

能源转型下我国新能源替代的关键问题分析

刘永奇¹, 陈龙翔^{1*}, 韩小琪²

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031; 2. 电力规划设计总院, 北京市 西城区 100120)

The Key Problem Analysis on the Alternative New Energy Under the Energy Transition

LIU Yongqi¹, CHEN Longxiang^{1*}, HAN Xiaoqi²

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China.

2. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Xicheng District, Beijing 100120, China)

ABSTRACT: The rapid development of new energy in China has a strong influence on the promotion of energy production. The serious uncertainty of new energy power generation has a major influence on the power supply adequacy. The problems on the alternative new energy should be clarified up to now. This paper presented the basic concept on the alternative new energy. On the view of power supply adequacy, and based on the data analysis, the challenges of alternative new energy were discussed. The key problems on the promotion of alternative new energy were put forward in this paper.

KEY WORDS: alternative new energy; alternative electric power; alternative capacity; balance of electric power and energy; prospect of future development path

摘要: 我国新能源发电快速发展, 对促进能源生产侧清洁化发挥重要作用, 但新能源发电的强不确定性对保障供电充裕性带来较大影响, 新能源替代有关问题亟待厘清。该文研究从电力电量平衡视角, 提出新能源替代的基本技术内涵是要实现电力和电量两方面的替代; 从保障供电充裕性的角度, 基于大量实际数据分析新能源替代面临的问题; 提出促进新能源替代的路径展望。

关键词: 新能源替代; 电力替代; 电量替代; 电力电量平衡; 路径展望

0 引言

21世纪以来, 世界各国高度重视化石能源大规模开发利用带来的资源紧张、气候变化等问题, 加快开发利用新能源成为世界各国的普遍共识和一致行动。新能源迎来了规模化发展的时代, 技术经济性持续提升^[1]。我国在“碳达峰, 碳中和”目标的指引下, 新能源将进一步进入加速发展期, 逐步减少、替代化石能源, 成为推动能源向清洁低碳转型的生力军。

国内外学者对新能源开展了大量的研究, 包括

消纳^[2]、高比例新能源电力系统存在问题^[3-6]、实践^[7-8]和规划^[9-15]等方面。然而, 新能源替代的基本技术内涵是什么及面临怎样的挑战和解决方案尚未有系统性的论述。

本研究以保证供电充裕性为前提, 从电力电量平衡视角, 对新能源替代的基本技术内涵、相关实践、面临挑战和未来工作方向等进行述评与展望。首先, 阐述新能源替代的基本技术内涵; 其次, 基于实际运行数据, 分析新能源替代面临的电力电量平衡挑战; 再次, 介绍分析国内外高比例新能源供电实践与启示; 最后, 提出在推进新能源替代过程中的工作着力方向。

1 新能源替代的基本技术内涵

1.1 电力系统供需平衡特性

电力系统是一个时变的实时平衡系统, 具有生产和消费实时平衡(同时完成)的特性, 有电力、电量两方面的平衡。

1) 电力平衡。

$$\sum_{i=1} P_i(m) \geq D(m)[1 + R^D(m)], m = 1, 2, 3, \dots, 8760 \quad (1)$$

式中: I 为机组集合; m 为年小时数 8760h; $P_i(m)$ 为机组 i 在 m 时刻的出力能力; $D(m)$ 为 m 时刻的系统负荷; $R^D(m)$ 为 m 时刻的备用系数(含负荷备用、事故备用)。

2) 电量平衡。

$$\sum_{i=1} E_i(n) \geq E(n)[1 + R^E(n)], n = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (2)$$

式中: I 为机组集合; n 为一年中 12 个月; $E_i(n)$ 表示机组 i 在第 n 个月的发电量, 新能源和水电机组月度发电量取决于资源条件; $E(n)$ 为月度电量需求;

$R^E(n)$ 为月度电量备用系数。

此外,新能源大容量、高比例接入,电力系统的安全运行问题需要高度关注。目前,电力系统主要依靠同步电源具有的同步响应能力和可控的负荷调整能力应对各类扰动,保障安全运行;新能源发电基于电力电子装置并网,目前大多采用锁相电流源技术,主动支撑能力以及自身抗扰动能力较弱,使电力系统的技术特性和控制调节基础发生深刻变化,安全运行面临巨大挑战。本文主要针对电力电量平衡视角展开分析研究,故对安全运行问题不做过多讨论。

1.2 从电力和电量两方面审视新能源替代

基于电力系统供需实时平衡特性,新能源替代传统电源,须从电力平衡和电量平衡两个角度考虑,缺一不可,尤其不能忽略电力平衡的视角,这是“电”商品明显区别普通商品的方面。

因此,新能源替代传统电源,其内涵为:在保证供电充裕性的前提下,一是替代化石燃料机组发电量,二是替代化石燃料机组发电电力,即替代化石燃料机组装机容量,我国主要为减少燃煤机组装机容量。此外,新能源电力替代和电量替代并不是完全独立的,在适当条件下可由电量替代转换为电力替代。

