术也逐步进入实用化阶段,伴随各类灵活可靠的优化控制平台载体的推广应用,电站控制参数的智能优化技术得到了快速的发展,并推动了 DCS(分散控制系统)的功能改进与能力提升。

通过系统性整合基于先进机理的检测技术、智能控制算法、软测量及智能寻优技术,实现燃煤锅炉炉内温度、氧量、一氧化碳浓度等燃烧参数空间分布的实时测量与自动调整、燃烧器煤种在线识别、风煤参数与布局自动配置、锅炉效率在线软测量、效率环保指标综合寻优、最优目标预测控制等技术手段,最终达到安全环保约束条件下锅炉燃烧效率的实时闭环最优控制。

1.3 数字化煤场与燃料信息智能互动

煤是燃煤电站的主要成本输入,煤场物理空间广,采制与管理工作量大,同时用煤种类繁多,变化频繁,配煤掺烧与适应性调整操作繁琐。利用图像识别与信息可视化技术可实现数字化煤场三维空间与时间动态的 4D 信息管理,智能优化煤场空间布局与运行计划。采用数据利用技术实现锅炉和煤场的智能信息互动与自动燃料配置,与燃烧优化控制系统实时关联,实现煤种的智能混烧。

1.4 信息挖掘与远程专家诊断预警

发电厂机组故障分析与操作记录文档是宝贵的信息资源,利用结构化存储与检索调用技术可以形成可用资源,结合语义识别等数据利用技术,关联机组运行的实时、历史数据,实现故障诊断与实时预警。同时利用远程专家 AR(增强现实)互动平台系统,引入云平台数据挖掘资源,可便捷实现跨地域的专家共享与数据共享。在厂内知识信息管理、技术监督远程数据平台、专家网络移动式互动共享平台等技术载体支撑下,利用数据挖掘与风险预测、实时风险预警设置、全局风

险预警设置等技术手段,实现区域或集团层面的设备状态智能管控系统。

1.5 网源协调结合与电力市场辅助决策

智能发电衔接智能电网体系,实现网源协调互动与策略最优。电力市场实施后,机组调峰调频功能都与发电厂效益相关,通过功能优化与效益寻优,使机组在竞价上网的决策中实现利益最大化。

系统整合调频调峰能力预测、调频调峰策略配置、节能调度、竞价上网效益寻优与 APS 快速启停等灵活发电技术,实现机组 AGC(自动发电控制)深度调峰全程智能控制、深度低频负荷快速提升、兼顾机组经济性的混合调频技术、AGC 指令节能分配、辅助服务与电量效益寻优等技术目标。

1.6 沉浸式仿真培训与 AR 辅助检修维护

在 VR(虚拟现实)技术发展逐渐成熟的前提下,可以逐步开展虚拟现实与增强现实在培训与作业中的应用研究,提升专业人员的培训感受,提高设备检修维护工作效率与操作规范性。设备虚拟拆解培训与检修操作可视化辅助技术在计算机运算能力足够支撑设备细节与流畅互动的情况下,对改善培训与检修质量所带来的效益是非常值得期待的。

2 智能发电技术的典型应用

2.1 基于高效节能目标的智能燃烧优化控制技术

利用高效节能控制策略与智能优化技术实现机组的经济运行是智慧电厂建设的首要目标。近年来,随着国家节能减排政策力度的持续加大,国内新建燃煤机组采用工艺改进的方法提升机组发电效率的努力已接近极限,相关的节能潜力已基本用尽,而随着风电、光伏等新能源发电容量的实质性增长,大量的调峰需求均需由煤电机组来承担,特别是在东部沿海经济发达地区,特高压区外来电占比很大,燃煤机组年平均利用小时数已从接近 6 000 h 下降到了 4 000 h 左右,大量机组处于非额定设计工况低负荷运行,难以保持最优的经济运行状态^[12]。而基于高效节能目标的智能燃烧优化控制技术正可发挥其优势,利用先进的检测技术与智能算法,在投资增加不多的前提下达到提升运行经济性的目标。

