

基于能源转型的中国特色电力市场建设的 分析与思考

陈国平, 梁志峰, 董昱

(国家电网有限公司, 北京市 西城区 100032)

Analysis and Reflection on the Marketization Construction of Electric Power With Chinese Characteristics Based on Energy Transformation

CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu

(State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100032, China)

ABSTRACT: With the continuous deepening of China's energy clean transition and the acceleration of power market construction, it is necessary to combine the development needs and actual national conditions to fully stimulate the market's competitive vitality and build a power market with Chinese characteristics on the premise of ensuring the safe operation and green development of the power grid. This paper summarized the needs and trends of China's energy development, analyzed the changes of power system characteristics and the impact of power market operation under the new situation. On the basis of summarizing the previous practice and achievements, it studied the challenges faced by China's power market construction and proposed the principle of energy market construction with Chinese characteristics and several key issues.

KEY WORDS: energy clean low-carbon transformation; Chinese characteristic electricity market; top-level design; hydroelectricity and clean energy; ubiquitous internet of things in electricity

摘要: 随着我国能源清洁转型的不断深入和电力市场建设的加快推进, 需要结合发展需要和实际国情, 在保障电网安全运行和绿色发展的前提下, 充分激发市场竞争活力, 构建具有中国特色的电力市场体系。该文总结我国能源发展的需求和趋势, 分析新形势下电力系统特性变化及电力市场运作的影响, 在总结前期实践与成果的基础上, 研究我国电力市场建设面临的挑战, 提出基于能源转型的中国特色电力市场建设的原则和若干关键问题。

关键词: 能源清洁低碳转型; 中国特色电力市场; 顶层设计; 水电和新能源; 泛在电力物联网

0 引言

当前, 我国正处于能源电力清洁低碳转型的关

键时期。习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上明确提出了“四个革命、一个合作”的能源安全新战略^[1]。中发9号文明确要求推动电力行业发展方式转变和能源结构优化, 提高清洁能源发电和分布式能源系统发电在电力供应中的比例^[2]。我国在推动能源绿色低碳转型方面已经取得了显著成效。截止2018年底, 我国电源装机中非化石能源装机占比达40%, 其中水电、风电和太阳能发电装机分别达到3.5亿、1.8亿和1.7亿kW, 可再生能源装机规模和发展速度均居世界第一。随着新能源的快速发展, 电力系统电力电子化特征显著, 对电网调节能力、抗扰动能力和稳定形态等产生较大影响, 电网运行特性正发生深刻变化。

可再生能源快速发展为满足持续增长的用电需求和节能减排做出了重要贡献, 但距离清洁能源转型发展目标和要求仍有较大差距。按我国《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》确定的发展目标, 到2030、2050年, 非化石能源占一次能源消费比重将分别达到20%、50%, 可再生能源在电力生产中占据主导地位。预计到2050年之前, 我国风电和太阳能发电装机将继续保持快速发展态势。

与此同时, 我国电力市场改革稳步推进, 在促进资源优化配置, 提高效率效益方面发挥了较大作用。从国际来看, 英国^[3-4]、欧盟部分国家^[5-6]和美国多个州^[7-8]等都根据各自实际情况建立了不同模式的电力市场, 为我国电力市场建设提供了有益参考。但是电网规模不同, 资源禀赋不同, 国外经验不完全适合我国发展需求。在能源电力转型的大背景下, 不能直接照搬国外电力市场建设模式。可再

生能源持续高速增长要求我国能源电力体系进行重大变革,更好地发挥体制机制优势,满足负荷和可再生能源发展需求,迫切要求加快研究和构建适合中国国情的电力市场。

在我国电力市场建设方面,部分研究针对中长期购电^[9-10]、辅助服务^[11]、电动汽车^[12-13]、需求侧响应^[14]等,提出了可行的技术路线。目前大多数研究聚焦于电力市场设计具体环节,对我国电力市场的顶层设计,尤其是能源清洁低碳转型背景下中国特色电力市场建设的研究较少。

本文总结了我国能源电力转型发展趋势,分析了水电和新能源运行特性对电力市场的影响,介绍了促进能源清洁转型的市场化建设相关实践和我国电力市场建设面临的挑战。最后,提出能源清洁转型下电力市场建设的基本原则,对中国特色电力市场建设若干关键问题进行了总结。

1 我国能源电力转型发展趋势

当前我国电网络局是由资源与负荷逆向分布、负荷快速发展及电源调节能力不足等因素客观决定的。随着特高压输电技术不断提升,远距离资源配置开发很好地满足负荷需求,依托体制机制优势实现了资源大范围配置。

1.1 我国能源电力现状

1.1.1 电源发展现状

2011年以来,我国新能源装机快速增长,国家电网经营区风电装机年均增长率22%,光伏装机年均增长率73%。新能源快速发展使电源结构发生了较大变化,国家电网经营区火电装机占比由“十二五”初的77.1%逐步下降至61.1%,新能源装机占比由4.8%逐步上升至22.3%。

