

区域全清洁能源供电的发展路径与实践——以青海省为例

董凌^{1,2}, 李延和¹, 刘锋², 陈来军³, 魏韡², 梅生伟^{3*}

(1. 国网青海省电力公司, 青海省 西宁市 810008; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;
3. 青海大学新能源光伏中心, 青海省 西宁市 810016)

Development Path and Practice of Regional Fully Clean Power Supply: A Case Study of Qinghai Province

DONG Ling^{1,2}, LI Yanhe¹, LIU Feng², CHEN Laijun³, WEI Wei², MEI Shengwei^{3*}

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, Qinghai Province, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
3. New Energy(Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai Province, China)

Abstract: Sustainably increasing clean energies in the power supply mix is very important to facilitate the environmental protection and sustainable development of human society. Considering the requirements of realizing a fully clean energy power supply in provincial regions, the fundamental concepts and technical bottlenecks are analyzed, based on which the pathway of developing technology and market is first investigated. Then, key technologies and market measures of source-, grid-, and load-side, and typical electricity composition in Qinghai power grid are demonstrated by considering the practice in the past 3 years as an example. Furthermore, suggestions to support a wider range and a longer period of clean power supply are provided, offering theoretical guidance and practical reference for achieving a clean, low-carbon, safe, and efficient energy supply system.

Keywords: renewable power generation; fully clean power supply; technical challenges; Qinghai practice

摘要: 不断提高清洁能源在电能供给体系中的比例对环境保护和能源可持续发展均具有重要意义。以实现区域全清洁能源供电为目标, 分析了全清洁能源供电的理念和技术瓶颈, 探讨了实现全清洁能源供电的技术和市场发展路径。在此基础上, 以青海电网近3年连续开展全清洁供电实践为例, 介绍了源、网、荷侧陆续开展的关键技术和市场措施, 分析了青海电网3年绿电日的典型数据, 并讨论了开展更大空间和

时间范围全清洁供电的发展潜力及面临的技术挑战, 以期为建立清洁低碳、安全高效的能源供应体系提供理论指导和实践参考。

关键词: 新能源发电; 全清洁供电; 技术挑战; 青海实践

0 引言

当前, 全球能源危机和气候变化形势日益严峻, 大力发展清洁能源、实现高比例乃至全清洁能源供电对世界范围内的能源安全与环境可持续发展具有重要的战略意义^[1-3]。

近年来, 全球多个国家已陆续实现高比例甚至全清洁能源供电^[4-5]。2016年2月和5月, 葡萄牙电网先后实现了连续96 h和连续107 h负荷全部由可再生能源(风、光、水、生物质)供电, 给开展全清洁能源供电提供了重要参考和借鉴。为全力支持青海清洁能源示范省建设, 2017—2019年, 青海电网开展了连续7天、9天、15天的全清洁能源供电实践, 期间青海全省电力需求全部由水电、光伏、风电清洁能源满足, 这也是目前世界上持续时间最长的省域电网全清洁供电示范。

上述全清洁能源供电实践为推动节能减排和能源结构转型起到了很好的示范带动作用。然而, 由于风电、光伏等清洁能源具有较强的不确定性、随机性和波动性, 随着风、光等可再生能源继续稳步、大幅增长, 实现更大范围和更长时间的全清洁能源供电仍是

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51621065); 国家电网公司总部科技项目(52280019000P)。

National Natural Science Foundation of China (51621065);
Science and Technology Foundation of SGCC (52280019000P).

亟需攻克的世界性难题。文献[6]构建了省级电力系统全清洁能源供电潜力评估指标体系,提出了多时空尺度下全清洁能源供电协调互动的生产模拟方法,对比分析了不同评估维度下清洁能源供电能力。文献[7]以葡萄牙电网的全清洁供电实践为例,介绍了支撑全清洁供电的预测、规划和安全稳定控制技术。文献[8]从系统建模的角度讨论了不同的建模维度和模型精细程度对全清洁供电系统优化决策分析过程的影响。文献[9]从运行控制的角度分析了省级电网全清洁能源供电的可行性,从电力电量平衡和优化调度等层面探讨了具体的实现条件和实现过程。文献[10]结合全清洁能源供电系统的高比例电力电子化电源和高比例随机波动性电源构成特点,从系统安全稳定运行的角度分析了全清洁能源供电面临的技术挑战和应对策略。