1) 替代化石燃料机组发电量。

新能源发电替代化石燃料机组发电量是直观的,电力系统消纳一度新能源发电,即可减少等量的化石能源发电量,替代的化石燃料数量取决于系统消纳的新能源电量。

2) 替代燃煤机组装机容量。

新能源发电应具备在长周期(年)参与电力平衡的能力,以求稳定的替代燃煤机组发电电力,进而减少系统燃煤机组装机容量。为了衡量新能源替代常规机组的能力,提出了新能源可信容量概念,指在可靠性前提下新能源发电可以替代的常规机组容量^[16],见图1。

3) 电量替代转换为电力替代。

在储能调节资源丰富条件下,可将低负荷月富裕新能源电量存储起来,在高峰负荷日释放,实现燃煤装机容量替代。这种转换的成本,取决于负荷特性、新能源资源特性及储能资源代价。

2 新能源替代面临的电力电量平衡挑战

本节基于实际数据分析新能源替代面临的电

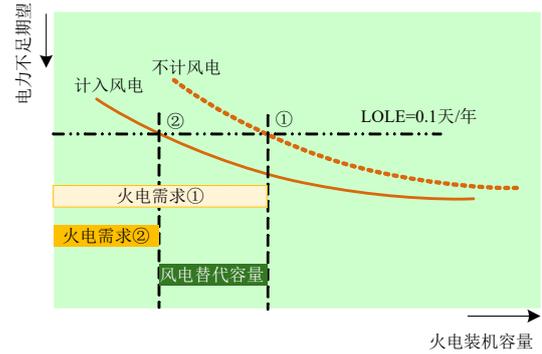


图1 替代煤电示意图

Fig. 1 Alternative coal electricity schematic diagram
力电量平衡挑战。结论显示,新能源发电出力的不确定性和随机性,导致电力系统电力电量平衡在从日内到月度时间尺度均面临挑战。

2.1 新能源日出力特性分析

2.1.1 新能源日内波动幅度显著大于负荷日内波动幅度

以北方某省为例,基于2019年数据,分析新能源和负荷的波动情况。分析表明,新能源日内波动幅度显著大于负荷日内波动幅度,供需协调、匹配面临较大挑战。

1) 风电功率单日波动最大可超装机容量的80%。

风电日以内以小幅度波动为主,单日最大波动处于0.1~0.2pu的概率最高,约为28.7%,90%的波动在0.5pu以下,但最大波动幅度可达0.88pu,如图2所示。

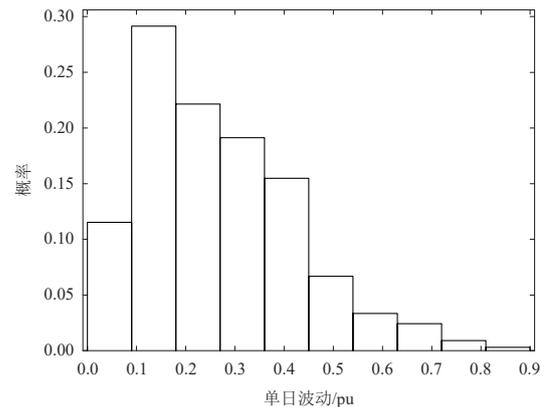


图2 某省风电日波动概率分布

Fig. 2 Probability distribution of wind power daily fluctuation of a province

2) 光伏功率单日波动更为剧烈。

光伏日内波动以幅度处于0.3~0.8pu的波动为主,单日最大波动处于0.6~0.7pu的概率最高,约为23%,50%的波动在0.51pu以下,90%的波动在0.7pu以下,最大波动幅度为0.82pu,具体如图3