新能源装机增长迅猛,由于新能源出力波动性较大,缺乏转动惯量以及调频、调压能力不足,导致系统抗扰动能力和调节能力下降,使电力系统稳定特性更加复杂。

1.1.2 电网发展现状

2011至2018年,我国电网建设稳步增长,220kV及以上输电线路年均增长率6%,变电容量年均增长率9%,截至2018年底,我国220kV及以上输电线路总长达到73.3万km,变电容量达到40.2亿kVA。

我国能源和负荷的逆向分布,决定了必须发展远距离、大容量输电技术。目前,我国各区域电网通过高压直流输电实现全面互联,七大区域电网通

过23回直流和1回特高压交流形成全面互联格局,跨区输电能力约1.2亿kW。

1.1.3 负荷发展现状

近年来,在全球经济增长普遍放缓的形势下,我国用电水平仍保持高速增长。2018年我国全社会总用电量达到6.85万亿kW·h,同比增长8.5%。2019年最高日用电量已超239亿kW·h,最大用电负荷超过10亿kW。

分布式电源、微电网、电动汽车充电桩、储能设施等大量接入,使得负荷侧特性发生较大变化。负荷侧有源化,日间腰荷与夜间低谷持平;负荷类型多样化,对频率、电压的影响日益显著;市场、技术等手段使需求侧具备一定控制能力。

1.2 未来发展趋势

未来我国电力需求仍将保持较高速增长。作为世界上最大的发展中国家,我国目前仍处于并将长期处于社会主义初级阶段,经济增长潜力巨大;考虑能源清洁低碳转型发展等因素,电力需求在很长时间内仍将保持较高速增长,电力增速高于能源需求增速。

在“清洁低碳、安全高效”能源发展战略指引下,新能源也将保持高速增长。据初步分析测算,2020、2035年,全国电源装机达到20.9亿、35.9亿kW,其中新能源装机为4.9亿、13.8亿kW,装机占比提升至23.7%、38.3%。

未来我国跨省区输电规模将进一步扩大。风能资源80%以上集中在“三北”地区,太阳能资源85%集中在西部、北部地区,水电资源80%集中在西南地区,用电负荷70%以上集中在我国中东部地区。能源资源与负荷中心逆向分布的天然禀赋,决定了要实现清洁转型并满足负荷中心电力供应,须进一步加大跨省区输电规模。

2 水电和新能源运行特性对电力市场影响分析

电力市场建设必须有利于推动能源清洁低碳转型,以促进可再生能源消纳为前提。同时,可再生能源的运行特性也给电力市场建设带来诸多困难。水能、风光资源远离用电负荷中心,水电和新能源发电能力与负荷需求不匹配,来水集中在汛期,新能源大发集中在冬春季,时空不均衡特点突出。下文从空间和时间两个维度分析水电和新能源运行特性对电力市场建设带来的影响。

2.1 水电运行特性对电力市场影响分析

2.1.1 水电集中在西南地区

1) 从资源和装机分布看，水能资源地域分布极不均衡，主要集中在西南，其中四川、重庆理论蕴藏量约 1.5 万亿 kW·h，约占国网公司经营区总蕴藏量的三分之一。目前西南水电总装机 8710 万 kW、占比 38%，华北地区水电装机占比不足 3%。

2) 从电量分布看，2019 年国网经营区西南水电发电量 3614 亿 kW·h，占比 44%，接近西南地区全社会总用电量。

2.1.2 各流域水电年内不均，水库调节能力不足

1) 从来水情况看，我国受季风气候影响，降水和径流在年内分配不均，我国各流域来水主要集中在汛期 6—8 月，绝大部分河流汛期水量占全年的 70%~80%，并存在丰水年和枯水年差别，如图 1 所示。



图 1 国网区域主要水电站所在流域汛期分布

Fig. 1 Flood season distribution of the main hydropower stations in SGCC

2) 从电力电量看，来水分布极不均衡，枯期发电能力不足，汛期发电富裕。四川地区夏季丰水期水电出力远超当地负荷，枯期水电日均出力不足汛期的 1/3。2019 年四川地区汛期平均日发电量 11.5 亿 kW·h，接近平均日用电量的 2 倍，如图 2 所示。

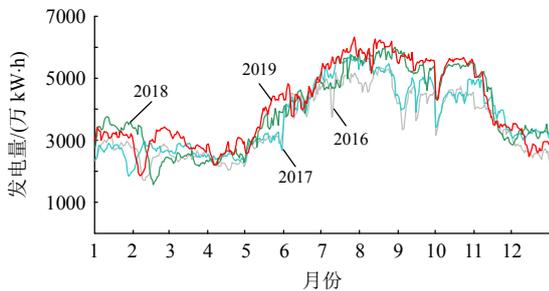


图 2 2016—2019 年四川水电逐日平均出力过程

Fig. 2 Average daily output of Sichuan hydropower from 2016 to 2019

3) 从调节能力看，年调节及以上水库比例较低，水电站调节性能整体不强，难以准确预测中长期发电量，如表 1 所示。国网经营区内月调节及以下水电站装机占水电总装机的 55%，其中径流式占 31%。

表 1 各流域年调节水电站情况

Tab. 1 Annual regulation of hydropower stations in each basin

流域	蕴藏量 年电量/ (亿 kW·h)	多年调节水电站		年调节水电站	
		装机/ (万 kW)	占比/ %	装机/ (万 kW)	占比/ %
长江流域	24336	620	4.3	4254	29.3
黄河流域	3794	128	5.0	427	16.7
东北诸河流	1455	205	30.6	240	35.8
东南沿海诸河	1776	235	12.1	55	2.8
西北内陆诸河	3634	110	14.1	107	13.7