需要指出的是,全清洁供电目前还处于初期探索阶段,在供电区域范围和供电持续时长等方面仍存在很大局限,大范围、长时间、高可靠的全清洁能源供电路径仍需深入研究。鉴于此,本文尝试以实现区域全清洁能源供电为目标,分析全清洁能源供电的理念和技术瓶颈,梳理实现全清洁能源供电的技术和市场路径。在此基础上,结合青海电网近年来开展的省域全清洁供电实践,探讨全清洁供电的实践成效、发展潜力及技术挑战,以期全清洁能源供电的发展提供有益参考。

1 区域全清洁供电的理念与瓶颈

1.1 全清洁供电的基本理念

全清洁能源供电是能源结构转型追求的终极目标,在实践中应遵循安全、经济和高效的基本理念。在安全性方面,由于风电和光伏发电的电力电子化特征,高比例新能源电力系统的安全稳定运行面临巨大挑战,需要做好关键技术储备保障全清洁能源供电系统的安全运行;在经济性方面,全清洁能源供电不应以提高终端用户供电成本或损害可再生能源投资商的利益为代价,更不宜盲目扩大新能源装机容量导致大量弃风、弃光;在高效性方面,需要根据不同阶段全清洁能源供电实践的特点,做好政策机制的顶层设计,充分利用技术创新和市场竞争不断降低成本。

1.2 区域全清洁供电的主要瓶颈

对于区域全清洁能源供电实践而言,不仅需要面对新能源发电出力波动性强、网内灵活性资源不足等

技术挑战,还需要面对新能源发电成本过高、相关政策机制滞后等非技术因素制约。具体而言,主要包含三方面的瓶颈问题。

1) 新能源出力不确定性下的电力电量平衡难题。由于风、光等可再生能源出力主要受天气因素影响,全清洁能源供电情况下电网有功功率平衡面临巨大挑战。多种类型新能源接入后,引入高度的非线性和随机波动性,而新能源的低可调度性又进一步削弱了系统调节的灵活性。因此,如何充分协调在不同空间位置接入的不同时间尺度(季节、周、天、小时、分)的灵活性资源,保证系统电力电量供应的充裕度和安全性,同时充分考虑负荷侧的灵活调节能力(如分布式储能)以降低新能源电力系统运行保守性,成为保障全清洁供电面临的第一道难题。

2) 电力电子化特征的新能源电力系统安全运行难题。新能源发电一般通过逆变器接入电网,高比例新能源发电接入后,常规机组被大量取代,系统运行的惯量水平显著降低,频率支撑特性和无功电压支撑能力均严重削弱。系统低电压穿越和功率振荡风险不断增加,频率稳定和电能质量难以保证。此外,交直流混联系统中还存在暂态冲击下直流换相失败甚至双极闭锁等诸多隐患。因此,全清洁能源供电情况下电网的安全稳定运行形势十分严峻。如何通过先进控制技术赋予新能源发电主动支撑电网的能力、并实现系统层面的协同协调,形成高比例新能源电力系统协同稳定控制方法,成为保障全清洁供电面临的第二道难题。

3) 新能源发电成本过高与市场机制相对滞后的难题。近年来,虽然风、光等新能源发电的成本逐年降低,在青海部分区域甚至已经实现了光伏发电平价上网。然而,由于国内的碳交易市场尚不成熟,现有政策机制下新能源发电的市场价值回报比较单一,其对环境和生态的改善价值尚没有合适的市场机制予以保障和回馈,不利于充分体现清洁能源开发利用的环境贡献和社会价值。因此,如何设计合理的市场机制并及时出台相应的政策法规以便更好地促进高比例清洁能源供电市场环境的形成,成为保障全清洁供电面临的第三道难题。

2 区域全清洁供电的发展路径

2.1 基本原则

由于不同区域的资源禀赋、网架结构、负荷特点

等存在差别，区域全清洁供电的发展路径也不尽相同，但在发展过程中宜遵循如下基本原则。

1) 清洁能源占比有序提高。随着电力系统中新能源比例的不断增高，其安全稳定运行所依赖的技术要求也随之相应提高。因此，在工程实践中，需要结合不同阶段的技术发展水平渐进有序地提高清洁能源占比，不能期望一蹴而就。