目前较为典型的基于煤种辨识的燃烧优化方案可通过以下技术路线实现(如图 3 所示)。

(1)通过煤质在线检测获得当前燃烧煤种的情况,根据煤种情况结合锅炉参数,采用软测量技术在线计算锅炉效率。

(2)以氧量、各类风门开度以及煤量分配等参数为输入,锅炉效率和 SCR(选择性氧化还原)入口 NO_x 含量等参数为输出,利用锅炉燃烧简化数学模型,通过模糊算法进行智能建模,获取机组的燃烧优化模型。

(3)采用免疫遗传、非线性规划等算法对优化模型进行智能寻优,获取最优的参数从而对机组进行燃烧闭环优化,不断提高锅炉效率。

(4)通过煤质在线检测获得各层燃烧器实时燃烧煤种,动态切换磨煤机煤粉细度和出口温度等重要参数,针对不同煤种调整设备状态,实现最经济运行。

2.2 基于深度调频与深度调峰的网源协调灵活性发电技术

网源的协同特性决定了电网的安全可靠必须以电源的稳定可控为基础,智慧电厂在利用智能化技术提升机组运行经济性的同时,也为在发电供给侧加强电网友好型发电技术研究提供平台,通过网源协调与灵活性发电技术的研究应用,提高发电供给侧响应电网调度的能力和灵活性。

在电网负荷与频率控制环节,发电机组的 AGC 与一次调频控制是电源为电网提供的主要

辅助服务功能。针对各种类型与容量的发电机组,研究与改善 AGC 调节性能与一次调频动作能力,是智慧电厂顺应市场化服务的重要需求,通过面向锅炉、汽轮机以及辅助系统的各种蓄能利用与平衡技术,提高机组负荷响应能力,实现快速可控的负荷与频率控制策略。同时采用机组群协同控制技术,使电源控制性能与电网控制目标合理匹配,集团或区域发电厂综合效益达到全局最优。

发电机组的深度调频与负荷快速控制技术可有效提高区域电网运行的容错性能与自愈能力。目前较为成熟的负荷快速控制技术只有 RUN-BACK 技术,在电源重要辅机故障时保障机组运行安全,减少负荷损失。在电源点出线发生故障时,FCB 功能可以快速切除机组负载,保持机组带厂用电运行,为迅速并网恢复线路运行提供保障,但该技术受机组设备能力与运行方式限制,仅有少量应用。另一项利用机组快速减负荷功能提高电网故障运行方式下局部线路输送限额的技术目前已有应用案例^[13],通过设计验证机组在规定时间内快速减负荷的能力,使机组在线路故障时的出力上限得到拓展。在大容量输电线路故障闭锁或大容量电源点故障跳闸的情况下,如何利用现有机组调节余量,快速升负荷支援电网的控制技术正在开展相关研究,这项技术的实现将最终为负荷快速控制技术带来对称的调节能力。

