DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.06.003

构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究

舒印彪[1]，陈国平[2]，贺静波[2]，张放[2]

（1. 中国华能集团有限公司，北京 100031；2. 国家电网有限公司，北京 100031）

摘要：构建以新能源为主体的新型电力系统，既是我国电力系统转型升级的重要方向，也是实现碳达峰、碳中和目标的关键途径。本文分析了电力系统转型带来的变化、问题及挑战，阐述了新型电力系统的内涵、构建原则与思路；根据电力系统发展的技术特征、新能源接入规模，合理划分新型电力系统的发展阶段并针对性提出各阶段的发展建议。研究认为，新型电力系统以新能源为电能供给主体，可满足不断增长的清洁用电需求，兼具高度的安全性、开放性、适应性；相关系统构建是一项系统性工程，应遵循电力系统的技术演进规律与特征，充分利用成熟技术、存量系统并深入挖掘潜力，同步着力研发新兴技术，积极稳妥并循序渐进实施重大转型。

关键词：新型电力系统；碳达峰；碳中和；新能源；电力转型

中图分类号：TM73　　**文献标识码：**A

Building a New Electric Power System Based on New Energy Sources

Shu Yinbiao[1], Chen Guoping[2], He Jingbo[2], Zhang Fang[2]

(1. China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Building a new electric power system that is based on new energy sources is an important direction for power system transformation and upgrading in China, and it is critical for peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality. In this study, we analyze the changes and challenges that are brought by power system transformation and elaborate on the connotation and building principles of a new electric power system. Moreover, we categorize the development of the new system into stages and propose development suggestions for each stage considering the technical features of the system and the new energy access scale. The new electric power system proposed in this study can satisfy the increasing demand for clean power as it primarily uses new energy sources and it has the features of high safety, openness, and adaptability. Building the new electric power system should follow the technical evolution law and characteristics of power systems; it should further exploit the potentials of mature technologies and current power systems. Meanwhile, emerging technologies should be researched and developed.

Keywords: new electric power systems; carbon dioxide peaking; carbon neutrality; new energy sources; power transformation

收稿日期：2021-10-11；**修回日期：**2021-11-16

通讯作者：贺静波，国家电网有限公司教授级高级工程师，研究方向为电力系统调度运行与控制；E-mail: he-jingbo@sgcc.com.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国碳达峰、碳中和战略及路径研究”(2021-HYZD-16)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

碳达峰、碳中和目标的提出是国家重大战略决策，事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。在能源消费清洁低碳化的进程中，电力占据着能源体系的主导地位，同时电力系统发展面临着艰巨任务 [1~4]。考虑我国各类非化石能源资源禀赋以及开发利用的技术经济性，大力发展新能源是必然选择。建设以新能源为主体的新型电力系统，既是能源电力转型的必然要求，也是实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。

能源电力行业技术资金密集，存在高度的路径依赖，技术路线试错成本极高。构建以新能源为主体的新型电力系统是一项复杂的系统性工程，应超前研判、全面分析电力生产结构改变为电力系统带来的变化与挑战，深入研究电力低碳转型路径及转型过程中的重大问题，力争就技术形态、技术方向等关键问题形成广泛共识。针对于此，本文从一次能源、电源、网络、负荷、平衡模式等方面着手，研究电力系统物质基础、技术基础将要发生的深刻变化，从电力可靠供应、新能源消纳、电网安全运行等方面探讨未来电力系统发展面临的直接挑战；阐述新型电力系统的内涵、构建原则和思路，划分新型电力系统的发展阶段，提出策略性发展建议，以期为电力行业中长期发展提供基础参考。

二、电力系统转型带来的变化

电力系统实现碳达峰、碳中和目标的过程，伴随着传统电力系统向以新能源为主体的新型电力系统转型升级，相关物质基础和技术基础持续深刻变化。

一是一次能源特性变化。电力系统的一次能源主体由可存储和可运输的化石能源转向不可存储或运输、与气象环境相关的风能和太阳能资源，一次能源供应面临高度不确定性 [5,6]。

