

我国风电高效利用技术趋势及发展建议

石文辉¹, 白宏¹, 屈姬贤¹, 王伟胜¹, 黄其励²

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192;

2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要: 我国风电发展取得了举世瞩目的成绩, 风电装机规模和发电量仅次于煤电和水电, 正在实现从补充电源向替代电源的转变, 未来有望在能源发展中占主导地位。为实现未来我国高比例新能源发展目标, 促进风电可持续发展, 本文围绕实现我国风电高效利用, 阐述了我国目前风电利用现状及存在的问题, 从大规模风电集群控制与优化调度、风电综合利用、多能互补利用、分布式接入与控制等几个技术方向, 提出了未来我国风电高效利用的技术趋势, 从风电与大能源电力系统发展、市场机制建立、行业管理和技术标准制定等方面提出促进风电高效利用的相关建议。

关键词: 风电高效利用; 优化调度与控制; 多能互补系统; 风电综合利用; 分布式接入与控制

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A

Technology Trend and Development Suggestions for Wind Power Efficient Utilization in China

Shi Wenhui¹, Bai Hong¹, Qu Jixian¹, Wang Weisheng¹, Huang Qili²

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: The development of wind power in China has obtained remarkable achievements in the past several years. Now the installation scale and generation capacity of wind power in China are just smaller than that of coal power and hydropower. Wind power is changing from supplementary power to alternative power, and is expected to play a leading role in energy development in the future. In order to achieve a high proportion of renewable energies, and promote sustainable development of wind power, this paper focuses on improving wind power utilization efficiency in China, and analyzes the current situation and existing problems of wind power utilization in China. From the aspects clustering control and optimal dispatch of large-scale wind power, wind power comprehensive utilization, multi-energy complementary utilization, and distributed integration and control, this paper proposes the technology development trend of wind power in China, and relative recommendations in wind power and the large energy power system development, market mechanism establishment, industry management and technical standard formulation are put forward.

Keywords: wind power efficient utilization; optimal dispatch and control; multi-energy complementation system; wind power comprehensive utilization; distributed integration and control

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-05-25

通讯作者: 石文辉, 中国电力科学研究院有限公司, 高级工程师, 主要研究方向为风电、光伏等新能源发电并网技术;

E-mail: whshi@epri.sgcc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

近几年,我国风电发展迅速,装机规模不断增大 [1,2]。截至 2017 年,我国风电累计装机容量已连续 8 年位居世界第一,全国累计并网容量约为 1.64×10^8 kW,与 2007 年相比,增长了约 29 倍。2017 年全国风电上网电量达 3.057×10^{11} kW·h,占当年全部发电量的 4.8% [3],风电已成为我国第三大电源。风能开发与利用是我国能源转型的核心内容和应对气候变化的重要途径。

我国风能资源集中地区电源结构以火电为主,受本地负荷水平以及常规机组调峰能力等因素影响 [4],消纳空间有限。随着风电的快速发展,风电消纳矛盾逐渐显现。2011 年,甘肃弃风电量达到 1.04×10^9 kW·h,之后弃风情况加剧,2016 年弃风电量攀升至 4.97×10^{10} kW·h,弃风率达 17.1% [5],弃风问题引起社会各界广泛关注。随后,国家出台一系列政策措施促进风电的高效消纳,弃风现象有所缓解。2017 年全国弃风电量为 4.19×10^{10} kW·h,弃风率达 12%,比 2016 年减少了 5%,但消纳难题仍然是制约我国风电行业持续健康发展的重要因素之一。

我国政府承诺到 2020 年、2030 年非化石能源消费占一次能源消费比重将分别达到 15% 和 20%。国家能源局于 2016 年 11 月发布的《风电发展“十三五”规划》指出,到 2020 年年底,风电累计并网装机容量将达到 2.1×10^8 kW 以上,年发电量达到 4.2×10^{11} kW·h,约占全国总发电量的 6%。此外,根据国家可再生能源中心发布的《中国风电发展路线图 2050》,2050 年风电装机将达 1×10^9 kW,能够满足全国 17% 的电力需求 [6]。未来我国风电行业仍将维持较高速度增长。由于风能资源的随机波动性,发电设备的弱支撑和低抗扰性,随着风电在电力系统中比例越来越高,风电等新能源的高效消纳和电力系统安全稳定运行都将面临更大挑战。

为推进和保障我国风电行业持续规模化健康发展,实现未来我国风电高比例发展目标,使风电成为对我国能源结构调整、应对气候变化有重要贡献的新能源,亟需解决风电高效消纳利用难题。