2) 源网荷储协调发展。全清洁能源供电需要统筹电源、电网、负荷以及储能等灵活性资源的协调发展，避免出现源网荷储发展失衡条件下片面追求全清洁能源供电，从而引发弃风、弃光、弃水等损失。

3) 实施范围因地制宜。中国地域广袤，不同地区的清洁能源（如风、光、水）资源禀赋差异巨大，导致发电成本及消纳难度差别也较大，加之地区市场和经济发展并不均衡，实施全清洁能源供电还需统筹技术和经济两方面因素，因地制宜地选择全清洁能源供电的时间范围和空间范围。

2.2 技术路径

全清洁能源供电的技术路径与地区的资源禀赋密切相关，水电装机占比较高的地区相对更容易实现全清洁能源供电，而风、光资源丰富的地区可能需要更多储能或需求侧解决方案。为在满足基本安全、经济约束下实现更大覆盖范围、更长持续时间的全清洁供电，需在源、网、荷、储以及市场机制等多个层面持续开展技术攻关。

1) 电源侧：需不断提高新能源超短期预测准确度。新能源超短期预测的准确性对实现全清洁能源供电非常重要，直接决定未来4 h内清洁能源出力能否满足全网供电需求。当前，由于缺乏精准的气象数据支撑，风能、光能资源变化情况难以准确预估，新能源超短期预测精度有待进一步提高，需要通过强化数值天气预报应用和大数据挖掘分析，不断优化和升级预测模型，持续提高新能源超短期预测准确度。

2) 电网侧：需加快推进清洁能源输送通道建设。一方面，新能源场站通常远离负荷中心，新能源发电基地与负荷多呈逆向分布，需要加强区域内高电压等级输电通道建设及电网改造升级，消除区域电网“卡脖子”问题。另一方面，大部分清洁能源资源丰富省份属于经济欠发达地区，清洁能源规划开发总量远超本地负荷发展水平，需要加快清洁能源外送通道建设，依托大电网、构建大市场，实现省域清洁能源在更大范围优化配置和消纳。

3) 负荷侧：需不断深入挖掘用户参与新能源电力系统经济运行的调节潜力。在新能源高比例接入电网的情况下，用户侧深度参与调节是保持系统安全高效运行的必然要求。同时，需要优化电力资源配置，挖掘用户侧具备可中断调节特性的负荷潜能，增强电网调峰、调频、调压能力。采用经济手段引导负荷曲线的调整，刺激空闲产能，增加新能源大发时段社会用电量，实现新能源发电企业、用户、电网三方共赢。

4) 储能侧：需加快大容量储能设施建设。新能源发电具有间歇性、波动性，要实现全清洁能源供电的短期电力平衡和中长期电量平衡，必须配备一定容量的灵活调节资源。为此，需要结合供电区域内的地理条件、气候特点、水资源特点等具体实际，统筹规划建设抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能、储氢等储能设施，满足高比例新能源电力系统安全稳定运行对灵活性资源的需求。

5) 市场层面：需不断完善市场机制和监管机制。相比于技术的进步，市场的完善对于全清洁能源供电的实现同样重要。一方面，为了充分激励清洁能源的大力发展，需要加快落实可再生能源配额制、碳交易市场等政策机制，通过市场化手段促进清洁能源的大规模发展。另一方面，为了支撑高比例新能源电力系统的可持续发展，需要适宜的市场机制激励储能等灵活性资源投资建设并积极为电网安全、经济运行提供调峰、调频等辅助服务。此外，还需要及时出台相应的市场监管机制，保障电力市场的公平、高效运行。

