引用格式：肖立业，潘教峰，王孝炯，等．能源强国建设目标特征及实施路径探讨．中国科学院院刊，2026, 41(5): 1006-1017, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251205004.
Xiao L Y, Pan J F, Wang X J, et al. Characteristics and implementation paths of goal for building energy powerhouse. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(5): 1006-1017, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251205004. (in Chinese)

能源强国建设目标特征及实施路径探讨

肖立业[1,3*] 潘教峰[2,4] 王孝炯[2] 孙德强[2] 祁明亮[2] 莫建雷[2] 李慧敏[2] 王 婷[2]
杨 捷[2] 蔺 洁[2] 王宇超[2,4] 陈海婷[2,4]

1 中国科学院电工研究所 北京 100190
2 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190
3 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院 北京 100049
4 中国科学院大学 公共政策与管理学院 北京 100049

摘要 我国是能源消费大国，确保能源有效供给是促进国家发展和民族复兴的核心要务之一。为了保障国家能源供应和能源安全，并大力开发和利用清洁低碳能源，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》中明确指出：“深入实施能源安全新战略，加快构建清洁低碳安全高效的新型能源体系，建设能源强国。推进非化石能源安全可靠有序替代化石能源，坚持风光水核等多能并举，实施非化石能源十年倍增行动”。为了更好地学习和落实中央文件精神，文章探讨了能源强国的目标特征，并就新能源技术重点发展方向及能源电力体制改革提出了3点建议。

关键词 新能源利用技术，新型电力系统，大规模储能，混合储能，电力体制改革

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20251205004
CSTR 32128.14.CASbulletin.20251205004

能源是国民经济和社会文明赖以发展的基石和支柱。我国是人口大国、经济大国、制造业大国，也是能源消费大国，确保能源有效供给是促进国民经济发展和民族复兴的核心要务之一。新形势下，随着化石能源日益枯竭，以及人类对环境保护和气候变化问题的日益关注和重视，我国能源事业发展正面临一系列重大挑战，主要体现在3个方面：① 作为二氧化碳第一排放大国，排放总量超过美国与欧盟之和，碳减排

*通信作者
修改稿收到日期：2026年5月11日

任务艰巨；② 我国石油天然气对外依存度长期高居不下，面临新的国际形势和世界百年未有之大变局，如不改变能源消费结构，我国能源体系将面临中长期安全隐患和风险；③ 以太阳能和风能为代表的新型能源替代化石能源，可以有效降低碳排放，但其大量使用将对能源供需实时平衡及电力系统安全稳定运行带来新的巨大挑战。

为了履行大国担当和推动构建人类命运共同体，习近平主席于2020年9月在第七十五届联合国大会一般性辩论会上正式宣布中国“碳达峰、碳中和”实施目标（以下简称“双碳”目标）。自此以来，我国风力发电和光伏发电迈向新的发展阶段。2023—2025年我国每年新增风电和光伏装机均接近或超过3亿千瓦，占全球新增装机的比重超过50%；至2025年10月底，我国风电与光伏装机容量已经达到17.3亿千瓦①，超过了火电机组的装机容量（约14.5亿千瓦），2030年的风电光伏装机目标大幅度超前实现。2025年9月24日，习近平主席在联合国气候变化峰会上进一步宣布，到2035年，中国风电和太阳能发电总装机容量达到2020年的6倍以上，力争达到36亿千瓦。预计到2060年，我国的风电与光伏装机容量将达到80亿千瓦以上，而电力占终端能源消费的比例将达到80%以上[1]。

大力开发和利用太阳能和风能等清洁低碳能源，不仅是实现“双碳”目标的必然选择，也是实现国家能源独立、保障国家能源安全的必由之路。为此，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》（以下简称《纲要》）中明确指出：“深入实施能源安全新战略，加快构建清洁低碳安全高效的新型能源体系，建设能源强国。推进非化石能源安全可靠有序替代化石能源，坚持风光水核等多能并举，实施非化石能源十年倍增行动”。《纲要》还提出了若干举措，是指导我国未来能源事业发展的纲领性文件。

能源产业和能源科技涉及面广、全局带动性强，建设能源强国对于我国未来发展具有重大战略意义。为此，在认真学习《纲要》的基础上，本文探讨了能源强国的目标特征，并就新能源技术重点发展方向及体制机制建设提出相关建议。

1 能源强国建设目标特征

根据《纲要》的精神和新形势、新需求，本文认为能源强国建设的目标应是建设先进可持续能源体系，保证我国能源安全有效供给与清洁高效利用，其主要特征包括6个方面。

（1）能源供给独立可控。我国是能源消费大国，当前石油和天然气对外依存度过高，如果发生重大国际事件，导致石油和天然气进口受到严重制约，将对我国工农业生产和居民能源消费带来巨大影响。因此，能源强国建设的目标1：要逐步保障能源供给独立而不受外部因素的影响，或者在出现严重不利的国际形势乃至冲突时，对我国的能源进口影响较小，或者即使能源进口受到较大影响，但通过自身能力仍可快速保障供应而不对国内能源市场造成重大冲击。

（2）能源消费经济廉价。我国是经济大国和制造业大国，高能耗工业体量大，能源在终端产品的成本结构中占有较大比例，能源价格将直接影响我国工业产品的国际比较优势和我国居民消费价格水平。因此，能源强国建设的目标2：要保障能源价格具有足够的竞争优势，这不仅是吸引外部投资和维持强大制造业的重要基础条件，也是维持我国经济持续增长和提高人民生活水平的重要保障。

① 截至10月底我国风光发电装机达17.3亿千瓦. (2025-11-25). https://www.news.cn/20251125/12281c606b9c49c38c9fd944fc518801/c.html.