二、我国风电利用技术现状及存在的问题

为促进风电的高效利用,过去几年间我国多措

并举,取得了一定的成绩,但在风电并网运行、风电多种利用、多能互补利用、分布式开发利用等方面仍存在一些问題。

(一) 风电并网运行

在风电功率预测方面,国内高校和科研机构在风电功率预测领域开展了大量研究工作,针对我国风电发展模式和特点,从超短期、短期、中长期等多时间尺度建立了较为完善的风电功率预测体系。预测模型涵盖基于多数据源的统计方法 [7],基于微尺度气象和计算流体力学的物理方法 [8],并创造性地提出自适应组态组合预测方法 [9],能够充分利用碎片化的多元历史数据,结合局地气候特征,自适应选择多样本空间下的最优耦合方式,有效提高了预测精度和算法的普适性。目前,我国已自主研发出电网侧和电站侧的风电功率预测系统,并在主要风电并网运行省区实现了应用覆盖。但在复杂地型、极端天气以及海上风电功率预测等方面,预测技术和方法仍需不断完善,功率预测也以确定性预测为主。

在风电集群控制方面,研发了以公共连接点电压稳定为目标的风电场电压无功综合控制系统;研制了风电场有功协调控制系统,已成功应用于甘肃电网,对该地区电网调度部门提高风电的管理和控制水平及风电利用率具有显著意义。国内研究机构在 IEC 61850 的基础上,开展了基于 IEC 61400-25 的风电场综合监控技术研究,并基于成熟的变电站自动化系统平台技术,开发了可扩展性较强的风电场综合监控系统平台。总体来看,我国对于新能源电站有功、无功控制技术研究已经积累了一定经验并研发应用了控制系统,有功控制研究主要集中在控制策略、控制方法评价等方面,在大型新能源电站多工况自适应调频控制、基于多源数据融合的大型新能源电站有功分层控制技术方面研究较少;无功控制研究集中于风电机组的控制策略、无功的优化选址以及风电场当地控制策略等方面;研发应用的控制系统存在不同风电厂家接口不规范、在线控制调节响应不一致等问题。此外,风电场/集群主动支撑电网运行控制性能还需提升。

在风电优化调度方面,采用的主要调度模型和方法包括:考虑自动发电控制(AGC)备用的优化调度方法、考虑风电接入系统的旋转备用容量优化

调度方法和以风险概率为约束的新能源随机优化调度方法等 [10,11]。国内已开发了新能源优化调度支持系统,并应用于我国 23 个省级(区)的电力调度控制中心。但在适应大规模风电集中送出的调度运行技术和促进风电消纳的电力市场及辅助服务技术等方面仍需加强。

相对于陆上风电而言,我国海上风电的研究工作明显滞后,海上风电并网的影响、高压直流送出、远程集群控制等还处于研发初级阶段,相关技术标准和规程规范等还在制定中。

(二) 风电多种利用

在风电制氢方面,目前国外多个国家均投入大量资金用于风电制氢相关技术研究和示范工程建设。其中,美国能源部“Wind2H2”计划研究内容包括:可再生能源功率控制、氢储能技术、风-氢系统容量化配置、风电上网和电解水制氢的功率分配问题、技术经济分析与成本效益分析、电解技术对风-氢系统的影响及系统的规模化和产业化。国内风电制氢系统关键技术研究还处于起步阶段,包括了风电场耦合制氢系统、风电制氢在海上风电场环境下的可行性等,并开展了多项风电制氢项目示范,风电制氢为风电的综合利用提供了一个方向,需要突破风电间歇性功率波动对制氢系统的影响问题、风电耦合氢能系统的集成控制和优化运行以及氢气的储运技术 [12] 等,另外其经济效益问题也有待进一步深入研究。

在风电供暖方面,国内已有部分风电开发企业开展了小规模风电供暖示范工程,风电供暖理论也在完善之中,主要技术难点在于热-电协调优化调度。现有电采暖运行模式多采用绑定结算模式,未考虑协调优化和调度控制。文献 [13] 提出了电储热-弃风联动的实时运行模式,该模式基于风电历史运行和弃风数据,优化出电储热最优电加热功率和储热容量,在运行时调度机构基于风电功率预测和电力系统实时运行状态,评估得到日前和实时弃风电力曲线,并下发电储热;在结算时实时记录风电场弃风电力和电储热用电电力,确保电储热用的是该风电场的弃风电,维护各方利益。国内在热-电协调优化与调度策略研究方面也已开展了弃风供热项目试点。