二是电源布局与功能变化。根据我国风能、太阳能资源分布，新能源开发将以集中式与分散式并举，电源总体接入位置愈加偏远、愈加深入低电压等级 [7,8]。未来新能源作为主体电源，不仅是电力电量的主要提供者，还将具备相当程度的主动支撑、调节与故障穿越等“构网”能力；常规电源功能则逐步转向调节与支撑。

三是网络规模与形态变化。西部、北部地区的大型清洁能源基地向东中部地区负荷中心输电的整体格局不变，近期电网规模仍将进一步扩大 [9]。电网形态从交直流混联大电网向微电网、柔直电网等多种形态电网并存转变。

四是负荷结构与特性变化。能源消费高度电气化，用电需求持续增长。配电网有源化 [10]，多能灵活转换，“产消者”广泛存在，负荷从单一用电朝着发 / 用电一体化方向转变，调节支撑能力增强。

五是电网平衡模式变化。新型电力系统供需双侧均面临较大的不确定性，电力平衡模式由“源随荷动”的发 / 用电平衡转向储能、多能转换参与缓冲的更大空间、更大时间尺度范围内的平衡 [11~14]。

六是电力系统技术基础变化。电源并网技术由交流同步向电力电子转变，交流电力系统同步运行机理由物理特性主导转向人为控制算法主导 [15,16]；电力电子器件引入微秒级开关过程，分析认知由机电暂态向电磁暂态转变 [17,18]；运行控制由大容量同质化机组的集中连续控制向广域海量异构资源的离散控制转变；故障防御由独立“三道防线”向广泛调动源网荷储可控资源的主动综合防御体系转变。

三、电力系统面临的问题与挑战

（一）电力供应保障

一是保障供应充裕的基础理论面临挑战。在全球气候变化、可再生能源大规模开发的背景下，可再生能源资源禀赋在长期演化过程中会发生显著变化。电源、电网的规划决策面临资源禀赋和运行双重不确定性且具有明显的路径依赖性。上述特征为传统资源禀赋评估与规划理论带来重大挑战。

二是新能源小发时保障供应难度大。随着新能源发电的快速发展，可控电源占比下降，新能源“大装机、小电量”特性凸显，风能、太阳能小发时保障电力供应的难度加大。在碳中和阶段，火电占比将进一步下降，新能源装机规模持续提升，而负荷仍将保持一定增长，实时电力供应与中长期电量供应保障困难更加突出。

三是罕见天象、极端天气下的供应保障难度更

大。日食等罕见天文现象将显著影响新能源出力；随着全球变暖、气候异常的加剧，飓风、暴雪冰冻、极热无风等极端天气事件不断增多增强，超出现有认知。罕见天象与极端天气具有概率小、风险高、危害大的特征，在新能源高占比情景下的影响极大，推高供电保障成本。

（二）系统平衡调节

一是供需平衡基础理论面临挑战。随着新能源占比的持续提高，供需双侧与系统调节资源均呈现高度不确定性，系统平衡机制由“确定性发电跟踪不确定负荷”转变为“不确定发电与不确定负荷双向匹配”。供需双侧运行特性对气候等外部条件的依赖性较高，针对传统电力系统建立的供需平衡理论亟需发展完善。

二是日内调节面临较大困难。新能源出力的随机波动性需要可控电源的深度调节能力予以抵消，电力系统现有的调节能力已基本挖掘殆尽，近期仍需更大的调节能力以满足新能源消纳需求。远期新能源成为主力电源后，依靠占比不断下降的常规电源以及有限的负荷侧调节能力难以满足日内消纳需求。

三是远期季节性调节需求增大。新能源发电与用电存在季节性不匹配，夏、冬季用电高峰期的新能源出力低于平均水平，而春、秋季新能源大发时的用电水平处于全年低谷。现有的储能技术只能满足日内调节需求，在新能源高占比情景下，季节性消纳矛盾将更加突出。

（三）安全稳定运行

一是稳定基础理论面临挑战。新能源时变出力导致系统工作点快速迁移，基于给定平衡点的传统 Lyapunov 稳定性理论存在不适应性。新能源发电有别于常规机组的同步机制及动态特性，使得经典暂态功角稳定性定义不再适用。高比例的电力电子设备导致系统动态呈现多时间尺度交织、控制策略主导、切换性与离散性显著等特征，使得对应的过渡过程分析理论、与非工频稳定性分析相协调的基础理论亟待完善。