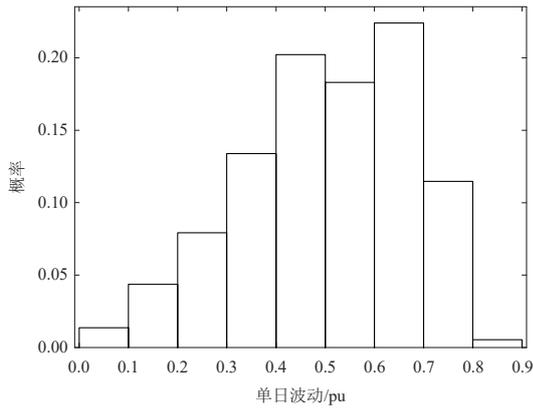


图3 某省光伏日波动概率分布

Fig. 3 Probability distribution of photovoltaic daily fluctuation of a province

所示。

3) 负荷波动规律明显, 幅度较小。

负荷日内波动分布在 10%~25%最大负荷的概率较高, 波动幅度低于 20%、25%日内最大负荷的概率分别约为 65%、87%, 如图 4 所示。

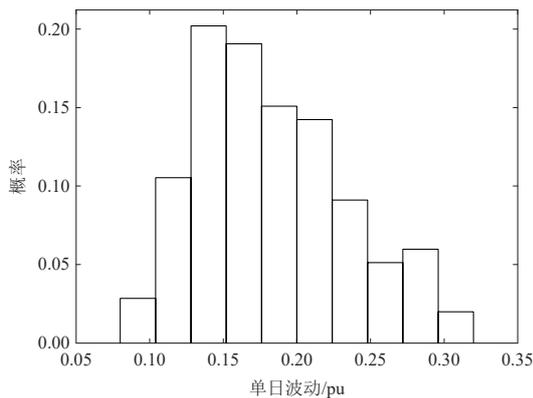


图4 某省负荷日波动概率分布

Fig. 4 Probability distribution of load daily fluctuation of a province

2.1.2 新能源对电力平衡支撑能力弱

以有关区域电网 2019 年实际运行数据分析新能源对电力平衡的支撑能力。分析表明, 从保证供电充裕性的角度看, 电源规划中无法将光伏发电容量考虑为可信容量, 将风电装机容量按照一定比例考虑为可信容量也存在挑战。

1) 极端情况下风电参与电力平衡的能力几乎为 0。

平均来看, 风电日均出力占日均负荷比例在 6.5%以上, 晚高峰期间约为 8%~9%。但若选取极端的一天, 风电出力占负荷比例约为 0~1%, 从保证电力系统长周期供应的角度看, 需要审慎适当的将风电装机容量按照一定比例考虑为可信容量。具体见图 5—7。

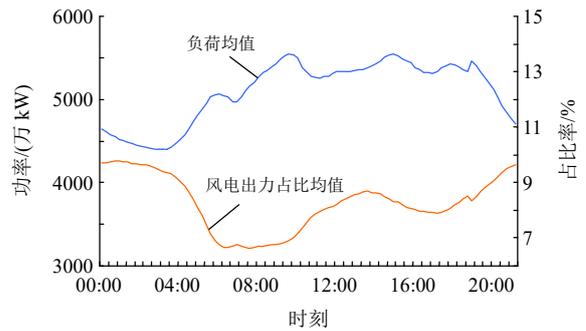


图5 某区域电网 6—8 月日均负荷和风电出力占比

Fig. 5 Proportion of average daily load and wind power generation in June-August of a regional grid

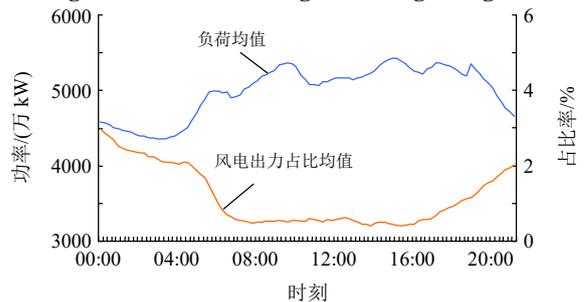


图6 某区域电网某日负荷和风电出力占比

Fig. 6 Proportion of daily load and wind power generation of a regional grid

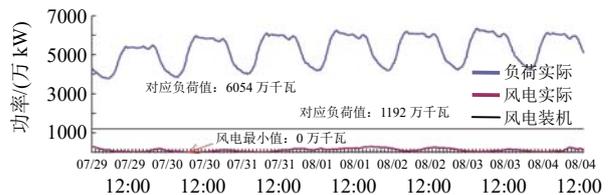


图7 某区域电网负荷和风电出力

Fig. 7 Load and wind power generation of a regional grid

2) 晚高峰光伏参与平衡能力为 0。

晚高峰, 光伏出力为 0, 无法参与电力平衡, 不适合将光伏装机容量按照一定比例考虑为可信容量。见图 8。

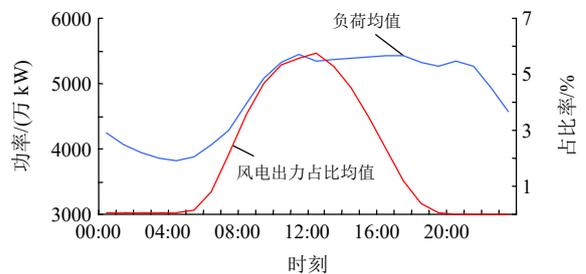


图8 某省 6—8 月日均负荷和光伏出力占比

Fig. 8 Proportion of average daily load and photovoltaic generation in June-August of a regional grid