目前在考虑风电消纳的热-电联合运行监控系

统研发方面,已有一些实际应用的软件系统,例如吉林电网供热机组在线实时监测系统、江苏电网供热机组可调出力监测系统等。但是,热-电联合运行监控软件的开发和应用还处于初级阶段,大多数监控系统还处于开发研究和试验阶段。

(三) 多能互补利用

多能互补是按照不同资源条件和用能对象,采取多种能源相互补充,以缓解能源供需矛盾,合理保护和利用自然资源,同时获得较好的环境效益的用能方式 [14,15]。风光水气火储等不同电源具有时空互补特性,《电力发展“十三五”规划》明确指出,多能互补是提高风电等新能源消纳能力的重要手段,包含小型的多能互补系统及电力系统级多能互补两个方面。

目前,我国在小型含风电的互补发电系统应用较多的是风水互补发电和风光互补发电,运行的互补发电系统有:村级风光互补发电站、用于气象站的风能太阳能混合发电站、太阳能风能无线电话离转台电源系统等,这些发电系统可以解决一些偏远地区的供电、供能问题。

在电力系统级的多能互补方面,国内提出了基于可靠性和设备调控能力的电力系统灵活性指标 [16],采用确定性的电力系统规划准则,提出了侧重于风光互补的多点布局规划设计方法等 [17],分析了风电与其他电源联合运行的可靠性和经济性等,并开展了国家风光储输等多项多能互补集成优化工程的建设。目前还缺乏考虑多种电源复杂特性的电力系统灵活性分析方法,电网调度与控制尚未充分考虑多种电源、多时间尺度的全局优化与实时控制,现有控制系统难以充分利用动态变化的调峰能力来最大化消纳风电等新能源。

(四) 分布式开发利用

分布式开发利用是风电除大规模集中开发远距离外送消纳外的另一种形式。一般通过 35 kV 及以下电压等级接入电网,位于用户附近,以就地消纳为主,并采用多点接入,统一监控的并网方式。国内风电分布式开发利用尚处于示范应用阶段,落后于国外风电大国。目前已建成示范工程,但大多沿袭集中式风电场开发经验或没有充分考虑当地配电网承载能力,带来了投资较高、影响电网和用户供

电质量等问题。

分布式风电的关键技术主要有适用于分布式利用的资源评估技术、优化规划技术、功率预测技术、信息采集与监控技术等。在资源评估方面，风电分布式开发靠近用户侧，需要考虑障碍物的影响，同时风电分布式开发地理位置较为分散，不可能每个开发地点都安装测风塔，因此分析风电分布式开发的固有特点，研究综合利用远距离测风塔、气象站及卫星气象数据的风电分布式开发的风能资源评估方法，可以为风电分布式开发的前期规划奠定基础。在功率预测方面，国内目前基本都是针对大规模集中式风电场，在分布式风电出力预测方面还需要进行深入研究，提高预测精度。此外，国内对风电分布式开发的并网规划技术、信息采集与监控技术研究较少 [18]。

微电网是分布式风电应用的有效形式之一。近几年，我国建起数个以风电为主、多能源互补的分布式微电网系统，如以大型风电机组为主的分布式智能微网示范项目——江苏大丰商业园区分布式微电网示范项目，为园区提供了 37% 的电力供应；舟山东福山岛风光储柴微网发电系统，全岛负荷用电基本由风电等新能源提供。独立供电系统在不同运行方式下的电能质量能够达到国标要求，为偏远地区供电提供了一种新模式。但目前存在系统双向互动、优化运行等方面的技术瓶颈。

三、未来我国风电高效利用技术趋势

大力发展风电等新能源，是构建我国清洁低碳、安全高效的能源体系的必由之路。为支撑未来我国风电的大规模开发和高效利用，需要不断完善大规模风电并网运行技术、市场机制下的风电多能互补以及分布式利用等技术，不断探索风电多种利用形式，顺应“互联网+”趋势，研究建立基于大数据技术的辅助风电运行管理平台等。

（一）安全可靠的大规模风电并网运行技术

1. 风电大规模并网集群控制与优化调度技术

我国风能资源与负荷中心逆向分布的特点，决定了未来我国风电仍以远距离大规模送出并网为主。风电大规模集群并网控制技术将向智能化、自动化方向发展。通过建成大规模风电集群控制技术