二是控制基础理论有待创新。传统电力系统的控制资源主要是同步发电机等同质化大容量设备。而在新型电力系统中，海量新能源和电力电子设备从各个电压等级接入，控制资源碎片化、异质化、黑箱化、时变化，使得传统基于模型驱动的集中式控制难以适应，需要新的控制基础理论对各类资源有效实施聚纳与调控。

三是传统安全问题长期存在。在未来相当长的时间内，电力系统仍以交流同步电网形态为主；但随着新能源大量替代常规电源，维持交流电力系统安全稳定的根本要素被削弱，传统的交流电网稳定问题加剧。例如，旋转设备被静止设备替代，系统惯量不再随规模增长甚至呈下降趋势，电网频率控制更加困难；电压调节能力下降，高比例新能源接入地区的电压控制困难，高比例受电地区的动态无功支撑能力不足；电力电子设备的电磁暂态过程对同步电机转子运动产生深刻影响，功角稳定问题更为复杂。

四是高比例电力电子、高比例新能源（“双高”）的电力系统面临新的问题。在近期，新能源机组具有电力电子设备普遍存在的脆弱性，面对频率、电压波动容易脱网，故障演变过程更显复杂，与进一步扩大的远距离输电规模相叠加，导致大面积停电的风险增加；同步电源占比下降、电力电子设备支撑能力不足导致宽频振荡等新形态稳定问题，电力系统呈现多失稳模式耦合的复杂特性。在远期，更高比例的新能源甚至全电力电子系统将伴生全新的稳定问题。

（四）整体供电成本

新能源平价上网不等于平价利用。除新能源场站本体成本以外，新能源利用成本还包括灵活性电源投资、系统调节运行成本、大电网扩展与补强投资、接网及配网投资等系统成本。国内外研究表明，新能源电量渗透率超过 10%~15% 以后，系统成本将进入快速增长的临界点，未来新能源场站成本下降很难完全对冲消纳新能源所付出的系统成本上升；随着新能源发电量渗透率的逐步提高，系统成本显著增加且疏导困难，必然影响全社会供电成本 [19]。

四、新型电力系统的内涵、构建原则与思路

应对电力系统面临的问题与挑战，应科学构建新型电力系统，保障国家能源转型战略实施。构建

以新能源为主体的新型电力系统，必须坚持系统思维，遵循电力系统的技术特点和客观规律，充分利用成熟技术、存量系统并深入挖掘潜力，“开放包容”支持新技术发展，积极稳妥、循序渐进实现转型。

（一）新型电力系统的内涵

新型电力系统以新能源为供给主体，满足不断增长的清洁用电需求，具有高度的安全性、开放性、适应性。

在安全性方面，新型电力系统中的各级电网协调发展，多种电网技术相互融合，广域资源优化配置能力显著提升；电网安全稳定水平可控、能控、在控，有效承载高比例的新能源、直流等电力电子设备接入，适应国家能源安全、电力可靠供应、电网安全运行的需求。

在开放性方面，新型电力系统的电网具有高度多元、开放、包容的特征，兼容各类新电力技术，支持各种新设备便捷接入需求；支撑各类能源交互转化、新型负荷双向互动，成为各类能源网络有机互联的枢纽。

在适应性方面，新型电力系统的源网荷储各环节紧密衔接、协调互动，通过先进技术应用和控制资源池扩展，实现较强的灵活调节能力、高度智能的运行控制能力，适应海量异构资源广泛接入并密集交互的应用场景。

（二）新型电力系统构建原则

坚持问题导向、目标导向和科学发展原则来构建新型电力系统，积极稳妥推进转型。①问题导向，即抓住新能源发展过程中的主要矛盾，兼顾当前困难与长远挑战，通过系统重构、技术与体制机制创新来突破新能源发展瓶颈。②目标导向，即以按期实现碳达峰、碳中和目标为使命，选择适宜的技术路线，“倒排”发展路径，兼顾转型过程中能源电力安全。③科学发展，即充分考虑能源电力行业资产、资金、技术密集，路径依赖较强的特点，切实体现电力系统的技术特点和发展规律，保持渐进过渡式转型发展。