2.1.3 水电参与电力市场面临的困难

1) 我国水电承担综合利用任务较多，部分水库承担防洪、灌溉等任务，发电的灵活调节能力受到限制，影响市场竞争力和履行合同能力，减少水电参与市场的收益。

2) 各流域梯级电厂多，投资主体多，同一梯级水电站水力联系密切，其发电量相互制约，参与市场竞争时将会相互影响。为保障流域梯级水电的水能优化利用和上下游电站不同主体之间的和谐竞争，通过优化市场规则引导各类水电有序参与竞争。

3) 我国西南地区大量水电需要外送消纳，中长期交易固化了部分输电通道与火电容量，水电在市场竞争中可能难以获得更大范围的电量空间，影响水电消纳。

2.2 新能源运行特性对电力市场影响分析

2.2.1 新能源主要集中在“三北”地区

1) 从资源分布和特性看，我国“三北”地区 70m 高度 200W/m² 以上风能资源技术可开发量占全国的 80%以上，西部地区太阳能满发小时 1400h 以上的技术可开发量接近全国的 90%。“三北”区域气候和地形比较复杂，资源波动性、随机性明显，但存在着一定的互补性。通过资源互补，可以缓解新能源的随机性、波动性，有效降低风电出力峰谷差。如图 3 所示。

2) 从新能源装机和发电量看，截至 2019 年底，

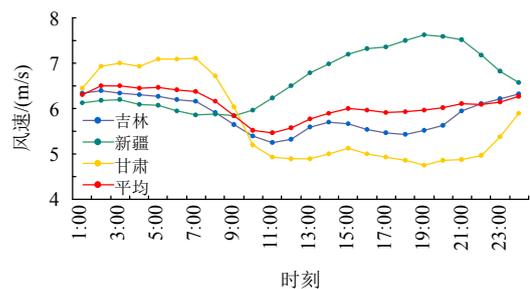


图 3 不同省份日均风资源情况

Fig. 3 Daily wind resources in different provinces

新能源装机主要集中在“三北”地区，风电、太阳能装机分别占电网公司的75%和58%，发电量占比为77%和64%。

2.2.2 新能源出力波动大，对电力电量平衡支撑能力不足

1) 从年度和月度电量安排来看，新能源长期电量预测准确度低且电量贡献度低，难以准确预留新能源消纳空间。风电和光伏中长期电量预测时间尺度长，需综合考虑历史多年的资源统计变化规律和来年的气候演变情况，预测难度大、准确度低。以2019年国网经营区各省区风电电量预测结果为例，省级电网风电年发电量预测偏差最大达到35%，且大部分省区预测偏差都超过10%，远高于负荷电量的预测偏差。同时，新能源表现为典型的“大装机、小电量”特征，如表2所示。以2019年为例，国网公司经营区风电、光伏发电装机占到总装机的10.9%、11.4%，风电、光伏发电量仅占总发电量的5.7%和3.5%。

表2 2019年国网公司经营区新能源发电量占负荷用电量比

Tab. 2 Ratio of new energy generation to load consumption in 2019

月份	风电	光伏	新能源
	占负荷比/%	占负荷比/%	占负荷比/%
1月	5.21	2.18	7.39
2月	6.11	2.59	8.70
3月	6.97	3.95	10.93
4月	7.45	4.06	11.50
5月	7.69	4.44	12.12
6月	5.16	3.91	9.07
7月	3.82	3.60	7.42
8月	4.12	3.59	7.71
9月	4.83	4.05	8.88
10月	6.35	3.63	9.98
11月	6.83	2.92	9.75
12月	6.28	2.56	8.84

2) 从日前发电计划安排来看，新能源在用电负荷尖峰时刻电力贡献度低且存在预测偏差，难以精准安排次日开机方式。新能源在负荷尖峰时刻往往出力不足。图4、5为国网负荷创新高日的风电、光伏出力情况，可见早高峰时段风电出力仅为负荷的2.8%，晚高峰时段光伏出力基本为零。