支持系统，做到基于多源数据融合的大型新能源电站有功分层控制，实现风电集群控制的智能化、自动化，进一步提高大型风电基地的运行控制水平。通过发展风电主动支撑及协调控制技术，实现风电并网从被动适应到主动支撑的转变。

风电功率预测是实现优化调度的基础，功率预测技术还需补充和完善概率预测和误差评估体系。同时建立适用于我国气候和地形特点的数值天气模式和风能资源评估软件，发展多时空尺度、多预测对象的新一代功率预测方法，进一步提升新能源资源评估观测以及发电功率预测的分辨率和精度。风电优化调度将向不确定性调度、在线风险预警、主动防御方向发展。通过突破风电与电化学储能、抽水蓄能、热力、油气等多种形式储能优化配置及联合运行调度技术、风电基地特高压跨区外送调度运行关键技术等，最终建立适合多种能源应用的市场机制下的新能源优化调度体系，实现最大化消纳风电，在提高风电等新能源利用率的同时降低运行成本。

2. 大规模海上风电并网技术

海陆并举已成为我国风电发展的必然趋势。随着未来我国海上风电规模的不断增加，海上风电并网运行的相关问题也将逐步凸显，这必将成为行业关注的热点和研究的重点。直流汇集及并网技术以其独特的优势将成为未来海上风电并网的主要选择之一。

通过开展适应于海上风电规划技术、资源评估与预测技术以及大型海上风电基地交直流混联汇集及送出的直流电网拓扑优化、协调运行控制、故障保护等关键技术研究，全面建成大规模海上新能源接入直流电网协调运行和控制保护技术体系，突破交直流混合电网接口技术瓶颈，实现海上风电接入电网，促进海上风能资源的规模化高效利用。

（二）高效率低成本的风电多种利用技术

1. 经济高效的风电制氢技术

未来，在风电制氢方面，随着新型低成本储氢材料以及规模储氢技术的进步，风电制氢储运问题有望得到有效解决，制氢成本有望越来越低，为风电制氢的产业化发展提供了可能。

未来，通过突破高电压大功率氢储能系统的协调控制技术、氢储能系统成套技术方案、风电-氢

储能联合优化运行控制调度系统以及配合风电并网接入的能量管理策略与协调优化控制策略, 破解风电制氢技术瓶颈, 使风电制氢逐渐成为风电开发利用的重要形式, 实现规模化应用, 提高风电消纳能力。

2. 市场机制下的风电供暖技术

风电供暖技术发展的关键在于突破热-电联合优化运行策略与控制技术, 通过统筹考虑大容量储热单元流程结构、运行特性、集成设计原理和优化方法、大容量储热单元优化配置和运行机制, 深入挖掘城市供热系统调峰能力, 突破热-电联合优化运行策略与控制技术, 促进风电供热规模化发展, 提高风电利用率。

(三) 能源互联下的多能互补技术

在未来能源互联网发展背景下, 多能互补技术为风电的高效利用提供了一种很好的选择, 其关键在于利用不同能源资源在能量/功率上的时空互补特性, 通过多能源电力系统的协调规划、协调优化调度与控制体系建立多能源互补体系。

通过分析包括风光互补、风水互补、风火互补、微电网多能互补等方式的不同运行特性, 开展含分布式风电的多能互补开发利用形式及优化规划技术研究, 在此基础上充分考虑我国资源中心和负荷中心逆向分布以及我国能源结构的特点, 通过多能互补发电系统的体系结构配置技术, 以及考虑多种电源、多时间尺度的互补发电系统的能量管理控制技术, 充分挖掘系统调峰能力, 实现互补发电设备的动态优化组合, 降低系统运行成本, 提高整个能源系统的运行效率。

(四) 分布式接入与控制技术

有序接入、协调控制和能量优化管理是未来风电分布式利用的关键问题, 通过分布式发电运行集中监视与运行控制技术、基于区域分布式发电的虚拟电厂的能量管理技术, 以及多微电网的集群协调控制技术等方面研究, 实现未来分布式供电与微电网向即插即用、高效运行、灵活互动方向发展。

研究分布式发电运行集中监视与控制技术, 建立相应的集中监控平台和运行管理系统, 采取多种形式在分布式发电与监控中心之间建立稳定的通信联系。在对分布式发电进行远程监控的基

础上, 通过多元分布式发电接入的双向自适应保护及控制技术、基于多分布式发电/储能及微电网的供电网络快速重构技术、多能联供交直流混合的协调控制与智能化调度技术、分布式发电与微电网群控群调技术和多元化用户互动技术等, 破解多元分布式发电安全接入与微电网控制难题, 实现分布式能源灵活高效利用, 有力支撑我国分布式能源发展。