（3）能源形态清洁低碳。我国是化石能源消费大国，也是污染物和二氧化碳排放大国。为了保护环境、践行“绿水青山就是金山银山”理念，实现清洁低碳能源对化石能源的逐步替代，是建设能源强国和实现能源独立的根本出路。因此，能源强国建设的目标3：大力发展太阳能、风能、先进储能和先进核能等新能源产业，并建设与新能源发展需求相适应的新型电力系统。

（4）能源产业体系强大稳固。我国能源产业体系完备，无论是在传统能源领域（如化石能源开采和利用），还是在新能源领域（如先进核能、光伏发电、风力发电和储能产业等），无论是在电力设备制造业领域，还是在电网建设方面，均形成了强大的产业集群。因此，能源强国建设的目标4：一方面要继续巩固提升现有能源产业优势，另一方面还要在相对劣势的领域（如部分高端能源装备和先进能源材料等方面）迎头赶上，使我国能源产业链基本自主、安全、可控。

（5）能源科技创新引领。能源强国，科技先行。党的十八大以来，党中央明确把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，特别强调科技创新要在高质量发展、经济供给侧结构性改革和现代化经济体系构建中发挥核心支撑作用。要建设能源强国，能源科技创新更具基础性和支撑性。因此，能源强国建设的目标5：推进能源科技革命，大力突破制约清洁低碳能源规模化发展的关键核心技术、“卡脖子”技术和重大工程难题，在国际能源科技创新竞争中立于不败之地，并占据能源科技赛道的制高点。

（6）能源体制机制先进。生产力决定生产关系。随着以太阳能和风能为主的新能源不断发展，我国能源体系将面临重大结构性调整，电力在终端能源中的比重将大幅度提高，电力系统将成为能源生产、输配、储存和使用的核心公共平台，从而对能源电力体制机制改革带来一系列新的重大课题。因此，能源强国建设的目标6：大力破除现有能源电力体制中不适应于未来能源体系发展的体制机制障碍，使我国的能源体制机制更加有利于促进新型能源体系的建设，并为建设高效、经济、安全、可靠的能源体系保驾护航。

以上6个方面，科技创新是基础，体制机制是保障，能源产业是支柱，其他3个方面则是服务国家能源需求的目标要求。

2 新能源技术重点发展方向

能源技术涉及面十分广阔[2]：从化石能源开采与清洁高效利用到水电站开发建设，从多种形式的核能到可再生能源，从氢能到火电厂的CCUS（碳捕集、利用与封存），从传统的抽水蓄能到各种形式的新型储能等。尽管能源体系中多种能源技术并存的局面未来不会改变，然而综合考虑各种技术和产业发展趋势，可以认为太阳能发电和风力发电加储能才是新能源未来发展的主导性方向，因而建设相适应的新型电力系统也是至关重要的。基于上述认识和理解，本文重点围绕先进可再生能源利用、废弃能源装备绿色化处理与资源化回收利用、大规模储能技术和混合储能技术、新型电力系统关键技术等发展方向开展讨论。

2.1 先进可再生能源利用技术

近年来，我国风力发电技术和光伏发电技术实现了跨越式发展，特别是光伏发电技术总体已经处于国际领先水平。通过技术创新进一步提升转换效率、延长使用寿命、降低度电成本，并开发新型太阳能和风能利用技术，仍然是可再生能源技术今后的重点研发方向。在太阳电池制备方面，进一步促进硅基电池制备工艺的迭代升级，探索新型高效光伏材料与器件，发展新型叠层电池制备技术，延长光伏组件使用寿命，并持续研发高性价比的关键原材料与核心装备；在太阳热利用方面，进一步研发高参数聚光、高效吸热、高温储热等关键技术与关键材料，研发新一代太

阳能热发电装备，探索聚光太阳热直接用于工业过程的新方法；在风能利用方面，进一步研发超大型风电机组及其关键材料、关键部件与智能运维技术，探索风能直接利用（如风机直接制热）新技术。

2.2 废弃能源装备绿色化处理与资源化回收利用技术

随着早期安装的风电机组、光伏发电设备和储能电池等陆续进入退役期，迫切需要开展退役风电叶片、光伏组件、储能电池等的绿色化处理与回收利用技术的研发。针对退役风电叶片，需要重点研发退役风机叶片资源化再生技术；针对退役光伏组件，需要发展高效拆解、材料分离和有价金属回收等关键技术，进一步完善硅、银、铜等有价值材料的回收工艺，持续提升回收效率和纯度；针对储能电池回收利用，重点攻克高效拆解、材料分离提纯、绿色再生及环保处理等关键技术。

2.3 大规模储能技术和混合储能技术

随着光伏发电和风电装机日益增长，发展安全、环保、经济的大规模储能技术和混合储能技术是应对可再生能源发电间歇性、波动性和随机性并保障新能源大规模并网消纳的关键因素，也是建设新型电力系统的根本保障。