3) 从日内新能源出力特性来看，其波动性随着装机增加而增大，对电力系统调节能力要求越来越高。2019年，国网公司新能源出力日内最大波动

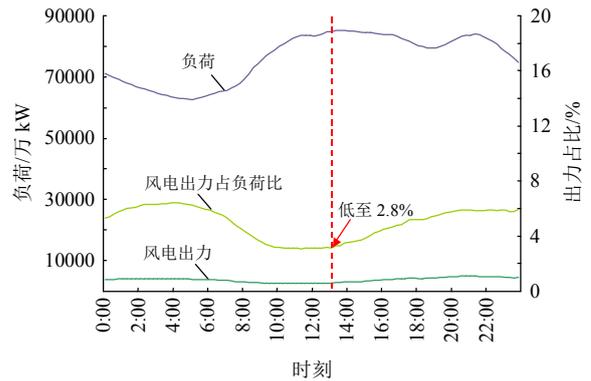


图4 负荷创新高时风电出力情况

Fig. 4 Maximum load daily wind power output and load situation

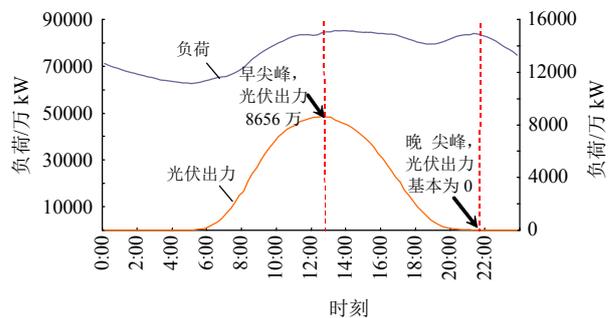


图5 负荷创新高时光伏出力情况

Fig. 5 Maximum load day PV output and load situation

达11307万kW，占负荷的19.1%，如表3所示。其中，西北电网新能源出力日内最大波动占负荷比例高达48.9%，全年出现了11次由于新能源日内出力剧烈波动导致全网备用不足引起的灵绍地区特高压直流降功率运行情形，区内新能源平衡手段已用尽。

同时，分布式电源快速发展进一步加剧了日内负荷波动幅度和速率，出现午间和夜间双低谷现象。在午间时段，分布式光伏发电与负荷变化趋势相反，加剧了负荷的变化速率，进一步增加了电网调节难度。以安徽为例，春季午后时段，分布式光

表3 2019年新能源日内出力最大波动

Tab. 3 Biggest fluctuation in the new energy in the day in 2019

地区	日内情况		
	最大波动/万kW	占负荷比/%	
国网	11307	19.1	
区域	西北	3435	48.9
	东北	1652	31.7
	华北	4663	26.7
省级	蒙东	618	95.7
	宁夏	1036	94.2
	甘肃	983	73.0
	青海	785	90.7

伏大发情况下,负荷午间低谷为1610万kW,低于夜间低谷,负荷平均变化速率约为分布式光伏小发状态下负荷平均变化速率的2.6倍(见图6)。

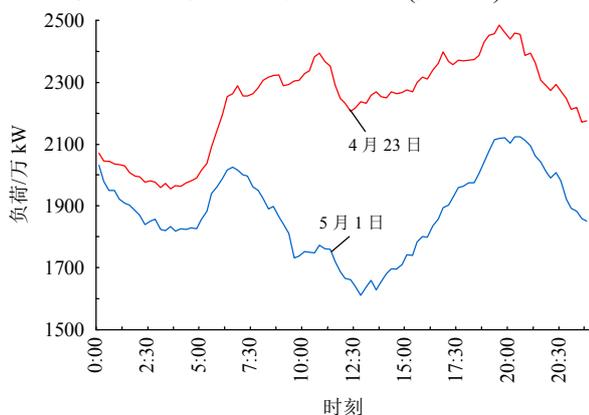


图6 安徽分布式大发与不发时全网用电负荷曲线

Fig. 6 Power load curve of the whole network in Anhui with distributed power generation and non-issue

2.2.3 新能源参与电力市场面临的困难

1) 从月度来看,新能源电量预测偏差较大,导致在月度安排中,所预留的新能源消纳电量空间偏差较大,然而月度电量偏差部分主要依靠省内市场调节,加剧了省内市场调节压力。

2) 从日来看,当前新能源功率预测准确度(绝对偏差)偏低,难以精确确定日前出力曲线和开机方式,同时在次日负荷尖峰时刻,新能源支撑能力较差,出力曲线和开机方式安排均面临严峻考验。

3) 从日内来看,随着新能源装机不断增加,特别是分布式电源的快速发展,新能源的波动性和随机性对电网调节能力提出更高要求,需要设计更加合理的市场规则调动电源和负荷积极参与电力系统调峰,提高新能源消纳水平。

3 促进能源清洁转型的市场化建设实践

近几年来,围绕国家“构建清洁低碳、安全高效能源体系”要求,国家电网有限公司结合电力市场建设,积极探索新能源的市场化消纳方式,开展了大量实践。

1) 不断完善电力市场基本规则体系。结合我国资源配置需要和各地电力市场建设实际,深入研究全国统一电力市场建设方案,提出了“统一市场、两级运作”的市场模式和发展路径。

2) 依托全国统一电力市场,在省间高效利用特高压大电网输电能力,在省内积极组织新能源参与市场化交易,挖掘省内消纳空间,新能源交易规模快速增长。2019年,新能源省间交易电量

880亿kW·h,同比增长21.8%,新能源省内交易电量达到3690亿kW·h以上,同比增长约16%,西北、东北地区通过天中、祁韶、灵绍等跨区输电通道送华北、华东、华中新能源电量697亿kW·h,同比增长38.6%。加大新能源替代燃煤自备电厂的交易力度,2019年清洁能源替代交易达到430亿kW·h以上,同比增长约35%。

3) 中长期交易与现货交易相结合,全力促进清洁能源消纳。开展全周期电量交易,以年度交易为基础,实现电量交易的全周期管控。持续开展跨省区富裕可再生资源现货交易,构建“竞价撮合+余量出清”的市场体系,积极扩大交易范围,协同执行最优路径输电价格方案,促进更多交易达成。2019年新能源现货交易电量累计达53亿kW·h,有效缓解了“三弃”矛盾。