3 青海全清洁供电实践分析

3.1 青海电源和电网情况

3.1.1 电源

青海省内水能、太阳能、风能资源均异常丰富。黄河上游已建成12座梯级水电站，总装机约10 487 MW，占全省水电总装机的88%，调节性能优良，具备日以上调节能力。水电最大发电功率为11 GW，调峰能力为7.27 GW。光伏年利用小时数1600 h左右，风电年利用小时数1800 h左右。近3年来青海水电、火电装机未变，但光伏和风电装机增长迅速，截至2019年底光伏和风电装机占比50.46%，年发电量占比已超过26%。从2019年数据看，青海清洁能源装机占比87.96%、发电量占比90.1%。近3年青海电网装机基础数据见表1，发电量数据见表2。

表1 青海电网2017—2019年装机容量

Table 1 Installed capacity of Qinghai power grid from 2017 to 2019

年份	2017	2018	2019
总装机容量/GW	25.57	29.92	31.83
水电装机占比/%	46.68	39.88	37.50
光伏装机占比/%	31.15	34.71	35.17
风电装机占比/%	7.51	12.60	15.29
储能总容量占比/%	0.07	0.27	0.25

表2 青海电网2017—2019年年发电量

Table 2 Generation mix of Qinghai power grid from 2017 to 2019

年份	2017	2018	2019
总发电量/GWh	598.15	780.95	859.73
水电占比/%	54.71	65.35	63.87
光伏占比/%	18.82	16.69	18.28
风电占比/%	2.94	4.82	7.95
火电占比/%	23.53	13.14	9.90

3.1.2 电网

随着青藏联网、新疆与西北联网第二通道、玉树联网、果洛联网等电网工程相继建成，青海电网已发展为东接甘肃、南联西藏和西引新疆的多端枢纽交直

流混合电网。如图1所示，青海电网通过6回750 kV线路与西北主网相连，确保了跨省潮流互济，成为电网调度的重要灵活性资源之一。

3.1.3 负荷

青海省以第二产业用电为主，以2016年数据为例，第一、二、三产业和城乡居民用电比例为0.43 : 90.95 : 4.75 : 3.87。第二产业用电以电解铝、铁合金、钢铁、电石四大行业为主，占总用电量的70%，其中电解铝用电占总用电量50%。由于电解铝、钢铁、电石的连续生产要求，其日负荷曲线几乎为一条直线，因此青海全年日负荷曲线较为平稳，典型日24小时负荷曲线也较为平稳，峰谷差率通常在11%左右。

3.2 关键技术和市场措施

尽管青海具有超过80%的清洁能源装机且水电占比较高、跨省电网坚强，但实现连续长时间100%清洁能源安全、可靠、经济供电，需针对电力平衡和安全两方面，在源、网、荷开展大量细致的技术准备和机制协调工作。除常规的调度运行技术手段外，2017、2018、2019年的“绿电7日”“绿电9日”“绿电15日”在源、网、荷、储、市场等层面采取的关键技术和主要市场措施见表3。