2.3.1 新型抽水蓄能技术

抽水蓄能是技术最成熟、经济性最优、综合性能最佳、应用规模最大的物理储能技术，具有调峰、调频、调相、黑启动、事故备用等多种功能，因而被认为是保障电力系统安全稳定运行、支撑新能源大规模发展的“压舱石”。澳大利亚国立大学Blakers等[3]研究指出，如果有足够的抽水蓄能资源，建设100%的新能源电力系统将比大多数人想象得更加容易、更加经济。然而，传统抽水蓄能电站建设选址对地质条件要求较高，站点资源有限，难以满足未来发展需求。

为了突破传统抽水蓄能电站资源瓶颈，迫切需要发展各种新型抽水蓄能系统[4]，主要包括地下或半地下抽水蓄能系统、高水头抽水蓄能系统、基于深水静压的水下抽水蓄能系统、大规模跨季节抽水蓄能系统等，攻克相应的工程建设难题和关键装备技术。其中，地下或半地下抽水蓄能具有重大开发价值和应用前景。地下抽水蓄能（图1）主要依托地面水库和人造地下水库形成的落差建造，具有选址灵活、不影响环境生态、占地小、天气适应性强等优点。研究表明：地下抽水蓄能系统的经济性与传统抽水蓄能系统基本相当，综合优势显著，是保障可再生能源大规模消纳的优选储能方案之一；我国地下工程建设取得了一系列重大成就，积累了丰富的经验，为保障地下抽水蓄能系统工程建设安全性奠定了坚实的基础——2025年7月雅鲁藏布江下游水电工程开工建设就是最突出的例证。地下抽水蓄能系统涉及的关键技术主要包括：地下工程勘探设计、地下工程建设与智能运维、高水头水泵水轮机组、变速抽水蓄能用电动/发电机组等。半地下抽水蓄能系统利用长距离隧道连接相距较远的2个或多个高落差超大型水库建设而成，也是拓展抽水蓄能资源的重要方式。

2.3.2 电加热储能技术

在终端用户用能结构中，热能的比例超过用能总量的50%。目前，这些热能大部分依靠化石能源获得。因而要实现“碳中和”目标，这50%用热的绿色化是必须面对的问题。随着风电光伏发电的度电成本日益

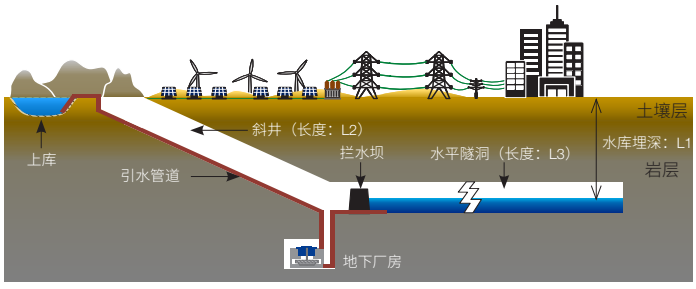


图1 地下抽水蓄能系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of underground pumped-hydro energy storage system

下降（在资源丰富地区，度电成本已经下降至0.10元/度及以下），通过风电和光伏发电供热，已经具有经济优势（与燃煤供热平衡的度电成本大约为0.15元/度[5]）。发展电加热储能技术，不仅可以实现绿色供热，而且可以通过灵活调控电加热功率，可极大地缓解风电和光伏发电的波动性和间歇性对电网的影响。电加热储能还可以与火电机组深度耦合，因而是实现电-热协同调控、支撑新能源系统建设的核心技术之一。

电加热储能系统具有经济性好、灵活、安全、环保、充放电过程可同时进行等显著优势；可以与余热利用、退役火电厂改造利用、火电机组、太阳能光热发电、压缩气体储能的储热环节、工业和民用热力系统等深度耦合，建设地点基本不受限制，因而综合优势十分显著。利用电加热储能系统消纳波动性的可再生能源，再通过其所储存的热能进行发电（如汽轮机发电或二氧化碳发电等），即使电—热—电模式的效率仅为40%，考虑到风电光伏度电成本已经接近或低于0.10元/度，则其发电成本（含购电）也大约只有0.35元/度，可以与煤电持平，较现有太阳能热电站和其他储能更具成本优势。因此，利用电加热储能消纳可再生能源储热再发电，不仅功率灵活可控，而且与煤电机组一样对电网友好，并为电网提供转动惯量，因而可把这种应用称为“可再生能源火电厂”。电加热熔盐储能发电系统（图2），就是这样的一种代表性应用案例。由此可见，电加热储能系统具有广阔的应用前景。

为此，应重点围绕电加热储能系统构建与灵活调控的应用目标，着力开展电热材料与电热元件、高温高导热绝缘材料、宽温区高导热储热介质、高压大功率电加热器、大规模电加热储能阵列结构及灵活控制等关键技术的研究。

2.3.3 新型电池储能技术

我国锂离子电池和全钒液流电池已经得到了很好的发展[6]，技术和产业日趋成熟。该方面的研究，今后应重点关注锂电池系统安全性等问题，进一步提高全钒液流电池的效率、大幅降低其成本。随着储能需求不断扩大，为解决现有电池储能的安全问题、资源