4) 不断丰富新能源市场化交易品种,积极研究新能源优先替代、自动出清、打捆交易和利益调节机制,利用市场化措施促进新能源消纳。规范年度及以上、月度、日前和日内等交易周期内省间交易的交易品种、组织方式和工作流程,建立实施细则的跟踪评估和动态完善机制,确保新能源送得出、落得下。

4 我国电力市场建设面临的挑战

可再生能源装机容量快速增长,给电网安全稳定运行和新能源消纳带来了极大挑战,同时对电力市场深化建设提出了更高要求。

4.1 电网安全风险突出

近年来,燃煤等常规机组被直流电源、新能源等“新型电源”大量替代,对电网安全造成不利影响^[15],主要表现在:其一由于缺乏转动惯量以及调频、调压能力不足,导致系统抗扰动能力和调节能力下降,故障期间调节资源不足,安全防御难度加大;其二“新型电源”耐受电压、频率波动能力低于传统机组,发生连锁性故障的风险突出,系统“宽频”稳定形态与传统的工频暂态、电压和动态稳定形态叠加,使系统稳定特性更加复杂;其三“新型电源”对系统动态调节能力、电网运行控制评价体系建设等工作提出了更高要求。因此,须进一步研究如何依托电力市场建设,建立合理的辅助服务费用分担和成本补偿机制,有效调动各类电源和用户的积极性,确保电网安全可靠运行。

4.2 电力供应保障难度加大

可再生能源发电严重依赖自然资源,其出力具

有明显的季节性、随机性和波动性,特别是风力、光伏等发电在电力负荷高峰时刻出力不足,其反调峰特性对系统调峰能力提升、平衡能力建设等工作提出了更高要求^[16]。2019年国家电网范围内12个省级电网的新能源日出力最大波动超过本省电网日平均负荷的30%,最高达98%。因此,需进一步研究如何依托电力市场建设,建立日前交易调整及补偿机制,确保在日前和实时运行中为可再生能源发电留足消纳空间和配合备用容量,实现可再生能源有效消纳及电力安全可靠供应。

4.3 可再生能源消纳矛盾凸显

我国新能源在时间上的“反调峰”特性,在空间上与负荷的逆向分布^[17],以及电网断面约束限制等因素均对消纳带来了影响。水电来水集中在汛期、风力发电集中在春秋两季,在时间维度上亦存在不平衡现象。新疆、甘肃、四川等部分地区消纳空间不足,消纳矛盾突出,对跨区通道能力建设和运行管理等工作提出了更高要求。因此,电力市场建设需进一步研究如何建立完善跨区跨省交易机制,通过大范围优化配置资源,保障可再生能源的充分消纳。同时,需进一步研究如何有效落实可再生能源优先发电权、中长期交易及消纳责任权重,对中长期交易开展校核,以确保可再生能源有充足的消纳空间。

4.4 多方利益主体矛盾突出

一方面,不同机组发电成本不同,在承担不同社会责任的同时也要满足提高可再生能源利用率的要求;另一方面,市场化主要目的是考虑成本最低原则。因此部分机组无法在市场中获得充足利益,参与市场积极性不足。大型水电以流域梯级开发为主,同一梯级水电站的水文联系密切,其发电量受到相互制约^[18-19],参与市场竞争时会互相影响。应研究建立合理运行协调和收益调整机制,以保障各方利益和电网安全稳定运行。

5 中国特色电力市场建设基本原则

十九大报告提出的构建清洁低碳、安全高效能源体系,是我国能源电力发展的核心任务和行动纲领。我国电力市场化建设必须紧密围绕这一核心任务和行动纲领,以有利于能源清洁转型,服务于清洁能源发展和消纳为前提。

5.1 必须有利于推动能源清洁低碳、安全高效转型发展

我国能源资源与用电需求逆向分布,决定了大

规模可再生能源电力必须通过远距离输送的方式实现大范围消纳。国家电网立足我国基本国情,利用特高压输电技术,构建了覆盖全公司范围的互联大电网,实现了资源的大范围优化配置、大规模可再生能源消纳^[20]。电力市场建设应充分发挥我国特高压输电技术领先优势,进一步完善可再生能源跨省交易机制,解决可再生资源、负荷分布不均衡的问题,推动能源清洁低碳转型发展。

5.2 必须有利于提高电力安全保障水平

预计2035年我国跨区跨省送电能力将由当前的2.6亿kW提高到5亿kW以上。同时,新能源装机和电量占比的快速提升,直接影响电力安全保障水平,必须通过基础理论和机制创新、技术进步加以解决。因此,需要构建合理的电力市场机制,发挥引导和推动作用,比如研究如何利用市场化手段增加传统火电灵活性改造的积极性、吸引储能投资、实现可控负荷等,优化电源结构,提高电力系统调节能力,更好地适应可再生能源发展和高效利用,确保电力安全^[21]。