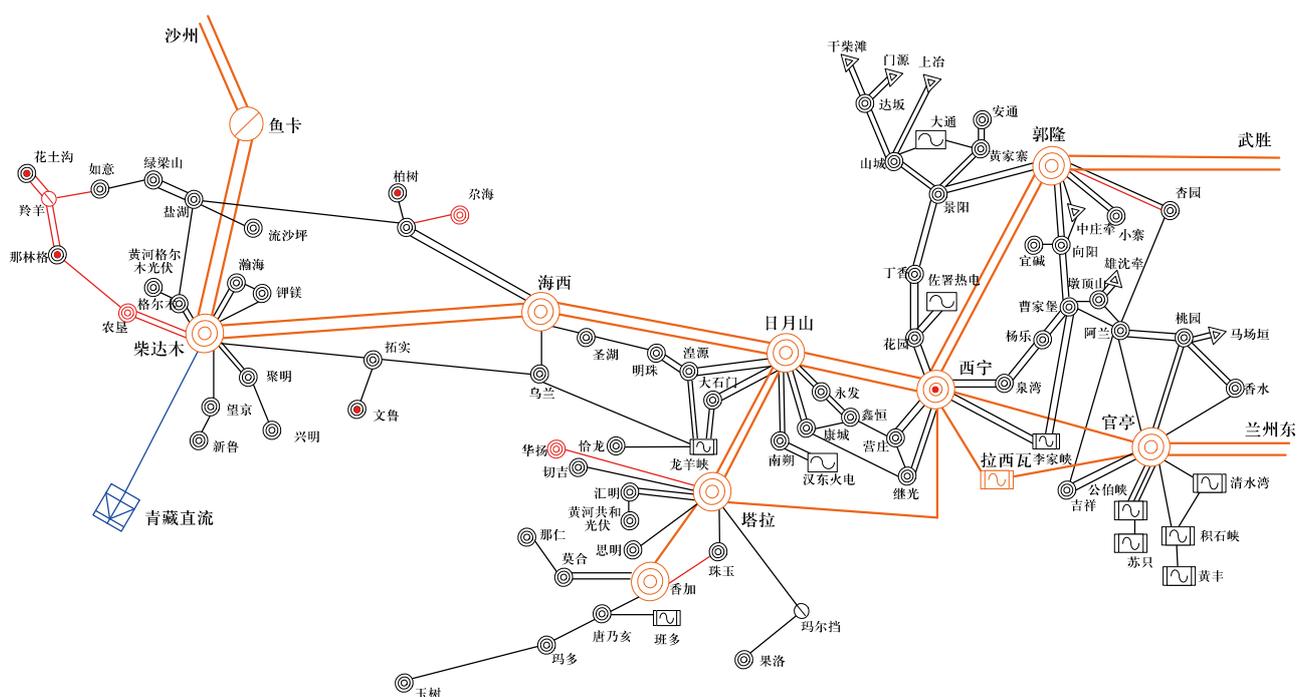


图1 青海电网新能源基地及与西北电网互联示意图

Fig. 1 Schematic diagram of renewable energy bases of Qinghai power grid and interconnection with Northwest power grid

表3 “绿电7日”“绿电9日”“绿电15日”关键技术和市场措施
Table 3 Key technologies and market measures of 7-day, 9-day, and 15 day clean energy trials

	“绿电7日”	“绿电9日”	“绿电15日”
时段	2017年6月17日0时—23日24时	2018年6月20日0时—28日24时	2019年6月9日0时—23日24时
源侧	①*统一调用黄河梯级水电最大750 m ³ /s, 最大出力7 362.09 MW; ②**统一调用黄河梯级水电最低出力1163 MW; ③**火电最低出力降至700 MW; ④*清洁能源出力全时段高于青海用电负荷200 MW以上。	**火电最低出力降至250 MW。	①*增大黄河上游水电站下泄流量, 最大出力9775 MW; ②**火电最低出力降至200 MW。
网侧	①*西北电网跨省平衡电力供需, 新疆、甘肃、宁夏清洁电输送, 银东直流; ②***交直流混联稳控; ③**风、光、水联合日前+日内优化调度, 涵盖新能源超短期预测功能的用电负荷及风、光、水功率预测系统; ④**新能源实时柔性控制系统运行策略、AGC控制策略。	①**调峰补偿机制; ②**实时监视发用电情况, 调整发电出力或开展调峰互济; ③**多能互补协调控制技术。	①**输电通道全面感知技术; ②**移动式储能设备技术; ③**构建三级绿电指标评价体系并首次发布绿电指数。
荷侧	无	**负荷参与调峰机制, 刺激白天铁合金负荷避峰或增加产能, 参与电网调峰, 扩大新能源消纳空间300 MW。	①**峰谷互换负荷1570 MW; ②**储热式电锅炉调整用电负荷曲线与光伏发电出力曲线相协调。
储能	无	无	**共享储能调峰辅助服务。
市场	**跨省电量交易, 实时现货交易, 短期、实时购电框架协议及火电交易协议。	①**发电权交易(停备火电与新能源企业); ②**新增三江源用户与新能源企业直接电力负荷; ③**新能源与铁合金增量企业开展省内现货交易。	①**储能电站与新能源场站双边或竞价交易; ②**峰谷互换负荷交易。

(注: *代表针对清洁供电充裕性的措施; **代表针对系统安全性的措施; ***代表针对系统灵活性的措施。)