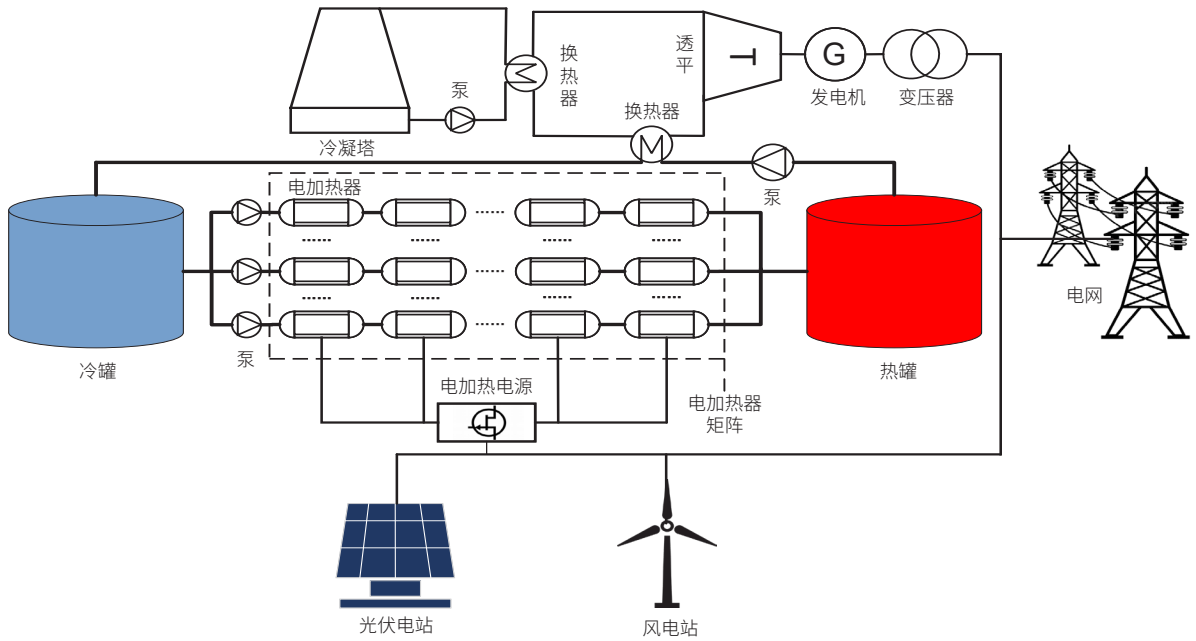


图2　电加热熔盐储能发电系统示意图

Figure 2　Schematic diagram of electric-heating molten-salt energy-storage system

受限问题和度电成本较高等问题，国内外在电池储能领域投入了大量的研究，各种新型电池储能技术不断涌现。当前，固态电池、钠离子电池、铁铬液流电池等新型电池成为热点领域，但其能否成为重要的解决方案之一，仍有待市场验证。为此，仍需要进一步探索各种新型电化学体系，研发新型电极材料和电解质材料，提高电池的安全性和使用寿命，降低电池的制备成本。

2.3.4 混合储能技术

混合储能技术是将2种或多种不同类型的储能技术，通过合理配置和协同控制，集成为一个统一的储能系统，充分发挥多种储能系统的综合优势，弥补单一储能技术的不足，从而满足调频、调峰、惯量支撑、黑启动、紧急功率支撑等多种功能需求。

表1对比了各种储能技术的技术经济性、适用性。基于各种储能技术的综合性能和新型电力系统的发展需求，大力发展以具有机械同步惯量的物理储能（如抽水蓄能、电加热储能）为主、电池储能为辅、短时功率型储能为补充的混合储能技术是该技术领域的主要方向。发展混合储能技术的目的，就是要使多元混合储能系统耦合新能源后，整体具备等效乃至超越传统火电机组的灵活性，并提供足够的惯量支撑，从而为建设新型电力系统提供根本性保障。

为此，在风电和光伏发电厂及其配套储能系统的规划设计阶段，就需要根据新能源发电系统的特性（如发电功率波动特征、出力预测精度等）、电力系统的运行与负荷的用能需求，因地制宜，选择合适的储能技术组合，确定每种储能的容量配置和参数设计。协同控制技术是混合储能系统高效运行的关键，需要研发先进的控制策略和算法，实现不同储能单元之间的协调工作，实时调整各储能单元的充放电功率和运行状态，确保混合储能系统整体运行的高效性、稳定性和经济性。此外，还需要研究各种储能系统的老化和安全失效机理，实时检测和评估各种储能系统的安

表1　各种储能系统及其技术经济性、适用性对比

Table 1　Comparison of various energy-storage systems and their performance

储能类型	适用功率（MW）	寿命（年）	效率（%）	单位功率投资成本（元/kW）	度电成本（元/kW·h）	安全性	环保性	选址灵活	主要适用性功能
抽水蓄能（包括新型抽水蓄能）	100—3 000	50—60	75—80	5 000—8 500	0.15—0.25	好	好	是	调频、日内调峰、调相、惯量支撑、黑启动、事故备用
压缩气体储能	1—300	25—30	50—70	5 000—8 000	0.35—0.45	好	好	否	日内调峰、事故备用
重力储能	1—10	~30	75—80	5 000—6 000	~0.30	好	好	否	分布式储能、小规模调峰、事故备用
电加热储能	10—3 000	30—40	40—97*	2 000—3 000	~0.05—0.10	好	好	是	调频、日内调峰、惯量支撑、黑启动、数日至周内调峰、事故备用
电制燃料	10—100	~10	~40—70	16 000—18 000	不涉及度电成本	一般	较好	是	超长时（跨周、跨月、跨季）能量转移
电池储能	0.001—1 000	~10	60—80	—	0.35—0.70	一般	一般	是	二次调频、小时级调峰、分布式储能、紧急支撑
超级电容器储能	0.1—10	~10	~90	1 500—3 000	**	好	好	是	一次调频、虚拟惯量、紧急支撑
超导储能	0.1—10	≥30	≥90	6 000—1 0000	**	好	好	是	一次调频、虚拟惯量
飞轮储能	0.01—3	~10	80—95	1 500—3 000	**	较好	好	是	一次调频、虚拟惯量