5.3 坚持用市场化手段推动可再生能源大范围优化配置

为完成国家能源生产和消费革命战略目标,我国可再生能源将持续保持高速发展态势,大规模可再生能源须通过远距离电力输送方式实现大范围配置。需要通过市场化建设,推动打破省间壁垒,构建跨省区和省内统筹协调的市场化机制,并通过政府的有形之手,利用市场外的宏观政策加以引导,更好地发挥市场调节作用,使电力市场建设符合国家经济建设发展的大趋势,从而保障可再生能源大范围优化配置,满足国家能源清洁低碳转型发展要求。一方面,中长期市场应有效落实清洁能源优先发电及中长期交易电量,通过资源大范围优化配置,保障清洁能源的充分消纳^[22]。另一方面,电力现货市场应充分考虑可再生能源随机性和波动性,建立灵活的交易调整机制,保障完成清洁能源消纳目标。

5.4 深挖市场潜力以推动能源高效转型

能源清洁转型是庞大的系统性工程,需要充分发挥市场对资源配置的决定性作用,共同推进能源生产和消费模式变革。需要通过合理构建电力市场机制,充分挖掘全网消纳空间,激励传统火电进行灵活性改造,释放电源侧调节能力,改变用户用能习惯,扩大需求侧响应规模,发挥电网基础作用,促进清洁能源消纳,推动能源高效转型^[23]。

5.5 协调多方诉求以推动行业共同发展

能源清洁转型关乎电网企业、发电企业、电力用户、制造商等多方利益，应合理分配利益，吸引社会投资和各方共同参与，合力推进。因此，需要合理构建电力市场机制，通过市场化手段，协调各方诉求，推动能源电力行业共同发展。

6 中国特色电力市场建设关键问题

6.1 进一步完善满足能源清洁低碳和安全高效转型的电力市场化顶层设计

近年来我国电力市场化改革效果显著，但改革进程不断深化的过程中也暴露出一些问题，归根结底是由于目前我国电力市场化建设顶层设计不完善。电力市场化建设的顶层设计首先应立足我国基本国情，满足能源清洁低碳转型和电力安全生产要求，开展具有中国特色的系统性顶层设计；其次，须开展满足国家能源清洁转型要求的市场化建设路径研究；最后，充分发挥“三统一”体制优势，坚持“统一规划、统一调度、统一管理”原则，有序协调电源与电网发展，利用市场化手段引导传统电源提高自身调节能力，统筹全网调峰资源，提升大电网平衡能力，实现清洁能源大范围消纳和电网安全运行。

从实施路径来看，在初期阶段，可采取“统一市场，两级运作”运作模式，明确省间、省内交易定位，处理好各市场成员在两级市场的衔接，在交易时序和空间、安全校核及阻塞管理等方面做好统筹，兼顾省间资源的优化配置及省内平衡市场的安全稳定。在中期阶段，随着发用电计划放开比例逐步放开，省间资源配置能力提升，大范围资源配置需求不断增加，省间交易根据各省发、用电情况，并兼顾全网发用电平衡、省间联络线输送能力进行优化出清。在成熟阶段，随着发用电计划完全放开，省间与省内交易同步开展，实现一级运作的全国统一电力市场，并适时开展容量交易、输电权交易。

6.2 充分利用市场属性发现电力商品价格

电力商品的价格发现是电力市场设计的核心内容。近年来，我国电力市场化改革加快推进并取得积极成效，但仍存在交易和价格规则不尽合理，价格监管有待加强等问题，尤其是可再生能源占比逐步提高，亟需通过市场发现风电、光伏等在电力系统运行中的真实综合成本，建立可再生能源与常规电源协调发展的新格局。

通过建立充分竞争的电力市场，利用以市场发现价格、以价格引导电力资源配置的手段，实现上网电价由市场决定，进而传导至用户侧，实现发用两侧的资源最优配置，促进可再生能源消纳和社会福利最大化。在发电侧，促使降低发电成本、提高效率、优化电源结构和布局，也可以形成能够客观反映发电的真实成本，通过价格信号，引导电源投资建设，推动风电、光伏有序开发，与系统其它电源协调发展。在用电侧，通过价格手段优化用户的用电习惯，引导用户参与负荷侧响应，有利于电力系统安全经济运行。

6.3 加快研究基于泛在电力物联网的市场化建设方案

2019年初，国网公司提出“三型两网、世界一流”的战略目标，其中建设泛在电力物联网是核心任务。结合我国电力市场化改革背景，须加快开展基于泛在电力物联网的市场化建设方案研究^[24]。构建基于泛在电力物联网的电力市场，将有利于推动供给侧结构性改革、能源革命、优化市场流通和市场全息感知，能够有效激发市场主体活力，促进多元化主体广泛联系、良好互动，提高市场资源配置效率，提高能源商品流通效率，提升社会对清洁安全电力的获得感，是国家治理体系的重要组成部分并有助于治理能力现代化目标的实现。

第一，有利于推动供给侧结构性改革。微服务架构、分布式存储、云计算等先进技术的发展应用，为电力交易平台支撑百万级用户广泛接入创造了条件。通过将互联网思维与传统电力市场深度融合，利用大数据、人工智能等信息技术，高效、准确、智能识别并分析用户需求，实现供给侧和需求侧的快捷对接和精准匹配，有利于提高资源配置效率，促进供给侧结构性改革。