随着运行机组负荷率不断下降,电网越来越

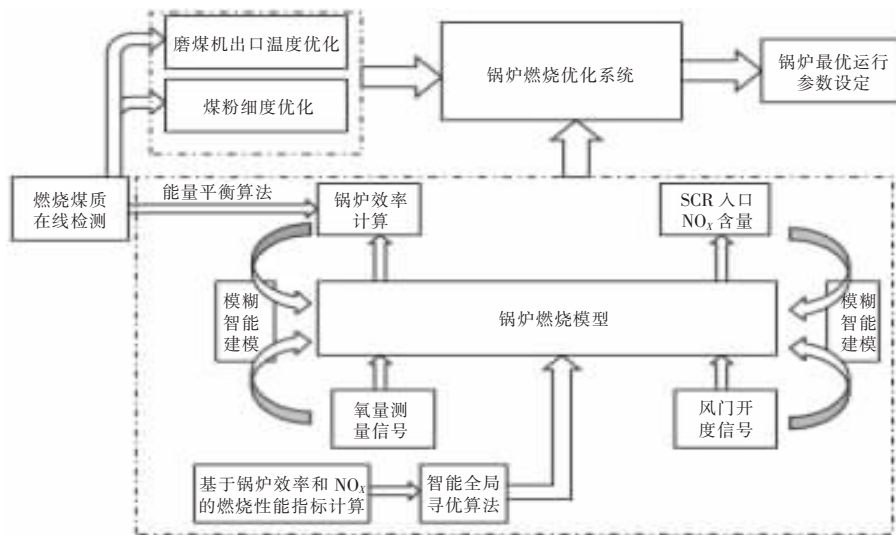


图 3 多目标智能燃烧优化控制方案原理

需要机组具备深度灵活调峰的能力。如果机组能深度调峰至 30% 额定负荷甚至更低时, 对机组而言可以减少调停次数, 对电网而言则能增加其备用容量, 提升电网的安全性。但该方式对机组辅机的正常运行是一个严峻的考验。尤其针对超临界机组而言, 除常规亚临界机组面临的低负荷稳定燃烧、环保装置低负荷投用等问题外, 还带来了诸如低负荷干态运行区间延伸、湿态协调运行方式等一系列的问题。因此通过采用双向解耦与多变量智能控制策略, 解决深度调峰过程中机组干态转换时机与过程控制问题, 可实现火电机组的深度调峰运行及控制过程优化。同时通过磨组智能启停控制技术实现火电机组 AGC 无断点智能连续运行, 可提高机组 AGC 深度调峰的工况适应性与智能化水平, 降低机组运行操作风险, 改善机组 AGC 运行可靠性与灵活性。

2.3 基于智能终端与机器人应用的智能巡检系统

发电厂智能巡检系统整合图像识别、非接触检测、多传感器融合、导航定位、模式识别、机器人应用等技术, 实现对发电厂设备的自主检测。智能巡检系统结构如图 4 所示, 主要由以下部分组成: 数据库服务器、图像识别及各种应用服务管理系统和移动智能终端。

智能巡检需要巡检设备在移动中处理数据和

交互信息, 因此稳定的无线网络也是必要的硬件基础。系统可采用多种形式移动智能终端, 包括手持工业巡检仪、智能采集终端、智能巡检机器人等。智能巡检机器人可用于全厂范围开阔平坦地带重要设备状态巡检, 对于智能巡检机器人不方便进入的狭窄空间, 可由巡检人员佩戴智能采集终端进入巡检。

通过关联实时数据与历史趋势可提高智能巡检的预知性与互动性, 巡检人员收集的现场设备运行状态和运行数据可为设备状态检修与在线评估提供有效数据支持, 及时安排相应的检修、维护和保养, 并通过数据的积累和挖掘为设备更新、选型作辅助决策。

为确保数据的安全性, 系统需要具有自动备份数据功能, 备份用户注册信息、设备台帐信息、历史缺陷数据等。通过与发电厂生产管理系统的各种接口, 实现与实时历史数据库、缺陷管理系统、台账管理系统等的互联互通。

2.4 数据信息挖掘与远程专家诊断技术

目前发电设备常规的监测手段均采用绝对值报警, 当运行参数超过设定值时产生报警提示, 因此发电设备状态检修仍基本上停留于事后处理, 这种单一的监测手段难以及时发现设备的早期征兆并对其发展趋势进行跟踪, 大大增加了设备故障最终导致被迫停机的概率。通过智能诊断

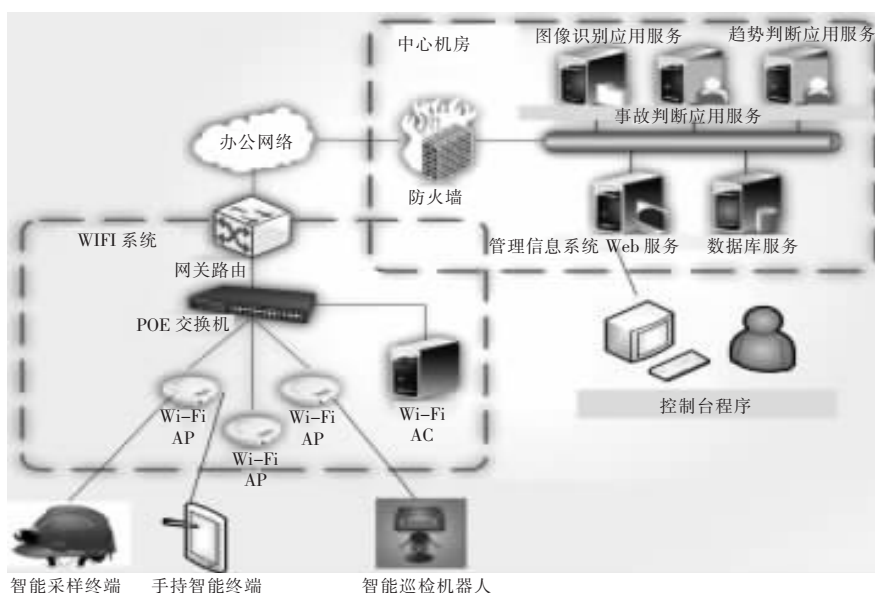


图 4 智能巡检系统原理结构

技术为机组运行提供预警信息,变被动检修为主动检修,变非计划停机为计划停机,避免设备问题或故障影响扩大,则能在节约生产成本,提高发电企业的市场竞争力上发挥很大的潜能。