*电加热储能若仅用于供热，效率可达97%以上；若用于再发电，效率可达40%；**此类短时功率型储能系统不涉及度电成本

*If electric heating energy storage is used only for heating, its efficiency can reach over 97%; if used for power generation, its efficiency can reach 40%;

**Short-term power-type energy storage systems do not involve electricity cost per kW·h

全和健康状态，为协调控制目标的实施提供辅助支撑。

2.3.5 可再生能源制备燃料等长周期储能技术

面对可再生能源跨周、跨月、跨季乃至跨年的变化和不确定性，长周期储能技术成为保障清洁低碳能源持续稳定供应的关键。其中，利用可再生能源制氢、制甲烷、制甲醇、制氨等技术，已经日益受到关注[②]。这些技术能够实现可再生能源的大规模、跨季节能量转移，从而有望进一步减少对煤炭等“兜底能源”的使用。近年来，我国在电解水制氢方面出现了明显的投资热，在风电和光伏发电制甲醇、制氨方面也取得了显著进步，显示出电制燃料的开发潜力，但是否具备大规模开发价值，仍有待于取得技术突破和市场检验。可再生能源制燃料技术不仅解决了可再生能源的时空平移问题，还构建了新能源与化工系统的耦合桥梁，可为传统化工行业的低碳转型提供技术路径。

今后，该方面的研究仍需重点关注柔性、低成本制备工艺的开发，使电制燃料工艺能够很好地适应风电和光伏的波动性和间歇性，从而大幅降低电制燃料的用能成本和工艺成本，形成有经济竞争力的解决方案。此外，还应积极布局探索人工光合作用等前沿技术的研发。

2.4 新型电力系统

广义的电力系统是包括发电、输配电网、储能和用电负荷的统一整体。但由于负荷的用电需求要通过前面的环节来实现和保障，且用户用电往往具有一定的刚性，因而本文的电力系统主要是指除负荷以外的其他组成部分。

以新能源为主体的新型电力系统中，新能源资源的不确定性和波动性、低惯量或无惯量支撑将对电力系统的电力电量实时平衡与灵活调节（调频或调峰）和安全稳定运行带来巨大挑战。采用直流电网模式，虽然可以避免频率稳定性问题，但以新能源为主的直流电网，其电压稳定性问题将成为新的挑战；并且，在无储能支撑情况下，直流电网内的潮流分布波动频繁，加之电力电子装置的频繁控制和快速响应，可能导致系统出现新的电磁振荡现象。此外，将交流系统全部改造为直流系统的代价也很大。

因此，未来电网仍将以交流同步电网为主。虽然直流输电系统乃至直流电网会根据实际需要而得到发展，但交流电网仍将是电力输配网络的基础和支撑。基于以上基本认识和判断，本文认为新型电力系统建设应重点关注以下3个方向的技术研究与开发。

2.4.1 新型电力系统规划与稳定控制

我国用电负荷主要集中在中东部地区；主要风电和光伏资源集中于内蒙古、甘肃、青海和新疆等西北部地区；大量水电资源主要集中在西南地区；核电和海上风电资源主要集中于东部沿海地区。同时，风电和光伏又具有一定的时空互补性，且其与水电、火电等电源也具有互补性。中国电力科学研究院郭剑波院士提供的有关统计数据表明，3日内全国范围内风电光伏的最小出力大约只有10%[③]，更极端天气下可能会出现持续时间较长的低出力情况。基于上述基本现实，新型电力系统的规划与稳定控制需开展3个方面的工作。

（1）合理规划布局风电和光伏发电站点及各种储能系统。结合风电和光伏发电的站点资源及其出力波动特征，合理规划和配置新能源基地的风电光伏装机与混合储能系统的容量，使多元混合储能与风电光伏

② 绿氢、绿氨、甲醇：全球能源转型中的关键力量与发展展望. (2024-12-11). https://baijiahao. baidu. com/s? id=1818113377073242605&wfr=spider&for=pc.

③ 郭剑波院士：新型电力系统面临的挑战及“双碳”目标下政策市场机制思考. (2021-10-29). https://www.iesplaza.com/article-3781-1.html.