2017年在源侧重点提高水电的充裕性和灵活性, 在网侧重点提高交直流混合电网安全运行水平, 提高风、光、水和负荷功率预测精度, 应用风、光、水联合日前+日内优化调度保证电量平衡, 并在调度和交易方面加强了与西北互联电网的潮流互济和备用共享。2018年重点在负荷侧实施调峰机制, 并在市场机制方面引入了停备火电与新能源的发电权交易, 新增用电与新能源发电双边交易。2019年, 重点进一步挖掘了火电的深调峰水平, 在负荷侧开展了峰谷互换负荷、新增储热式电锅炉等, 并增加了储能电站与新能源场站双边或竞价交易。

3.3 数据分析

“绿电7日”(2017年6月17日0时—23日24时)、“绿

电9日”(2018年6月20日0时—28日24时)和“绿电15日”(2019年6月9日0时—23日24时)的运行曲线见图2, 分别选取了其中的3个典型日。

1) “绿电7日”: 2017年6月19日和23日下午时段省内水、风、光出力低于负荷, 从外省购入部分新能源; 6月20日内水、风、光全天出力满足负荷, 富裕电量送出外省。

2) “绿电9日”: 2018年6月28日消纳省外新能源潮流最大、电量最多, 达30 440 MWh; 22日省内全天风、光新能源发电量占比达16.06%。

3) “绿电15日”: 2019年6月12日消纳省外新能源潮流最大、电量最多, 达20 355 MWh; 13日省内全天风、光新能源发电量占比达34.75%。

3年绿电日实践期间主要统计数据见表4。

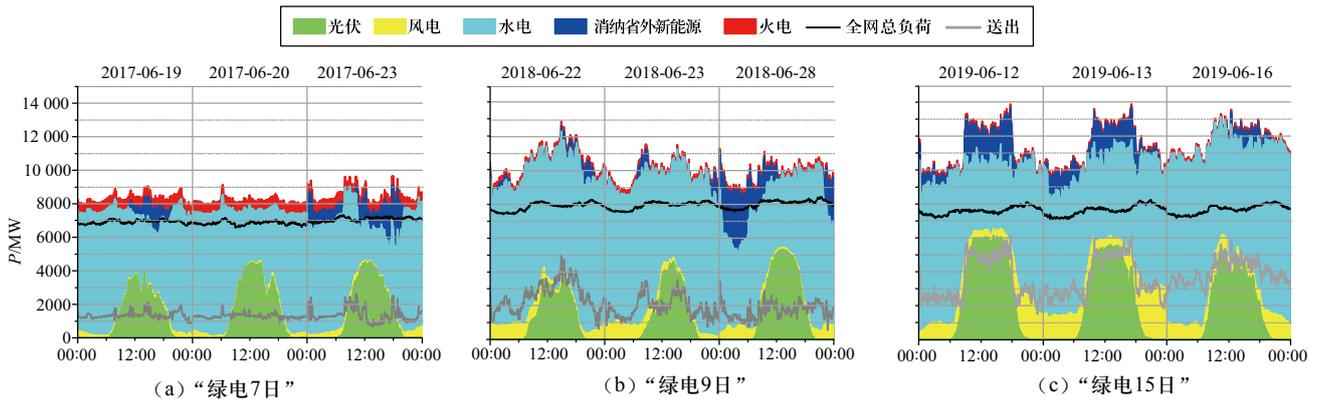


图2 青海电网3年绿电日实践的典型日曲线比较

Fig. 2 Typical electricity composition charts of clean energy trials of Qinghai power grid in 3 years

表4 青海电网3年绿电日实践期间主要统计数据

Table 4 Key statistics of clean energy trials of Qinghai power grid in 3 years

时间	2017年6月 “绿电7日”	2018年6月 “绿电9日”	2019年6月 “绿电15日”
全清洁连续供电时间/h	168	216	360
发电			
水电电量占比/%	73.1	76.9	73.5
光伏电量占比/%	17.2	15.4	16.2
风电电量占比/%	2.2	4.6	8.6
火电电量占比/%	7.5	3.1	1.8
清洁发电占比/%	92.5	96.9	98.2
负荷			
总用电量/MWh	1 178 150	1 759 591	2 839 142
日均用电量/MWh	168 307	195 510	189 276
最大负荷/MW	7360	8538	8466
最大日峰谷差/MW	612.8	1 087.4	1 187.3
电网			
消纳省外 新能源/MWh	66 700	108 739	120 762
日均消纳省外 新能源/MWh	9529	12 082	8051
最大受电功率/MW	—	4800	3000
外售电/MWh	225 884	335 149	1 139 228
最大送出功率/MW	2530	4 650.3	6 271.9