（三）新型电力系统构建思路

基于以上构建原则，研判未来新型电力系统技术形态，塑造适应全新电力生产结构的网络形态和平衡模式，在空间、时间上匹配电力供给与需求，据此设计技术可行、成本适当的发展路径。

1. 技术形态

在未来较长的时间内，电力系统仍将以交流电技术为主导，主要原因有：一是当前全国电力系统资产规模超过 16 万亿元，90% 的在运煤电装机容量投产不满 20 a，庞大的存量系统仍以交流电技术为基础，不可能“急刹车”“急转弯”；二是未来火电、水电、核电等同步电源装机容量和发电量的占比均在不断下降，但仍占据相当的比例（见图 1），如到 2060 年同步电源预计仍占据装机容量的 25%、发电量的 44%，主要以“大开机、小出力”方式运行（出力占比可达 79%），为电力系统提供必要的调节与支撑。因此，未来的电力系统必将在传承中发展，长期保持以交流电为基础的技术形态，基本原理、技术要求不会发生根本性改变；交流电网仍是电力系统的网架基础，各类电源直接或间接以交流电技术并入电网。

2. 网络形态

一是以交直流互联为大电网主干。我国能源资源与需求逆向分布的基本国情，新能源出力的随机性、强时空相关性，都决定了近期交直流互联大电网仍需扩大规模才能满足远距离大规模输电、新能源跨省 / 跨区消纳平衡的需求。二是多种组网形式并存。交流电力系统需要同步电源的支撑，难以适应新能源集中开发、海上风电、大量分布式新能源接入等局部场景；应鼓励发展分布式微网、纯直流电力系统等多种组网技术，因地制宜选择技术路线。

3. 平衡形态

力求以储能为媒介逐步实现发用电解耦。当前电力系统的实时平衡依赖出力可调的常规电源，而新型电力系统将以出力不可调节的新能源发电为主体，发电侧调节能力显著下降；需要通过需求响应、多能互补等方式充分挖掘负荷侧的调节能力，同步开发能够与电能高效双向转换并可大量、长期存储的二次能源（储能），使“发 – 用”实时平衡变为“发 – 储 – 用”实时平衡。

4. 发展路径

循序渐进构建新型电力系统。能源电力行业技术资金密集，已形成的庞大存量资产不可能“推倒重来”，适宜采取渐进过渡式发展方式。在近期，

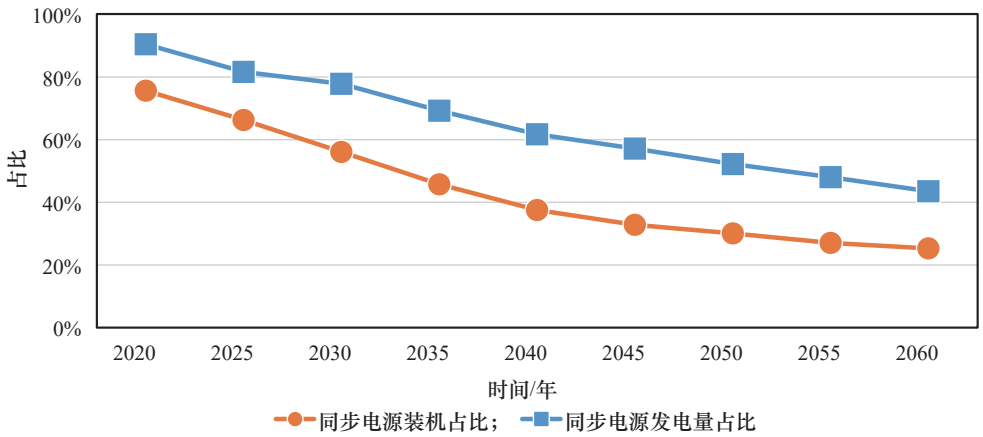

图 1　同步电源装机及发电量占比的变化趋势

新能源快速发展的需求较为迫切，亟需成熟、经济、有效的技术与产品方案来应对相应挑战。着眼远期，当前电力系统的物质基础、技术基础难以匹配新型电力系统的需求，应在大规模储能、高效电氢转换、CCUS（碳捕集、利用与封存）、纯直流组网等颠覆性技术方面尽快取得突破；不同的技术将导向不同的电力系统形态，未来发展路径存在较大的不确定性。为此，近期应重点挖掘成熟技术的潜力，支撑新能源快速发展，同步开展颠覆性技术攻关；远期在颠覆性技术取得突破后，推动电力系统逐步向适应颠覆性技术的新形态转型。