第二，有利于推动能源革命。一方面，可再生能源的高比例接入对电力系统运行的灵活性提出了更高要求。另一方面，储能、需求侧响应、电动汽车、分布式能源等新兴主体快速发展，对电力系统运行产生的影响日益显著。通过设计合理的市场机制和商业模式，结合区块链、虚拟电厂等先进技术，能够引导新兴主体积极参与市场，促进源网荷储良好互动，有效保障电网实时供需平衡，促进能源清洁低碳转型目标的实现。

第三，有利于优化市场流通。先进信息通信技术与电力交易平台的深度融合，能够为客户提供个性化定制服务和精准高效的信息发布，使海量发电

侧和用户侧资源“直接对接”成为可能,减少交易中间环节,降低交易成本。同时,基于泛在电力物联网的电力市场为广大客户提供了完善的信用体系保障和结算资金支持,能够实现能源流、信息流、资金流的高效畅通,有效提升了市场流通效率。

第四,有利于市场全息感知。电力交易平台集合了广泛市场主体的海量数据,通过应用数据挖掘、人工智能等先进技术,对交易数据开展多维度量化统计分析,能够帮助政府有关部门实时了解用能、供能及相关制造产业供需形势,并结合其他行业统计数据,为国家产业政策制定和宏观经济调控提供有力支撑。

6.4 推进多类型能源结构的竞争性电力市场建设

我国目前采用节能经济调度方式,通过清洁能源优先发电计划管理等确定发电次序,通过标杆电价对清洁能源优先发电量进行结算。电力市场化建设进程中,逐步形成由市场供需和边际成本决定市场价格的机制,通过竞争方式安排各类机组的发电次序,取消发电量计划管理制度,推进多类型能源结构的竞争性电力市场建设。

与传统能源相比,清洁能源在发电边际成本上有明显优势,风电、光伏等新能源的发电边际成本很低^[25]。另一方面,清洁能源容量成本较高,如何设计市场机制,保障清洁能源优先并网和消纳。

6.5 促进省间大范围资源优化配置和电力消纳

为促进风能、太阳能等清洁能源开发利用,须建立相互开放的、跨省的全国性电力市场。以跨区跨省交易平台为突破口,以放松价格管制为前提,大力推进市场交易机制建立,涉及省份的发电、用户等市场主体直接进入平台开展报价的自主交易,打破省间壁垒。加快解决中长期交易与现货市场统筹协调问题。在此基础上,随着跨省区骨干电网、省内网架和低压配电网、微电网的多层次电网体系的建成,逐步实现各省电力交易的开放与融合,形成覆盖更大范围的多层次电力交易平台,支撑电力资源的宏观优化配置和微观市场主体自主交易。

6.6 加强省间输电中市场电成分和优先发电成分的协调

随着市场化电量规模的扩大和优先发购电比例的不断增长,直接交易与清洁能源争抢输电通道矛盾突出,常规电源对输电通道利用最大化和清洁能源对通道利用不确定性之间的矛盾加大。

电力市场化的建设需要制定完善的清洁能源消纳相关规则,合理确定优先发购电比例,明确清

洁能源消纳有关的电量预留、辅助服务补贴标准等,逐步完善促进清洁能源消纳的市场化机制。

6.7 探索引入容量市场和完善辅助服务市场

电力市场化建设和清洁能源大范围消纳要以保障电网的安全稳定运行为前提。从国内现状和最新国际趋势来看,随着清洁能源发电比重持续增加、煤电逐步转为提供调峰、备用服务,我国现行的一部制电价制度的局限性日益凸显,必须尽早考虑探索建立多部制电价机制,或其它形式的容量和辅助服务市场机制。

探索引入容量和辅助服务市场和价格机制,既有助于改变传统火电行业的规模扩张驱动和发展模式,更加注重提高电力灵活性,也将促进传统电源和清洁能源通过应用新技术提高发电控制能力、提供辅助服务,缓解风光水火矛盾。

7 结论

在习近平总书记构建“清洁低碳、安全高效”能源体系的思想指导下^[26],建立中国特色电力市场,必须立足于基本国情,以保障电力安全供应为前提,以系统性的市场顶层设计为指导,以促进能源清洁转型为目标,建设多类型能源结构的竞争性电力市场。

未来的电力市场将依托泛在电力物联网,提高市场的公开度和透明度,便于政府监管,促进国家治理能力现代化,给予用户充分的选择权,极大提高用户的获得感,进一步减少中间环节,提高能源效率,促进资源优化配置和可再生能源消纳。本文提出的相关原则与关键问题对我国能源清洁转型下的电力市场的建设具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 习近平在中央财经领导小组第六次会议上的讲话[N]. 北京:人民日报,2014.
Xi Jinping's report at the 6th meeting of the Central Leading Group on Finance and Economic Affairs[N]. Beijing: People's Daily, 2014(in Chinese).
- [2] 中共中央国务院.关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)文[EB/OL].北京:中共中央国务院,(2015-03-15). <https://www.ne21.com/news/show-64828.html>.
The CPC Central Committee and the State Council. Opinions on further deepening power sector reform No. [2015][EB/OL]. Beijing: The CPC Central Committee and the State Council, (2015-03-22). <https://www.ne21.com/news/show-64828.html>(in Chinese).