分析图2数据可得出以下结论。

1) 青海(6月份)夜间风资源更好,风、光发电特性具有比较明显的日时间尺度的互补性。比较3年曲线可以发现,风电装机的增加,明显改善了光伏发电的波动性;但同时光伏的“馒头形”日发电特性、风电的随机性特征明显,新能源全消纳严重依赖水电和省间联网调节能力。

2) 风电、光伏装机的持续增加,使青海电网新

能源发电量占比不断增加。3年绿电日实践期间的风、光新能源发电量占比分别是19.38%(2017年)、20%(2018年)、24.74%(2019年)。

3) 由于用电量基本没有增长,青海电网2017年、2018年尚需在少部分时段购入清洁电量满足全清洁用电。但从2019年起,由于风、光新能源装机容量大幅增加,已基本实现清洁能源自给自足,且外送电量逐年增加,向清洁电送出基地方向发展。

4) 西北跨省优化调度提高了全区域风、光新能源不同时段互济能力。3年绿电日实践期间,消纳其他省份新能源电量不断增加,累计达296.2 GWh。

3.4 讨论

1) 电力系统运行的基本目标是在任何时间、任何地点以最低成本有效维持可靠的供需平衡。从青海实践看,全清洁能源供电所要求的充裕性、灵活性、安全性和经济性问题交织在一起,既相互制约,又相互协同,研究区域全清洁能源供电技术路径涉及到复杂的理论和实践问题。

2) 分析青海3年“绿电”运行数据可见,区域中光伏、风电装机比例越高,不确定性水平越高,供需不平衡量波动更加剧烈,就越难以用少量典型日来描述电力系统的运行状态。未来规划需使用时序的、高可信度的生产模拟技术,以尽可能覆盖可能出现的供电不足和超出负荷的场景。

3) 青海实践表明,为应对高比例风、光发电的波动性和随机性,源、网、荷、储都是重要的灵活性调节资源。从技术的可行性和经济性而言,通常的路径是源侧—网侧—负荷侧以及常规抽蓄、电化学储能、压缩空气储能等储能系统。近十年,水电和火电

的灵活性已得到极大挖掘；网侧灵活性取决于跨区互联电网建设、市场建设和大电网调控技术，近些年在各区域都在不断推进中；而负荷侧灵活性研究和应用尚在起步阶段，随着能源互联网理念和信息通信技术发展，电力系统与供热、交通、数据中心、化工制造等用能部门有巨大耦合潜力有待于新技术和新市场机制的共同推动；随着各类新型储能技术成本的下降，大容量储能将在全清洁能源电力系统调峰调频中发挥更大作用。

4) 在中国现有电力市场框架下，“绿电7日”“绿电9日”和“绿电15日”开展了多项改革以促进全清洁能源对灵活性资源的需求。未来市场改革的不确定性，使得系统经济运行优化更为复杂，需要深入研究各种灵活性资源的物理、经济特性以及对市场价格的反应，以期设计出更有利于全清洁能源的市场机制。

5) 3年绿电实践期间，全网火电最小出力和日均发电量均逐年减小，说明了绝大部分火电机组逐步被清洁能源替代的技术经济可行性；另一方面也表明，在电网规划和运行中应改变火电机组的基荷定位思路，转向以提供灵活性调节服务为主。

6) 由于水电占比超过40%，且背靠西北大电网，青海电网目前频率问题尚不突出，电压问题也仅限于局部区域。未来随着更高比例电力电子接口的风电、光伏接入，将会带来电力系统稳定的新问题。这也是其他常规电源占比较低、但风光占比高的区域全清洁能源供电时面临的共性问题。大量研究表明，随着风、光伏发电在系统中占比逐步升高，新能源发电除应具备高/低电压穿越、无功调节能力等已成为行业共识或技术标准的技术条件外，还需承担更多支撑系统稳定运行的调频、调压等职责。