（四）新型电力系统的发展阶段

1. 传统电力系统转型期

新能源快速发展，“双高”影响处于“量变”阶段，常规电源仍是电力电量供应主体，新能源作为补充。发用电的实时平衡仍然是主要特征，依靠以抽水蓄能为主体的成熟储能技术基本满足日内平衡需求。跨区输电、交流电网互联的规模进一步扩大并“达峰”。本阶段内，充分开发现有资源、挖掘可用技术潜力，同步开展支撑更高比例新能源的颠覆性技术研发。

2. 新型电力系统形成期

新能源成为装机主体，具备相当程度的主动支撑能力；常规电源功能逐步转向调节与支撑；大规模储能技术取得突破，实现日以上时间尺度的平衡调节。存量电力系统向新形态转变，交直流互联大电网与局部全新能源直流组网、微电网等多种形态共存。在此阶段，“双高”影响转入质变，已有的技术和发展模式面临瓶颈，颠覆性技术逐步成熟并具备推广应用条件。

3. 新型电力系统成熟期

依托发展成熟的颠覆性技术，完成全新形态的电力系统构建，新能源成为主力电源，发用电基本实现解耦。新能源以多种二次能源形式、多种途径传输和利用，将因地制宜发展多种形态（如输电与输氢网络共存等）。这一阶段，颠覆性技术高度成熟并获得广泛应用，新型电力系统基本构建完成。

五、构建新型电力系统的重点举措

（一）加快措施布局应对转型期问题

1. 保障电力供应与新能源消纳

在电源侧，一是提升电力供应能力。推进西部、北部地区大型新能源基地建设，因地制宜发展东中部地区的分布式新能源，推动海上风电逐步向远海拓展。煤电从“增容控量”“控容减量”到“减容减量”，发挥托底保障作用，合理利用存量资产，科学谋划退出路径。加快开发水电，重点推进西南地区的优质水电建设。安全有序开展沿海地区的核电建设，适时推动内陆核电建设。二是提升有功调节能力。加快在运煤电机组灵活性改造，提升机组调节速率与深度调峰能力，新建煤电均应具备深度调峰能力。有序发展天然气调峰电源，充分发挥启停耗时短、功率调节快的优势，重点在新能源发电渗透率较高、电网灵活性较低的区域开展建设。鼓励或要求新能源按照一定比例配置储能。研究水电站增设大泵，具备一定的抽水调节能力。

在电网侧，转型期新能源大规模集中开发并远距离外送的格局将进一步加强，亟需加强跨省、跨区输电通道建设，打造大范围资源优化配置平台；同步加强送端、受端交流电网，扩大联网规模，可靠承载跨区域、大规模的输电需求。推动建设适应分布式、微网发展的智能配电网，促进电、冷、热、气等多能互补与协调控制，满足分布式清洁能源并网、多元负荷用电的需要，促进终端能源消费节能提效。积极开展分布式微电网建设，在内部自治的同时与大电网协调互动。拓展灵活柔性输电等技术应用，适应送端新能源大规模集中接入、受端多落点直流组网等应用场景。

在负荷侧，全面拓展电力消费新模式，发展“互联网 +”智慧能源系统，发挥电网负荷的灵活调节能力，增强源荷互动活力。着力开发需求响应资源，在供需紧张地区配置削峰需求响应，在新能源高占比地区配置填谷需求响应。

在储能侧，抽水蓄能技术相对成熟、单位投资成本低、寿命长，有利于大规模能量储存；鉴于抽水蓄能规划建设周期较长，而电力系统已面临调节能力不足的现状，应优先发展、尽早启动。因抽水蓄能可开发资源有限，压缩空气储能、飞轮储能、电化学储能、电磁储能、储热、化学储能（以氢储能为主）等新型储能技术将成为构建新型电力系统的重要基础，有望在长周期平衡调节、安全支撑等方面发挥关键作用。