发电相深度耦合后，整体具备等效乃至超越火电机组的灵活性，并提供必要的机械同步惯量。因此，几乎可以视风光场站（含风电、光伏及配套的混合储能系统）为与火电机组一样特性的电厂。同时，由于大型风光场站一般都有配套的火电厂，因而在风电光伏长时间低出力的情况下，可以由化石能源兜底。这样一来，通过“风光火储”一体化控制与调度，就保障了大型能源基地与传统电厂具有相同的灵活调节特性和足够的机械同步惯量，使新型电力系统转化为与传统电力系统一样的系统。

（2）统筹考虑其他电源的布局，优化乃至重构电网结构。结合风光场站或太阳光热电站、水电、核电、现有火电厂的地理分布、新能源的时空互补性及负荷分布，统筹规划新建配套“兜底电源”（即煤电或气电）、调峰调频储能电站、调压电站的地理分布与建设方案。在此基础上，优化乃至重构输配电网架结构及建设方案[7]（包含适当的交流同步电网规模与布局及其互联方案、直流输电线路与直流电网建设方案等），确保电力系统运行安全稳定、可靠、经济和具备抵御极端天气（如上述低出力情况）的能力。

（3）促进电-热协同规划发展。考虑到供热在终端能源消费中比重很高，在满足电力供应的同时，应采用风电和光伏发电最大限度满足绿色热力供应需求，并实现电力热力供需互动、相互转化、电力储存-热能储存（乃至储氢或绿色燃料）互补优化与互为支撑，统筹规划建设以风电和光伏发电为主的综合能源供应系统。

总之，充分利用具有同步惯量的物理储能与电池储能等构成的混合储能系统，与风电、光伏发电及兜底火电协同规划和控制，则可以将高比例新能源电力系统转化为与传统电力系统一样的系统，从而使复杂问题得以简化。在此基础上，结合其他电源分布和安全稳定运行需求，优化乃至重构电网结构、建设电-热协同调控的综合能源供应系统，就可为构建新型电力系统奠定坚实的基础。

2.4.2 高比例新能源独立电力系统关键技术

高能耗工业园区是我国能源消费和碳排放大户，也是能源技术创新的重要应用场景。随着风电光伏的度电成本日益降低，依托风光资源丰富地区，为高能耗工业园区建设独立电力系统，是促进工业绿色化和降低高能耗工业用户用能成本的重要途径。为此，① 重点推进绿色电力替代工业生产过程中的化石燃料，如发展高压大功率电锅炉、感应加热炉、电极炉、电窑炉、高压大功率加热储热系统等绿色能源消纳技术，加快高能耗工业过程的电气化改造和发展基于新能源的热-电联供；② 推进高比例新能源独立电力系统的电源规划与系统架构设计、混合储能系统优化配置及运行控制等研究，确保独立电力系统在大电网弱支撑或无支撑情况下的安全稳定运行；③ 利用数字化、物联网和人工智能（AI）技术，对能源消耗和生产工艺进行实时监测与优化控制，提升工业园区的综合能效。

2.4.3 农村分布式能源系统关键技术

农村位于电网末端且分布式能源资源丰富，合理利用分散式风电、光伏、微型水电和微型抽蓄电站、生物质能源等，以满足农村绿色清洁用电供能需求，是促进新型能源体系建设和建设美丽乡村的重要组成部分。

近年来，随着分布式能源技术的进步，农村地区正成为可再生能源生产、消费的重要应用场景。为了进一步提高农村绿色用能比例，今后应重点促进农业机械和农用工具电气化及智能化、农民家庭用能清洁化绿色化；加强农村分布式能源系统（含末端微电网、分布式储能和备用分布式发电机组）的技术创新，提高分布式能源的经济性，大幅度降低农户用能成本；通过模式创新，让农民从开发分布式能源中获得经济利益，促进农民增收。

3 能源电力体制面临的挑战与改革建议

随着新能源和电力在能源结构中的占比越来越高，改革现有能源电力体制，也是促进能源强国建设的重要途径之一。

3.1 我国现有能源电力体制面临的挑战

长期以来，我国能源电力体制以计划经济为主，能源以化石能源为主。21世纪初，“厂网分开”体制的实施，迈开了电力市场化改革的步伐。自21世纪10年代以来，化石能源与新能源同步增长，但新能源占比很低，对电力系统基本没有影响；同时，能源市场化程度逐渐提高。在电力体制方面，发电公司面向市场竞争、电网公司承担统一调度，并建立了由多方共同拥有的电力市场交易平台。进入21世纪20年代以来，新能源增长进入快车道，光伏发电和风电采用部分电量（在一定指导价格范围内）竞价上网和部分电量完全采用市场化价格相结合的模式进行交易。同时，电力储能系统不断进入市场，其投资主体与运营模式更是呈现多元化趋势，且价格形成机制因储能系统种类、地区政策、峰谷价差等不同而有较大的差异。当新能源占比逐渐提高以后，现有的能源电力体制已经不适应未来发展需求，主要体现在3个方面。

（1）多重约束下的体制机制设计挑战巨大。对于像我国这样庞大复杂的新型电力系统，面临安全稳定运行、低碳化清洁化、大范围资源优化配置、能源供需多时间尺度平衡、电力供应经济性和可靠性等多目标约束，这对系统运营和相适应的体制机制设计提出了一系列重大挑战，迫切需要加强顶层设计和系统性改革才能有效应对。

（2）合理传导辅助服务的成本成为重大挑战。高比例新能源的并网，增加了电力系统对“备用、调频、调峰”等服务需求，火电机组利用率将大幅降低并将由主导电源向调节性资源和兜底电源方向转变。因此如何加强统筹和系统顶层设计、合理传导成本也将成为重大问题。

（3）在新能源占主导的情景下，“源网储”协同调度控制的现实需求与现有电力市场机制之间矛盾日益突出。我国现有电力体制下，发电厂、输配电网和储能系统分属于不同的主体，并采用不同的市场机制运行，加之各主体间的利益平衡发生变化且交织耦合，从而对系统协调控制、市场交易和管理机制、政策引导机制的设计提出了新的更高要求。