通过构建集团级发电设备远程在线实时综合数据处理平台、建立集中式的设备诊断和故障预警中心,可实现发电厂设备的数据积累、信息挖掘与远程诊断技术应用^[14]。采用基于 SBM(相似性原理)的建模技术,实时分析运行测点数据的内在逻辑和相关性,建立与实际设备或部件相似的数学模型矩阵和每个测点信号的期望值。采集的设备实时运行数据与期望值实时比较,之间异度(差值)超出阈值范围时开始记录和辨识,对其动态变化过程在线展示,当达到显著异常时发出预警,并及时提醒维护人员进行设备维护。

通过建立远程诊断系统和专业分析队伍对数据的深度挖掘分析,让集团决策层及相关职能部门能够借助实时信息平台,及时掌控各发电厂机组设备的健康状况,识别潜在的系统风险,为指挥日常生产活动和设备故障处理提供辅助决策支持。同时,系统形成的检测诊断分析数据库可实现数据共享学习与故障模型辨识,为发电机组设备问题提供预警信息,提出预防性检修建议,减少设备异常扩大导致故障的风险,优化设备健康状况,可有效降低整个集团公司的生产成本。

2.5 智慧电厂的工控系统信息安全技术

工业控制系统的信息安全是保证设备和系统中信息的保密性、完整性、可用性,以及真实性、可核查性、不可否认性和可靠性等。工控信息安全技术的主要目的是为了保障智慧电厂控制与管理系统的运行安全,防范黑客及恶意代码等对发电厂控制与管理系统的恶意破坏和攻击,以及实现非授权人员和系统无法访问或修改发电厂控制与管理系统功能和数据,防止发电厂控制与管理系统的瘫痪和失控,和由此导致的发电厂系统事故或电力安全事故。

智慧电厂的工控信息系统安全规划^[15]主动适应“互联网+”、工业互联网、新电改等新形势业务发展以及新一代信息化应用需求,基于“可管、可控、可知、可信”的总体防护策略,全面提升信息安全监管预警、边界防护、系统保障和数据保护能力。

“可管”是指健全智能电厂信息安全管理机制,加强组织领导,建立健全安全防护管理制度,推进网络安全人才培养体系建设,强化内部安全专业队伍建设,常态化开展风险评估和内控达标治理工作。

“可控”是指加强网络边界安全防控,实施“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的防护原则,分区部署、运行和管理各类电力系统,同时按照等保要求区分系统安全域,各安全域的网络设备按该域所确定的安全域的保护要求,采用访问控制、安全加固、监控审计、身份鉴别、资源控制等措施加强边界安全。

“可知”是指基于大数据的信息安全事件深度分析、安全态势感知、智能预警等信息安全监控预警技术,实现对资产感知、脆弱性感知、安全事件感知、异常行为感知的能力,构建全方位安全态势感知体系。

“可信”是指按照国家信息安全等级保护和电力行业的安全要求,针对发电厂计算资源(软硬件)构建保护环境,加强智能电厂主机、终端、应用和数据的安全防护,采用相应的身份认证、访问控制等手段阻止未授权访问,采用主机防火墙、数据库审计、可信服务等技术,确保计算环境的安全。

3 结语

智慧电厂与智能发电技术是系统性渐进发展的技术,对于新建机组,在建设期就要提前规划同步实施,积累过程数据建立静态模型,通过数字化移交将模型数据完整转入实际商业运行维护,并在实际运行中完善运维动态模型,静态智能化模型数据和发电厂运行产生的动态信息相结合,形成发电厂运维所需的动态智能化模型,使发电厂生产过程处于安全经济环保最佳运行状态,与电网用户智能互动,使电能产品安全快速满足用户要求。智能化技术的发展将不断改变发电厂的传统面貌,其作为智能电网的有机组成部分,将为社会的持续发展提供坚实的动力。