7) 青海全清洁能源供电主要在夏季6月丰水期开展，其他季节（特别是冬季枯水期）因水电不足，网内火电机组必须开机，火电发电量占年总发电量的11%左右，发挥着重要的电力电量平衡和电网稳定运行作用。未来要实现全季节的全清洁能源供电，还需结合国家和区域的能源战略规划，依靠技术和市场共同稳步推进。

8) 青海在2019年启动以新能源发电企业为主的共享储能尝试，为全清洁能源供电实践提供了宝贵经验。利用区块链等先进信息通信技术，加之透明的市场机制和大数据技术，使分散在不同地理位置的储能和负荷侧灵活性资源可以低成本、高效率、安全地进入源网荷储系统协同优化中，是实现全清洁能源供电

的一个重要手段，需要进一步做好技术、市场机制和监管机制协同的高质量顶层设计。

9) 除了实现不同时间尺度的能量平移功能外，全清洁能源供电为储能系统提供了更多新的应用场景。例如，为满足高比例风、光电力系统中调频、调压需求，储能系统可以配合风电、光伏实现单元级或场站级的虚拟同步发电机功能，还可以作为缺乏常规电源支撑的电压薄弱点的调压手段。在西北电网电压支撑最薄弱的海西地区，正在研究应用GW级储能辅助提供电压支撑的技术经济可行性。

4 结论与展望

近年来，出于保障能源可持续发展和应对气候变化的考虑，不少国家和地区将全清洁能源供电作为地区能源发展的重要战略。在此背景下，本文围绕实现区域全清洁能源供电的终极目标，提出了安全、经济、高效实现全清洁能源供电的基本理念，分析了全清洁能源供电面临的电力电量平衡、安全稳定运行以及市场支撑环境等方面的瓶颈问题，从源、网、荷、储以及市场等不同维度探讨了推进区域全清洁能源供电的发展路径。在此基础上，全面阐述了青海电网近3年开展全清洁能源供电实践所采取的技术措施和取得的实际成效，分析了青海电网未来进一步扩大全清洁能源供电时空范围的发展潜力。

青海是国家重要的生态安全屏障和清洁能源基地，具备水电为主，水、风、光互补的全清洁供电禀赋，连续3年的“绿电7日”“绿电9日”和“绿电15日”成功实践及相关研究为推动建立清洁低碳、安全高效的能源供应体系提供了“青海范本”，对探索中国能源转型之路具有重要的启示意义。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015. LIU Zhenya. Global energy interconnection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [2] 黄其励. 中国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 1-9. HUANG Qili. Insights from China renewable energy development for global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 1-9(in Chinese).
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The

- future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy Internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [4] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1855.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(6):1843-1855(in Chinese).
- [5] 董天仁, 王东方, 张洪平, 等. 全清洁能源供电关键技术研究及应用[J]. 青海科技, 2018, 25(4): 10-15.
- [6] 周磊, 李楠, 刘飞, 等. 省级电力系统全清洁能源供电潜力评估[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(5): 41-45.
ZHOU Lei, LI Nan, LIU Fei, et al. Assessment of the power supply potential of fully clean energy for provincial power systems[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(5): 41-45(in Chinese).
- [7] YANG W, PESTANA R, ESTEVES J, et al. Analysis and inspiration of the national load all powered by renewable energy in Portugal[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 21-24 May 2019: 1650-1654.
- [8] DE CHALENDAR J A, BENSON S M. Why 100% renewable energy is not enough[J]. Joule, 2019, 3(6): 1389-1393.
- [9] 朱罡, 李延和, 张真, 等. 省级电网全清洁能源供电运行控制技术与应用[J/OL]. 中国电力, 2020 [2020-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200421.1452.002.html>.
- [10] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-06-20。



董凌

作者简介:

董凌(1981), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统调度与控制, E-mail: 53484350@qq.com。

李延和(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统调度与控制, E-mail: lyhe0416@163.com。

刘锋(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统调度

与控制, E-mail: lfeng@tsinghua.edu.cn。

陈来军(1984), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统分析与控制, E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn。

魏韡(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统分析与控制, E-mail: wei-wei04@mails.tsinghua.edu.cn。

梅生伟(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统分析与控制。通信作者, E-mail: meishengwei@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 李锡)