3.2 我国能源电力体制改革建议

为促进新能源和新型电力系统发展，近年来，我国各级政府密集出台了诸多政策和激励措施，但能源电力体制机制和运营模式仍然缺少系统性的改革设计，甚至存在多方面的改革滞后；电力系统基础设施规划和建设顶层设计不够充分，甚至在一些方面存在盲目推进的现象。

为落实《纲要》的精神，更好地适应能源结构变化和调整的需要，本文研究并提出“垂直拆分、横向融合”的改革建议。所谓“垂直拆分”，就是将电网公司的输电、配电业务进行分离，形成跨区大电网、区域电网与配电网等各级电网分离并独立运营的格局；而“横向融合”则是将相应层次的电源（含发电厂和储能电站）业务与输配电业务乃至绿色供热业务合并经营，从而形成各层次“源网储”融合发展的模式，并建立相应的市场体制。

3.2.1 实施“垂直拆分、横向融合”的重大改革

实现从“厂网分开”模式到“源网储”融合发展模式的重大转变，并由不同独立实体分别分层分区地规划、建设、持有和运营电力系统，实现电力交易的高度市场化。

我国现有电力体制是“厂网分开”，在大量储能系统进入市场后，出现了“源”“网”“储”各自分离的现象，即资产的所有权和经营权分属不同主体。在新能源占比越来越高的情况下，电力系统中的“源网储”强相关，迫切需要实现“源网储”（这里的“储”

也包含“储热”）统一规划、建设和协调控制，以满足用户供电需求和绿色供热需求并实现电-热协同调控，但又不宜将全国的“源网储”统一交由一家公司持有和经营。因为这不仅会导致极端的垄断，也会从根本上导致规划、建设和运行上的困难。

为此，建议不同层次、不同区域的电力系统（包含“源网储”）分别由不同的企业独立规划、建设、持有和统一运营及协调控制。即超大型发电厂（包括可再生能源电厂和传统电厂）、超大型储能电站、特高压输电骨干网由一家“全国性电力企业”统一规划、建设、持有和运营，以便于更好地实现各种超大型能源基地时空互补、大范围优化配置和全国平衡。大型发电厂、大型储能电站和区域电网（以省级行政区为单位）由“区域电力企业”统一规划、建设、持有和独立运营，此类区域电力企业并不隶属于上一级的全国性电力系统企业，以便于更好地实现区内统筹协调和区内优化平衡。较大型发电厂、较大型储能电站及地方配电网由“地方电力企业”统一规划、建设、持有和运营；而电力用户（主要是指大型工商业用户，居民用户除外）作为底层，则主导自身配电网、分布式电源和分布式能源网（含分布式电网和基于绿色能源的热力系统）的规划、建设和运营，资产也属电力用户所有。在各层次、各区域电力系统的电源侧，采取措施保障“风光火储”等多类型电源统一控制和协调调度，最大程度地化解风光不稳定性带来的影响，并尽量减少火电的配置。

各层次、各区域电力企业（事实上，也可称之为综合能源企业）互不隶属，各自成为平等的市场运营主体。不同层次、不同区域的电力系统各自作为整体由不同的企业独立运营、各司其职，通过相适应的规范与其他电力系统互联并经由上一级电力系统参与更大范围内的电力平衡与资源配置，明确各主体在调度中的职责和权力。通过以上模式，各主体可在各自运营的系统内统筹考虑投资成本和收益，并建立相应的能源电力市场及其交易平台。在确保各层次、各区域电力企业有充分规划和调度权的情况下，鼓励不同投资主体以股东形式（或所有权和经营权分离形式）参与各类电力资产的投资和建设，并为其设置合理的收益预期。

以上模式对于优化电网结构和电源结构及其分布、加强送端电网灵活调节能力建设、合理布局储能系统、提高受端电网接纳能力、缓解关键断面卡口问题、促进各种先进技术应用、提升输电通道输送新能源的能力和效率等，均具有重大意义和重要作用。

3.2.2 鼓励高能耗企业向太阳能和风能富集区迁移

制定激励政策，鼓励大型高能耗企业在太阳能和风能富集区域建设包含新能源、储能系统和自备电厂的独立能源电力系统以推动“绿电直连、自主消纳”，并实现高能耗产业的转移。作为大型能源电力用户，高能耗企业依托风光等可再生能源资源丰富的地区，建设独立电力系统，有助于降低其能源成本、提高企业竞争力。为此，企业将配套建设自备电厂和储能电站，减少对大电网的依赖，有助于减少电力的远距离输送；减少电力投资，也有助于高能耗企业向绿色能源富集地区转移，助力企业碳减排。在独立电力系统需要依托外部电力系统互联支援的情况下，要制定相应的政策以合理降低外部电力系统的容量费用。

3.2.3 建立和完善电力市场机制及交易平台

由于各层次、各区域、各地区电力企业和电力用户为大量独立主体，可通过建设各独立运营主体的市场化交易平台并实现各交易平台的互联互通，从而建立全国统一电力市场，以打破垄断壁垒、实现电力运营的高度市场化，并有助于解决各区域、各地区或电力用户间的电力交易问题。对于电源侧“风光火储”一体化控制和调度的直供项目，采用统一结算的模式参与市场交易。在市场化定价机制设计中，合理地设计政策让电价更好地反映电力供应充裕性、灵活性、安全保供、碳排放成本等相关因素。