参考文献:

- [1] 张家治.葛洲坝电站智能化建设的研究和实践[J].水电

(下转第 26 页)

- 站接地网的研究[J].华东电力,2010,38(8):1251-1254.
- [3] 王海鸥,林凌.变电站接地线在线监测系统的研究与开发[J].浙江电力,2015,34(6):24-27.
- [4] DL/T 5394-2007 电力工程地下金属构筑物防腐技术导则[S].北京:中国电力出版社,2007.
- [5] 刘纯,唐苇苇.基于 IEEE Std.80-2000 变电所接地网设计简析[J].水运工程,2013,(10):51-55.
- [6] IEEE Std 665-1995 IEEE Standard for Generating Station Grounding[S].USA:IEEE,1996.
- [7] 胡庆来,李汉峰.IEEE 接地设计标准与我国接地设计标准的异同分析[J].电力建设,2013,34(2):100-104.
- [8] GB/T 50065-2011 交流电气装置的接地设计规范[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [9] 周正一.海外高土壤电阻率地区火电厂接地方案研究[J].华电技术,2014,36(8):17-18.
- [10] 曹俊平,刘浩军,董雪松,等.1 000 kV 安吉变电站接地网接地特性参数的试验[J].浙江电力,2015,34(1):17-19.
- [11] 林幼晖.变电站接地系统的设计步骤[J].电力建设,2001,22(1):32-34.
- [12] DL/T 621-1997 交流电气装置的接地[S].北京:中国电力出版社,1998.
- [13] 王海欧,白金泉,陈群锋,等.基于无线传输技术的接地导通测试仪的研究与设计[J].浙江电力,2017,36(5):5-7.
- [14] 邓志刚.越南电站 EPC 项目设计图样审批管理[J].项目管理技术,2016,14(6):114-117.
- [15] 董芳华.CDEGS 软件在巴基斯坦某电站接地设计中的应用[J].人民长江,2012,43(24):78-82.

收稿日期:2017-08-07

作者简介:邓志刚(1988),男,助理工程师,从事国际电站工程建设管理工作。

(本文编辑:徐 晗)

(上接第 6 页)

- 站机电技术,2015,(7):1-13.
- [2] 张天文,沈道军,周承军,等.能源互联网之智能光伏电站建设与运维探讨[J].科技展望,2016,(32):4-6.
- [3] 我国首次启动智能核电工程 2017 年起全面应用[J].电力勘测设计,2014,(6):44.
- [4] 林汉川,汤临佳.新一轮产业革命的全局战略分析[J].学术前沿,2015,(6):62-75.
- [5] 陈春武,李娜,等.虚拟电厂发展的国际经验及启示[J].电网技术,2013,37(8):2258-2263.
- [6] 陈世和,尹峰,郭为民,等.智能电厂技术发展纲要[M].北京:中国电力出版社,2016.
- [7] 杨新民,陈丰,曾卫东,等.智能电站的概念及结构[J/OL].热力发电,2015,44(11):10-13.
- [8] 王曦钊,刘胜军,等.智能电站框架研究与信息化工程实践[J].电信科学,2016,32(4):181-185.
- [9] 吴国潮,滕卫明,等.智能化电厂建设中的问题与功能探讨[J].自动化博览,2016(8):82-85.
- [10] 陈世和,张曦.基于工业 4.0 的智能电站控制技术[J].自动化博览,2015(9):42-50.
- [11] 李泉,尹峰,陈波.超临界机组主汽温模型预测控制研究[J].浙江电力,2016,35(10):40-42.
- [12] 尹峰.基于火焰光谱检测的炉内煤种辨识与锅炉优化控制技术研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [13] 赵洪宇,尹峰,顾正皓,等.电网线路过载速减机组出力控制[J].中国电力,2011,44(10):64-68.
- [14] 吴国潮.设备故障预警系统的设计与实践[J].自动化与仪表,2015,(9):10-13.
- [15] 陈春霖.面向智能电网的信息安全主动防御保障体系建设[J].中国信息安全,2016,(11):54-57.

收稿日期:2017-08-21

作者简介:尹 峰(1972),男,高级工程师,主要从事发电自动化技术研究与工程应用。

(本文编辑:徐 晗)

建设智能电网 优化能源结构