2.2 新能源月出力特性分析

新能源月度电量分布与负荷月度需求不匹配。月度时间尺度看, 我国负荷需求总体呈现夏、冬两个高峰, 风电为春、冬高峰, 光伏发电为夏、秋高

峰。迎峰度夏用电高峰期间，新能源电量贡献低，存在月度电量平衡难题，见图9。

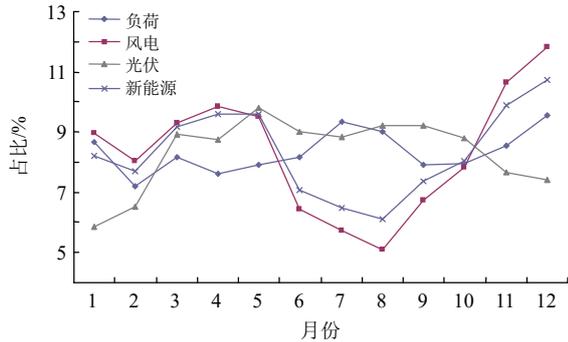


图9 某区域电网2016—2019年逐月负荷电量、新能源发电量占比情况

Fig. 9 Proportion of average monthly load power and alternative new energy generation in 2016—2019 of a regional grid

进一步，基于皮尔逊相关性分析方法，对有关区域电网新能源月度发电量与负荷月度电量的相关性开展分析计算，如两者存在较好的正向相关性，则表明在月度时间尺度上新能源发电可较好支撑用电需求。但结果显示，新能源与负荷月度电量基本不相关，在月度时间尺度上，新能源发电对用电需求支撑较弱，见表1。

表1 新能源与负荷月度电量的相关性分析

Table 1 Analysis of correlation between new energy and monthly load power

年份	华北	华东	东北	西北
2017	2%	-6%	-18%	22%
2018	-28%	49%	24%	-1%
2019	20%	51%	14%	-17%
平均值	-2%	31%	7%	1%

3 高比例新能源供电实践及对新能源替代的启示

3.1 青海“绿电15日”实践

2019年6月9日—23日，青海电网开展连续15天、360h全清洁能源供电实践，如图10所示。

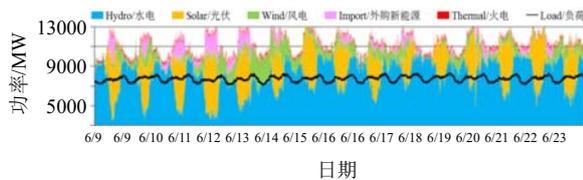


图10 青海“绿电15日”运行发电面积堆积图

Fig. 10 Running chart of 15 days green power of Qinghai province

1) 电量情况。

期间，青海全省日均发电量2.65亿kW·h，其

中：水电、光伏、风电日均发电量分别为1.95、0.43、0.23亿kW·h，水电、新能源发电量占比分别为73.5%、24.7%。青海全省日均用电量1.89亿kW·h，新能源日均发电量占日均用电量的34.7%。

2) 电力情况。

期间，青海日均最大负荷821万kW(晚高峰)，对应时刻，水电日均、最小出力分别为945、750万kW(平均占负荷比例、最小占负荷比例分别为115%、91.3%，下同)，光伏日均、最小出力分别为9万kW、0(1.1%、0)，风电日均、最小出力分别为131、23万kW(16%、2.8%)，系统支撑出力20万kW(约2.3%)。新能源日最大出力664万kW，出现在午间，占当时负荷的83.8%。

3.2 英国“连续18日无煤电运行”实践

伦敦时间2019年5月17日15:12至6月4日20:30，英国电网连续18天5小时(共计437h)无煤电运行，如图11所示。

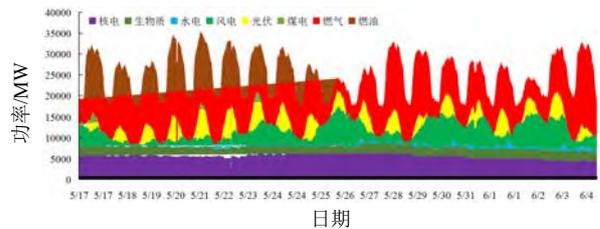


图11 英国“连续18日无煤电运行”发电面积堆积图

Fig. 11 Running chart of Non-coal power on 18 Consecutive days of Britain

1) 电量情况。

期间，英国电网日均用电量6.35亿kW·h，其中燃气发电、核电为主力电源。燃气日均发电2.71亿kW·h(占比42.68%)、核电日均1.35亿kW·h(占比21.60%)、风电日均0.88亿kW·h(占比13.86%)。

2) 电力情况。

期间，英国电网日均最大负荷3102万kW，对应时刻，燃气发电日均、最小出力分别为1418、587万kW(平均占负荷比例、最小占负荷比例分别为45.1%、22.8%，下同)，核电日均、最小出力分别为561、439万kW(18.2%、12.8%)，风电日均、最小出力分别为404、58万kW(13.4%、1.9%)，光伏日均、最小出力分别为153万kW、0(4.9%、0)。新能源日最大出力1397万kW，出现在午间，占当时负荷的54%。

3.3 分析与启示

3.3.1 运行分析

青海省“绿电15日”和英国“连续18日无煤

电运行”运行特点如下：

1) 相比较参与电力平衡的贡献，新能源发电提供的电量贡献替代效应更加显著。“绿电15日”，新能源发电日均电量贡献占比高达34.7%，晚峰期间，风电出力占负荷比例约在2.8%~31.8%（装机占比13%），光伏为0。英国“连续18日无煤电运行”，新能源发电日均电量贡献占比13.86%，负荷高峰期间，风电出力占负荷比例约在1.9%~31.6%的范围内（装机占比19%）。