4 总结

本文基于《纲要》的精神，并聚焦新能源新型电力系统建设这一核心目标，阐述了能源强国建设的目标特征，其主要特征包括“能源供给独立可控、能源消费经济廉价、能源形态清洁低碳、能源产业强大稳固、能源科技创新引领、能源体制机制先进”6个方面。针对能源强国建设的实施路径，重点围绕太阳能和风能加储能为主的发展方向，说明了各主要技术方向内涵及发展重点；提出了在源侧以物理储能为主的混合储能耦合新能源等效于火电厂的思路，可以将新型电力系统转化为与传统电力系统一样的系统，使复杂问题得以简化，并建议实施“电-热协同”，建立综合能源系统。基于现有电力体制与新能源规模化发展之间的矛盾，提出了“垂直拆分、横向融合”和建立相应电力市场等方面的改革建议。

致谢 在本文思路形成过程中，得到了方新、李欣欣、任志武、刘应杰和王仲颖等领导和专家的指导；在写作过程中，得到了中国科学院电工研究所赵雷和唐西胜的热情帮助。

参考文献

1 肖立业, 潘教峰. 关于构建以光伏发电加物理储能为主的广域虚拟电厂的建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 549-558.
Xiao L Y, Pan J F. Proposal for establishing wide-area virtual power plant based on PV-dominated energy and physical energy storage system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 549-558. (in Chinese)

2 中国科学院能源领域战略研究组. 中国至2050年能源科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.
Energy Strategy Research Group of Chinese Academy of Sciences. Roadmap of Science & Technology to 2050 for China. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

3 Blakers A, Stocks M, Lu B, et al. Pathway to 100% renewable electricity. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9 (6): 1828-1833.

4 聂子攀, 肖立业, 张京业, 等. 新型抽水蓄能系统发展综述. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 14-25.
Nie Z P, Xiao L Y, Zhang J Y, et al. Review of development of new pumped storage systems. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(10): 14-25. (in Chinese)

5 黄辉, 吴婧涵, 林明彻, 等. 低碳供热技术价格机制研究——以居民热价为例. 北京: 自然资源保护协会, 2025.
Huang H, Wu J H, Lin M C, et al. Study on Pricing Mechanism of Low-carbon Heating Technologies: A Case Study of Residential Heat Prices. Beijing: Natural Resources Defense Council, 2025. (in Chinese)

6 ESPLAZA长时储能网. 中国长时储能产业发展蓝皮书(2025). 北京: ESPLAZA长时储能网, 2025.
ESPLAZA Long Duration Energy Storage Network. Blue Book of LDES: Annual Report of China Long-Duration Energy Storage Industry (2025). Beijing: ESPLAZA Long Duration Energy Storage Network, 2025. (in Chinese)

7 肖立业, 刘怡, 夏孝天, 等. 高比例可再生能源接入条件下的输电骨干网架结构探索. 电工电能新技术, 2020, 39(1): 1-4.
Xiao L Y, Liu Y, Xia X T, et al. Investigation on architecture of backbone transmission system for renewable-energy-dominant power grid. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(1): 1-4. (in Chinese)

Characteristics and implementation paths of goal for building energy powerhouse

XIAO Liye[1,3*] PAN Jiaofeng[2,4] WANG Xiaojiong[2] SUN Deqiang[2] QI Mingliang[2] MO Jianlei[2] LI Huimin[2]
WANG Ting[2] YANG Jie[2] LIN Jie[2] WANG Yuchao[2,4] CHEN Haiting[2,4]
（1 Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract China is a major energy-consuming country, and ensuring effective energy supply is one of the core tasks for promoting national development and national rejuvenation. To guarantee national energy supply and energy security, and to vigorously develop and utilize clean and low-carbon energy, the *Outline of the 15th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China* clearly states: "We will thoroughly implement the new energy security strategy, accelerate the construction of a clean, low-carbon, safe, and efficient new energy system, and build a strong energy nation. We will promote the safe, reliable, and orderly replacement of fossil fuels with non-fossil energy, adhere to the principle of developing multiple energy sources including wind, solar, hydro, and nuclear power, and implement a ten-year action plan to double the amount of non-fossil energy accelerating the construction of a new energy system. Continuously increase the proportion of new energy supply, promote the safe, reliable, and orderly replacement of fossil energy, strive to build a new power system, and build a strong energy country". In order to better study and implement the spirit of the central documents, this study discusses the target characteristics of a strong energy country and puts forward several suggestions on the key development directions of new energy technologies and the reform of the energy and power system.

Keywords new energy utilization technology, new power system, large-scale energy storage, hybrid energy storage, power system reform

肖立业 中国科学院电工研究所研究员，中国科学院科技战略咨询研究院特聘研究员。长期从事电工理论与新技术的研究，主要研究方向为新型电力技术、大规模储能技术与混合储能技术、智能电网技术、超导与新材料在电力和能源方面的应用研究等。E-mail: xiao@mail.iee.ac.cn

XIAO Liye Professor of the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS), and specially appointed researcher at the Institutes of Science and Development, CAS. He has long been engaged in research on theory and new technologies for electrical engineering, mainly focusing on new power technologies, large-scale energy storage technologies and hybrid energy storage technologies, smart grid technologies, the application research of superconductivity and new materials in electricity and energy, etc. E-mail: xiao@mail.iee.ac.cn

*Corresponding author

■责任编辑：岳凌生