(五) 基于大数据的风电辅助支撑技术

未来, 随着“云计算”“互联网”“物联网”的快速发展, 大数据引起了越来越多的人关注, 风电行业应顺应未来科技发展趋势, 充分利用在风电场的设计、运行、调度等各个方面增长迅速的风电大数据, 建立包含气象影响要素、风电机组类型、风电场运行、调度运行等信息的完备风电数据结构。

通过建立风电并网消纳大数据技术支持平台、风能资源评估与风电功率预测大数据分析平台、风电运行对环境生态影响的大数据分析平台, 以及风电大数据运维管理平台等, 在全社会共享风电开发与运行信息资源, 做到风电场海量数据在线稽查、风电实时消纳全景展示、弃风精细化统计等, 从而优化风电运行, 推进能源市场化改革, 促进风电的高比例、安全、可靠、高效运行。

四、相关建议

为促进风电的高效利用, 除在技术上进行不断创新突破之外, 还需要注重风电和其他能源的协调规划、风电等新能源激励政策、消纳市场机制和技术标准体系等的不断完善。提出如下四点建议。

(一) 大力推进风电与大能源电力系统共赢发展

在发电侧做到一体化协同发展, 在发展集中式风电基地同时, 重视分布式风电的发展; 在发电装机总量增加同时, 加快电源结构调整和储能技术的发展; 用能产业布局要与能源资源禀赋特点结合。为有效支撑上述工作, 需要高度重视能源电力行业统一规划, 强化区域能源规划, 统筹常规能源电源与风电等新能源电源的统一、协同规划布局, 实现电源与电网的协调发展。

(二) 建立均衡发展的风电等新能源激励政策体系

建立涵盖包括发电、并网、用电在内的完整的激励政策体系。在电源侧，加强调峰能力建设，加快完善火电机组灵活性改造和参与调峰的补偿政策。在电网侧，在突破大规模风电场集群控制能力的基础上，加快跨省跨区通道建设，扩大新能源配置范围，统筹发挥大电网配置及平衡能力。在用户侧，推进电能替代，兼顾分布式发展，用市场办法引导用户参与调峰调频、主动响应新能源出力变化，健全鼓励用户购买新能源的电价政策。

(三) 加快建立完善风电等新能源消纳的市场机制

强化风电等新能源优先消纳。省内优先调度新能源，打破省内火电发电计划；打破省间壁垒，区域内实行跨省辅助服务。加快构建全国统一电力市场。构建以中长期交易为主、临时交易为补充的交易体系。启动跨区跨省现货市场。放开电力用户跨省跨区购买新能源的选择权。尽快完善市场规则、新能源交易机制。建立新能源接受省与输出省利益补偿机制。鼓励用户积极参与电力需求侧响应和市场交易。研究完善上网侧峰谷分时电价机制。将新能源上网电价与政府补贴分离，上网电价部分通过市场方式定价，补贴部分通过政府定价。

(四) 完善风电行业管理和技术标准规范体系

建立统一的风电发展管理体系，重点整合各方面的国家资源，开展国家风电发展战略、规划和扶持政策的设计，建立部门间综合协调机制，统筹电网、发电、气象、技术研发、规范标准、装备制造等各个部门，协调资金和技术力量等资源的分配，负责重要工程的组织与实施，为风电发展创造良好的发展环境。其次，政府应在每五年发展规划中，结合风电技术的发展变化，开展一定规模的先进技术示范项目，展示技术、资源、电网与市场的有效融合。

完善中国的风电标准、检测和认证体系。首先，不断完善风电机组、风电场标准、检测和认证体系。其次，修订中国现用的国际电工委员会（IEC）等标准，使之符合中国风电资源和环境条件。同时，随着风电利用形式和策略的多样化，相应标准需要及时更新。此外，制定与之对应的标准、设计和认证指南作为标准实施的补充，为风电设备研发及认证

工作提供具体的实施办法。最后，建立与国际接轨的检测和认证体系，完成必要的基础设施建设，逐步推行对整机及关键零部件的强制性检测和认证。

五、结语

本文阐述了目前我国风电利用方面的现状及存在的问题，并提出了未来风电高效利用的关键技术：大规模风电并网集群控制与优化调度技术、大规模海上风电并网技术、风电综合利用技术、能源互联网下多能互补技术、即插即用灵活控制的分布式接入技术等。最后从风电与大能源电力系统发展、市场机制建立、行业管理和技术标准制定等方面提出了促进风电高效利用的相关建议。