2) 新能源出力日内波动大，满足日内电力平衡隐形成本大。青海电网新能源装机占比49%，光伏装机占比尤其高，午高峰新能源最大出力占当时负荷的83.8%，但晚高峰最低仅2.8%，日内出力差高达600万kW，调度运行部门面临净负荷“鸭型曲线”的挑战，从管理措施、方式安排（水电、联络线交换功率等）、市场交易等方面，努力调动各方面资源服务于“绿电15日”，为高比例新能源电力系统运行做出有益的探索和尝试，积累宝贵的经验。英国电网则严重依赖燃气机组调节风电、光伏的波动。

3.3.2 对新能源替代的启示

高度关注高比例新能源电力系统的电力平衡问题，要考虑无风、无光时怎么保障负荷供给。新能源发挥作用更多的是现行条件下显性的电量效应，参与电力平衡能力较弱，高比例新能源电力系统波动性显著增大，系统中可控、可调度电源是保障电力实时平衡的“压舱石”（青海电网是水电，英国电网是燃气机组和核电）；同时，系统也承担了较大的隐形经济代价，充分发挥各方面灵活调节能力需要有相关疏导机制。

4 促进新能源替代的关键问题分析和展望

4.1 关注新能源替代中容量充裕度

规划层面，从满足电力系统可靠容量需求看，应按照成本由低到高的顺序进行安排，并需要考虑电源的清洁性。一是需求侧资源，可以通过价格机制、行政手段等对负荷特性进行调整，供应侧的容量就可相应消减；二是发挥互联电网错峰和备用共享等效益，需要机制上的创新、完善；三是新能源发电，按照一定可信容量纳入电力平衡；四是水电、核电等清洁电源；五是储能（目前主要是抽水蓄能）和燃气发电（相对清洁）等灵活电源容量，最后不足部分，由煤电作为保底电源，兜底系统容量需求。

见图12。

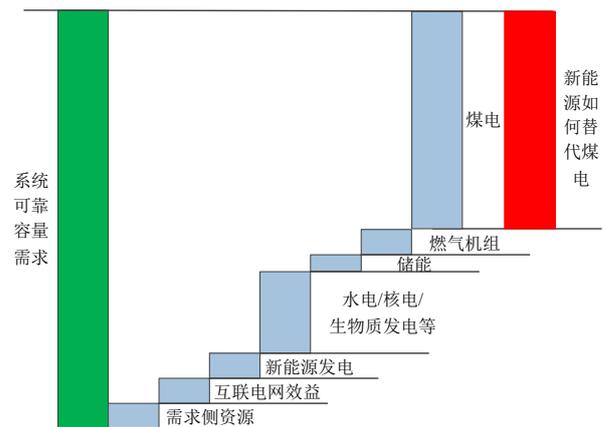


图12 系统可靠容量供给图

Fig. 12 System reliable capacity supply diagram

我国剩余可开发水电资源不多；天然气资源先天不足，导致燃气机组发电受到一定限制，清洁替代中新能源替代占据非常重要的位置。

新能源替代中，核心问题是在保证供电充裕性的前提下替代煤电装机容量，这要求新能源发电须具备提供电力容量能力。但根据前述分析，新能源发电特性与负荷用电特性在日内、日、月时间尺度均无法有效匹配，在不同时间尺度上均会产生电力电量平衡问题，新能源自身容量效益较差。未来需要从电力系统规划、运行和市场建设等“软件”、“硬件”各方面，综合施策，促进、推动新能源替代。

4.2 推动新能源技术经济性形成对传统电源的比较优势

新能源替代的驱动力可主要归纳为政策、技术和经济因素3个方面。

政策因素主要考量生态环境、产业链、能源安全等，主要措施包括电价补贴、消纳支持政策等，是新能源发展初期的主要驱动力，极大的推动新能源规模化发展和技术创新进步。

技术因素是推动新能源替代的基础，包括内外外部两方面技术条件。内部技术条件，包括转换效率、功率预测和调频、调压、抗扰动能力等；外部技术条件包括消纳技术及储能、可调度负荷等。工作着力点应在提升新能源装备性能、接入系统友好性、突破大规模经济高效储能技术、内外部技术融合等方面。

经济因素是新能源替代的决定性因素，核心包括新能源度电成本（主要是初始投资建设成本）和系统成本（主要是输配电成本和调节成本）。工作着力点应在降低新能源装备制造成本和合理规划、利用

送出线路和调节资源等方面。

新能源起步靠政策驱动；但新能源发电要实现传统电源的大规模替代，技术因素和经济因素是关键、根本，必须依靠技术和经济因素的比较优势，实现内生式、自发式的替代^[17-22]。