- [3] 侯孚睿, 王秀丽, 锁涛, 等. 英国电力容量市场设计及其对中国电力市场改革的启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 1-7.
Hou Furui, Wang Xiuli, Suo Tao, et al. Capacity market design in the United Kingdom and revelation to China's electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 1-7(in Chinese).
- [4] Department of Energy & Climate Change. Planning our electric future: a white paper for secure, affordable and low-carbon electricity[R]. Ireland: TOS, 2011.
- [5] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892.
Bao Minglei, Ding Yi, Shao Changzheng, et al. Review of Nordic electricity market and its suggestions for China [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4881-4892(in Chinese).
- [6] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及对中国电力市场模式的启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 2-9.
Li Zhu, Pang Bo, Li Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 2-9(in Chinese).
- [7] 马莉, 范孟华, 郭磊, 等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.
Ma Li, Fan Menghua, Guo Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9(in Chinese).
- [8] Federal Energy Regulatory Commission. State of the markets report 2018[EB/OL]. Federal Energy Regulatory Commission, (2019-04). <https://www.ferc.gov/CalendarFiles/20190418105357-A-3-report.pdf>.
- [9] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 电力市场下长期购电方案及风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 116-122.
Zhou Ming, Nie Yanli, Li Gengyin, et al. Long-term electricity purchasing scheme and risk assessment in power markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 116-122(in Chinese).
- [10] 徐帆, 谢旭, 施磊, 等. 电力中长期市场基数偏差电量处理方法分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 186-191.
Xu Fan, Xie Xu, Shi Lei, et al. Analysis on settlement method for unbalanced base generated energy in medium- and long-term power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 186-191(in Chinese).
- [11] 董力, 高赐威, 喻洁, 等. 考虑中长期电量合约分解的调频备用市场机制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 61-66, 74.
Dong Li, Gao Ciwei, Yu Jie, et al. Frequency regulation reserve market mechanism considering decomposition of medium-term and long-term electricity contract[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 61-66, 74(in Chinese).
- [12] 武小梅, 谢旭泉, 林翔, 等. 电动汽车提供备用服务的地区电力市场模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 71-76.
Wu Xiaomei, Xie Xuquan, Lin Xiang, et al. Local electricity market model considering reserve service provided by electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 71-76(in Chinese).
- [13] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-162.
Wang Xian, Zhang Huajun, Zhang Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-162(in Chinese).
- [14] 沈运帷, 李扬, 高赐威, 等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 151-161.
Shen Yunwei, Li Yang, Gao Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 151-161(in Chinese).
- [15] 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 large-scale utilization of renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8(in Chinese).
- [16] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [17] 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 Yinbiao, Zhang Zhigang, Guo Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [18] 程春田, 郜晓亚, 武新宇, 等. 梯级水电站长期优化调度的细粒度并行离散微分动态规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 26-32.

- Cheng Chuntian, Gao Xiaoya, Wu Xinyu, et al. Fine-grained parallel discrete differentiation and dynamic programming algorithm for long-term optimization of cascade hydropower system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 26-32(in Chinese).
- [19] 肖贵友, 陈仕军, 李基栋, 等. 考虑水流滞时影响的梯级水电站群短期优化调度研究[J]. 水力发电, 2018, 44(4): 37-41, 56.
Xiao Guiyou, Chen Shijun, Li Jidong, et al. Short-term optimal operation of cascade hydropower stations considering the delay of flow propagation[J]. Water Power, 2018, 44(4): 37-41, 56(in Chinese).
- [20] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [21] 史连军, 周琳, 庞博, 等. 中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 83-89.
Shi Lianjun, Zhou Lin, Pang Bo, et al. Design ideas of electricity market mechanism to improve accommodation of clean energy in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 83-89(in Chinese).
- [22] 邹斌, 赵妍, 李晓刚, 等. 跨省跨区清洁能源消纳补偿的市场机制研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 595-601.
Zou Bin, Zhao Yan, Li Xiaogang, et al. Market mechanism research on trans-provincial and trans-regional clean energy consumption and compensation[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 595-601(in Chinese).
- [23] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630-3637.
Niu Wenjuan, Li Yang, Wang Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637(in Chinese).
- [24] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20, 53.
Yang Ting, Zhai Feng, Zhao Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53(in Chinese).
- [25] 刘永, 李庆昌, 王冠中. 适用于电力市场竞价交易的发电边际成本算法研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(12): 37-40.
Liu Yong, Li Qingchang, Wang Guanzhong. Study on practical method for calculating marginal cost of power generation in the electricity market bidding transaction[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(12): 37-40(in Chinese).
- [26] 习近平. 决胜全面建设小康社会-夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利[M]. 北京: 人民出版社, 2017: 19.
Xi Jinping. Secure a Decisive victory in building a moderately prosperous society in all respects and strive for the great success of socialism with Chinese characteristics for a new era[M]. Beijing: People's Publishing House, 2017: 19(in Chinese).



陈国平

收稿日期: 2019-09-02。

作者简介:

陈国平(1965), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统调度运行与控制等工作, chen-guoping@sgcc.com.cn;

梁志峰(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事新能源调度运行与管理等工作, liang-zhifeng@sgcc.com.cn;

董昱(1974), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统调度运行与控制等工作。

(责任编辑 乔宝榆)