参考文献

- [1] 李俊峰, 耿丹. 全球及我国风电现状与展望 [J]. 中国电力企业管理, 2013, 4(3): 14-18.
Li J F, Geng D. Wind power current status and trend of the world and China [J]. China Power Enterprise Management, 2013, 4(3): 14-18.
- [2] 王伟胜. 科技创新支撑新能源发展 [N]. 科技日报, 2015-9-16(03).
Wang W S. Scientific and technological innovation supporting the development of renewable energy [N]. Science and Technology Daily, 2015-9-16(03).
- [3] 中华人民共和国国家能源局. 2017 年风电并网运行情况 [EB/OL]. (2018-02-01) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm.
National Energy Administration of the PRC. Wind power grid operation in 2017 [EB/OL]. (2018-02-01) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm.
- [4] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
Shu Y B, Zhang Z G, Guo J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [5] 中华人民共和国国家能源局. 2016 年风电并网运行情况 [EB/OL]. (2017-01-26) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm.
National Energy Administration of the PRC. Wind power grid operation in 2016 [EB/OL]. (2017-01-26) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm.
- [6] 王仲颖, 时璟丽, 赵勇强, 等. 中国风电发展路线图2050 (2014 版) [R]. 北京: 国家可再生能源中心, 2014.
Wang Z Y, Shi J L, Zhao Y Q, et al. China wind roadmap 2050 (2014 edition) [R]. Beijing: China National Renewable Energy Center, 2014.
- [7] 王勃, 冯双磊, 刘纯. 基于天气分型的风电功率预测方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(1): 93-98.

- Wang B, Feng S L, Liu C. Study on weather typing based wind power prediction [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(1): 93–98.
- [8] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(2): 1–6.
Feng S L, Wang W S, Liu C, et al. Study on the physical approach to wind power prediction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(2): 1–6.
- [9] 王铮, Rui P, 冯双磊, 等. 基于加权系数动态修正的短期风电功率组合预测方法 [J]. *电网技术*, 2017 (2): 500–507.
Wang Z, Rui P, Feng S L, et al. Short-term wind power combination forecasting method based on dynamic coefficient updating [J]. *Power System Technology*, 2017 (2): 500–507.
- [10] 李丰. 考虑大规模风电接入系统的发电优化调度模型及方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学(博士学位论文), 2014.
Li F. Study on optimal generation scheduling models and methods of large-scale wind power integrated system [D]. Beijing: North China Electric Power University (Doctoral dissertation), 2014.
- [11] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 基于风电功率概率预测和运行风险约束的含风电场电力系统动态经济调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(16): 9–15.
Liu D W, Guo J B, Huang Y H, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system based on wind power probabilistic forecasting and operation risk [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(16): 9–15.
- [12] 叶海钧. 风电制氢-燃料电池耦合微网系统的分层控制技术及其工程实现 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2016.
Ye H J. Hierarchical control and its project implementation of a wind-hydrogen-water-electricity hybrid energy system [D]. Hangzhou: Zhejiang University (Master's thesis), 2016.
- [13] 王跃峰, 礼晓飞, 唐林, 等. 电、热等多种能量形式的协调优化与调度策略研究 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2017.
Wang Y F, Li X F, Tang L, et al. Research on coordinated optimization and dispatching strategy of various energy forms in electricity and heat [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2017.
- [14] 张平. 地区电网风水互补特性研究 [J]. *云南电力技术*, 2017, 45(1): 67–69.
Zhang P. Study on wind power-hydropower complementarity characteristics in regional power grid [J]. *Yunnan Electric Power*, 2017, 45(1): 67–69.
- [15] 蔡国伟, 孔令国, 杨德友, 等. 大规模风光互补发电系统建模与运行特性研究 [J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 65–71.
Cai G W, Kong L G, Yang D Y, et al. Research on modelling and operation characteristics analysis of large-scale wind & light complementary electricity-generating system [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(1): 65–71.
- [16] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估 [J]. *电网技术*, 2015, 39(6): 1672–1678.
Li H B, Lu Z X, Qiao Y, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(6): 1672–1678.
- [17] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 53–58.
Zhang S X, Li K, Cheng H Z, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations [J]. *Automation of Electric Power System*, 2015, 39(8): 53–58.
- [18] 祁和生, 胡书举. 分布式利用是风能发展的重要方向 [J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(2): 173–181.
Qi H S, Hu S J. Distributed application is an important direction for wind energy development [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(2): 173–181.