4.3 新能源+多时间尺度多品种的调节体系

为保障长周期供电充裕性，必须构建涵盖多时间尺度多品种的调节体系，实现日内、跨日、跨月、跨季调节。“新能源+调节体系”是实现大规模新能源替代的物质基础和必然选择。有关核心问题见图13。

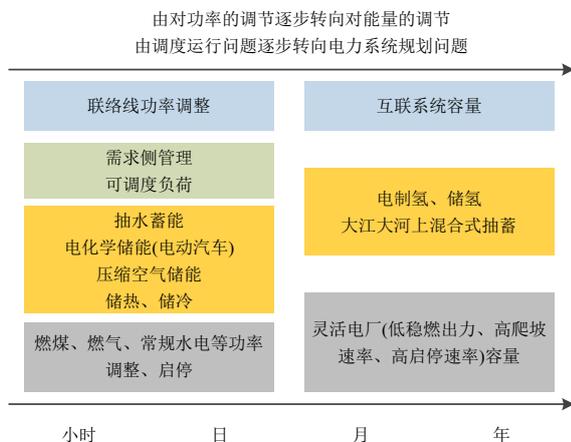


图13 多时间尺度多品种的调节体系

Fig. 13 Adjust system of multi-time scale and multi-types

1) 多时间尺度+多品种。

在小时、日等短周期时间尺度，注重功率灵活调节能力建设，构建涵盖机组灵活调节、短释能时间储能、可调度负荷、联络线灵活调整等方面的调节体系^[3-4,12-16]。

在月、年等长周期时间尺度，要更注重跨月、跨季能量调节能力建设，合理规划建设可控灵活电厂容量、长释能时间储能、互联电网电量等。

2) 煤电功能定位。

在大规模经济高效储能技术突破前，尤其是可跨日、跨月调节的储能技术突破前，煤电依然将在保障我国电力安全供应中发挥重要作用。但煤电功能定位将发生重大转变，由传统提供电力电量的主体性电源，逐步向提供可靠电力容量、调峰能力和电压、频率支撑的基础支撑电源转变，运行上将呈现宽负荷运行、低利用小时、高启停频次等特点。未来煤电的发展，应注重使其装备特性适应功能定位。

3) 需求侧资源。

可再生负荷^[3,12-13,15,17-19]。一方面，新能源发电

与负荷需求不匹配，且边际成本为0，供给过剩时，日内部分时段(后半夜或者中午)将出现零电价、负电价现象；另一方面，新能源度电成本未来有大幅下降空间，低成本电力将催生电制气、电制热、电制冷、电动汽车等可再生负荷。尤其氢气作为一种化石原料、二次能源(可制天然气、可燃料电池利用、可用作冶金炼钢等)，目前95%以上比例的氢气生产均出于化石能源，当“绿氢”(风电、光伏制氢)技术成熟、经济成本可控时，将会大大增加电力系统运行柔性、社会用能清洁化程度，并可通过氢气打破各能源系统间的隔离，或将对能源系统产生颠覆性影响，意义重大。欧盟制定了“氢能”发展战略，值得关注、期待。

需求侧响应、信息通信技术、智能终端等的快速发展，电力市场中电价波动加剧，将使普通用户具备参与电力系统调节的能力和意愿。

总体看，未来负荷特性将从单向、刚性向双向、柔性发展，需求侧成为系统灵活性的重要来源。

4) 新能源+储能+可再生负荷。

“新能源+储能+可再生负荷”是“新能源+多时间尺度多品种的调节体系”中的核心^[3-6,12-13,15-16]。

通过在电力系统中配置多品种、多时间尺度储能技术；通过价格机制、技术手段等培育、引导可再生负荷等需求侧资源发展壮大，让抽水蓄能、电化学储能、电制氢、电动汽车负荷等响应生产侧，在日内、日、周、月乃至年时间尺度上，调剂生产侧丰枯余缺，可最大限度松弛电力系统实时供需平衡的刚性运行要求，提升新能源在长时间尺度保障电力平衡的能力。技术上具备条件后，当新能源综合利用成本低于煤电时，将逐步替代煤电装机容量，迎来新能源替代大规模时机。

4.4 新能源备用

在以可控、具有稳定发电能力电源为主的电力系统中，主要考虑负荷备用、事故备用、检修备用等。在构建以新能源发电为主体的新型电力系统中，应提出“新能源备用”的全新概念，指为了应对新能源发电出力波动(主要是发电出力减少)及新能源发电与负荷在时间上的不匹配等而设置的备用容量，这种备用容量主要来源于出力稳定可控的机组类型。新能源备用容量的大小取决于新能源发电特性、负荷特性以及新能源装机总容量等，在规划、运行阶段均非常重要，需要进一步的深化研究，科学的确定新能源备用容量。在青海“绿电15日”

及英国“连续18日无煤电运行”实践中，新能源备用分别主要是水电及气电、核电。

4.5 构建促进新能源替代的电力系统运行机制

新能源替代工作的纵深推进，将显著增大电力系统运行难度^[23]。1) 运行高度不确定的、概率化的电力系统，电力计划平衡由过去预测负荷侧变化规律转变为必须对新能源波动规律进行预测；2) 新能源功率的大幅波动将导致电力系统运行方式变化多端，如开机方式、潮流方向、保护定值等；3) 运行低惯量的电力系统，电源将分为提供惯量、调频的电源和不提供惯量、调频的电源，频率特性恶化。电力系统运行要向智慧化发展，实现分析在线化、决策智能化、执行自动化，应对一个高度不确定的系统。

4.6 构建促进新能源替代的电力市场体系

促进新能源替代的电力市场设计，要考虑促进新能源的消纳、系统的灵活性和供电充裕性。完善创新新能源发电的交易品种、组织方式、工作流程和交易地域，为新能源高效利用创造条件，并注重发挥新能源边际成本低的优势；同时，要非常注重构建有利于体现灵活调节资源价值的市场机制，通过市场机制推动灵活调节资源价值的可持续发展和功能充分发挥^[24]。

4.7 促进新能源替代的措施路径展望

促进新能源替代的措施路径展望如表2所示，根本上要求“源网荷”由“刚性”向“柔性+灵活+智慧”转变。

表2 促进新能源替代的措施路径展望

Table 2 Prospect of measures to promote new energy substitution

项目	近期	中长期(在近期基础新增)
电源侧	火电灵活性改造,流域水电梯级优化,抽水蓄能电站,新能源电厂并网性能	新型储能及灵活电源发展,冷-热-电-气各类资源协调发展
电网侧	灵活调度,备用共享,跨区系统灵活运行	互联电网容量,智慧调度
负荷侧	电动汽车、空调、热泵等居民负荷灵活调节	可再生负荷(绿氢、电制冷热等),用户侧综合能源系统完善
政策、市场机制	完善增量现货市场、调峰辅助服务市场、灵活调整交易机制	完善辅助服务市场,建立容量市场,健全绿证与配额机制

5 结论

从电力电量平衡角度考虑，新能源替代的基本技术内涵是实现容量和电量两方面的替代，但由于

资源特性，其自身无法独立较好完成这两方面的替代，须依靠和其他技术的协调融合，并在技术经济性上形成对传统电源的比较优势，实现内生增长式替代。新能源替代推进中，要充分考虑储能、需求侧资源等因素，以“新能源+储能+可再生负荷”为核心构建适应大规模新能源接入的多时间尺度多品种调节体系，形成新能源替代坚实的物质基础和调节机制；要构建一个智慧化的运行体系，以适应“瞬息万变”的电力系统；要构建一个能够发现价值的市场体系，引导稀缺资源的投资。

参考文献

- [1] 汪宁渤, 马明, 强同波, 等. 高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 29-35, 50.
WANG Ningbo, MA Ming, QIANG Tongbo, et al. High-penetration new energy power system development: challenges, opportunities and countermeasures[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 29-35, 50(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [4] ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Quantitative synergy assessment of regional wind-solar energy resources based on MERRA reanalysis data[J]. Applied Energy, 2018, 216: 172-182.
- [5] 王耀华, 焦冰琦, 张富强, 等. 计及高比例可再生能源运行特性的中长期电力发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 9-16.
WANG Yaohua, JIAO Bingqi, ZHANG Fuqiang, et al. Medium and long-term electric power development considering operating characteristics of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 9-16(in Chinese).
- [6] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):

- 3699-3705.
- BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705(in Chinese).
- [7] 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): 1843-1856.
- 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): 1843-1856(in Chinese).
- [8] 冯长有. 青海“绿电 15 日”全清洁能源供电运行经验与分析[J]. 电力与能源, 2019, 40(5): 595-598, 632.
- FENG Changyou. Operation experience and analysis of full clean energy power supply during Qinghai “Green Power 15 Days”[J]. Power & Energy, 2019, 40(5): 595-598, 632(in Chinese).
- [9] 刘小聪, 单葆国, 王成洁, 等. 高比例清洁能源替代潜力评估模型及关键影响因素分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2755-2761.
- LIU Xiacong, SHAN Baoguo, WANG Chengjie, et al. Substitution potential model of high proportion of clean energy and analysis of key affecting factors[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2755-2761(in Chinese).
- [10] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- WANG Xifan. Power system optimization planning[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990(in Chinese).
- [11] 王建学, 李清涛, 王秀丽, 等. 大规模新能源并网系统电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3123.
- WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3123(in Chinese).
- [12] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158(in Chinese).
- [13] 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).
- [14] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.
- ZHANG Ning, KANG Chongqing, XIAO Jinyu, et al. Review and prospect of wind power capacity credit[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 82-94(in Chinese).
- [15] 胡嘉骅. 电力系统灵活性提升方法及灵活调节产品获取机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HU Jiahua. Methods to enhance power system flexibility and acquisition mechanism for flexible ramping products[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [16] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
- CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27(in Chinese).
- [17] 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).
- [18] 李文佩, 方华亮, 马溪源, 等. 短时需求响应对含风电电源规划的影响研究[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 122-127.
- LI Wenpei, FANG Hualiang, MA Xiyuan, et al. Study on the impacts of short-term demand response on generation expansion planning with wind power[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 122-127(in Chinese).
- [19] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 考虑环境成本和需求侧管理项目的电源规划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2809-2814.
- ZHANG Xiaohui, YAN Pengda, ZHONG Jiaqing, et al. Generation expansion planning model incorporating environment cost and demand side management programs[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2809-2814(in Chinese).
- [20] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.
- ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on

- planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543(in Chinese).
- [21] 严干贵, 刘嘉, 崔杨, 等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45-52.
YAN Gangui, LIU Jia, CUI Yang, et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling scale by using energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45-52(in Chinese).
- [22] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9(in Chinese).
- [23] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11(in Chinese).
- [24] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力

市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-378.

CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-378(in Chinese).



刘永奇

在线出版日期: 2021-07-27。

收稿日期: 2021-02-08。

作者简介:

刘永奇(1965), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统自动化、大电网安全调度运行、新能源并网消纳、电力市场等方面工作;

*通信作者: 陈龙翔 (1988), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统调度运行、工程前期等方面工作, chen-longxiang@sgcc.com.cn;

韩小琪(1975), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事电力规划、行业政策研究、行业标准化研究和管理等方面工作。

(责任编辑 邱丽萍)

The Key Problem Analysis on the Alternative New Energy Under the Energy Transition

LIU Yongqi¹, CHEN Longxiang^{1*}, Han Xiaoqi²

(1. State Grid of China Corporation of China; 2. China Electric Power Planning & Engineering Institute)

KEY WORDS: alternative new energy; alternative electric power; alternative capacity; balance of electric power and energy

The proposal of the carbon peaking and carbon neutrality goals has accelerated the process of clean and low-carbon energy transition in China, and the topic of alternative new energy has become the focus of scholars at home and abroad. Based on the premise of ensuring power supply adequacy, our paper expounds the basic technical connotation of alternative new energy from the perspective of power balance and electricity balance. Analysis of actual operation data shows that alternative new energy faces huge challenges in power balance and electricity balance. By studying the successful cases of high proportion of new energy power supply in China and the United Kingdom, some experiences on realizing alternative new energy are proposed. At last, we put forward the direction of work in the process of promoting alternative new energy.

From the perspective of power balance and electricity balance, the basic technical connotation of new energy alternative is to realize the alternative electric power and the alternative capacity.

1) Power Balance Equation

$$\sum_{i=1} P_i(m) \geq D(m)[1 + R^D(m)], m = 1, 2, 3, \dots, 8760 \quad (1)$$

2) Electricity Balance Equation

$$\sum_{i=1} E_i(n) \geq E(n)[1 + R^E(n)], n = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (2)$$

Due to the uncertainty and randomness of new energy power output, the power balance and electricity balance of the power system cannot be independently replaced in the time scale from daily to monthly. It must rely on the coordination and integration with other technologies; and in technical economically, it will form a comparative advantage over traditional power sources and achieve endogenous growth substitution.

From the cases of green power 15-day event in

Qinghai province and 18 consecutive days of running without coal power in UK, we learn that it is necessary to consider how to ensure load supply in the absence of wind and light for the power balance of high-proportion new energy power systems. Since the high proportion of new energy power system has great volatility, the controllable and dispatchable power supply in the system is the ballast stone to ensure the real-time balance of power. At the same time, the system also bears a large invisible economic cost, and therefore, relevant dredging mechanisms are needed to give full play to the flexible adjustment capabilities of all aspects.

System reliable capacity supply is shown in Fig. 1.

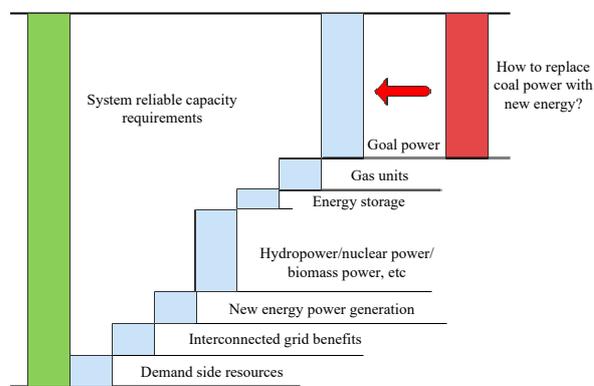


Fig. 1 System reliable capacity supply diagram

In the promotion of new energy alternatives, factors such as energy storage and demand-side resources should be fully considered, and a multi-time scale and multi-variety regulation system adapted to large-scale new energy access should be constructed with "new energy + energy storage + renewable load" as the core. It is full of importance to build an intelligent operation system to adapt to the ever-changing power system and to build a market system that can discover values and guide the investment of scarce resources.