2. 保障电网安全稳定运行

转型期的电力系统仍然是交流电力系统，必须遵循交流电力系统的基本原理和技术规律，寻求新的手段、加快措施布局，保障足够的系统惯量、调节能力、支撑能力，筑牢电网安全稳定基础。

系统惯量是系统安全运行的基本要求。一是保持适度规模的同步电源，通过技术创新来调整常规电源的功能定位，在政策层面保障燃煤机组从装机控制转向排放控制。二是扩大交流电网规模，提高同步电网整体惯量水平，增强抵御故障能力，更好促进清洁能源消纳的互联互通。三是开发新型惯量支撑资源，发展新能源、储能等方面的新型控制技术，提高电力电子类电源对系统惯量的支撑能力。

调节能力是电力系统适应不断加大的波动性、有功 / 无功冲击的重要保证。关于调峰，在提升电源侧调节能力的同时，推进电动汽车、分布式储能、可中断负荷参与调峰，扎实提高电网资源配置能力，共享全网调节资源。关于调频，推动新能源、储能、电动汽车等参与系统调频，发挥直流输电设备的频率调制能力。关于调压，发挥常规机组的主力调压作用，利用柔性直流、柔性交流输电系统（FACTS）设备参与调压，研究电力电子类电源场站级的灵活调压，探索分布式电源、分布式储能参与低压侧电压调节。

支撑能力是电力系统承载高比例电力电子设备、确保高比例受电地区安全稳定运行的关键。一是开展火电、水电机组调相功能改造，鼓励退役火电改调相机运行，提高资产利用效率。二是在新能源场站、汇集站配置分布式调相机，在高比例受电、直流送受端、新能源基地等地区配置大型调相机，保障系统的动态无功支撑能力，确保新能源多场站短路比水平满足运行要求。三是要求新能源作为主体电源承担主体安全责任，通过技术进步来增强主动支撑能力。

（二）论证并启动转型期重大课题研究

1. 重大基础理论研究

在新型电力系统供需平衡理论方面，考虑供需双侧特性对气候、天气条件的依赖性以及供需双侧与系统调节资源的高度不确定性，研究并建立以新能源为主体的新型电力系统供需平衡基础理论；厘清气候变化与可再生能源开发的交互作用机理，揭示不确定性与规划 / 运行策略的耦合作用机理，形成不确定供需双向匹配的优化决策理论和方法。

在“双高”电力系统稳定分析理论方面，考虑“双高”电力系统的多时间尺度交织、控制策略主导、切换性与离散性显著等特征，厘清系统扰动后的过渡过程并建立完整的分析理论，形成科学的稳定分类体系，提出针对不同稳定分类的建模准则和分析方法。

在新型电力系统的控制理论方面，针对特性各异且黑箱化的海量动态元件接入“双高”电力系统的基本特征，重点突破广域分散协同优化控制理论，在设备层面构建兼容各种异构设备的通用稳定控制协议，实现元件即插即用、分散式自趋稳；在系统层面提出广域响应驱动的协调控制方法，构建多级协调的稳定控制体系，支撑开放包容的新型电力系统运行。

2. 关键应用技术研究

在新能源“构网”主动支撑技术方面，加快推广电流源型主动支撑技术、电压源型自同步控制技术，提升新能源机组对弱电网的适应性、对交流电网的支撑能力；推动作为同步电源的光热发电工程化应用。

在大规模远距离海上风电及送出技术方面，尽快在风机本体及汇集、升压与送出系统设备及技术方面取得突破，保障远海分散式风电的灵活接入与高效安全送出。

在储能支撑电网安全运行技术方面，充分利用新型储能系统调峰幅度大、响应速度快、短时功率吞吐能力强、调节方向易改变等优点，在辅助调峰、平滑新能源发电功率等基础功能外，重点提升储能在电力系统发生故障或波动时的快速响应功能，为系统提供阻尼、惯量等动态支撑。

在“双高”电力系统仿真评估技术方面，新型电力系统的物理形态和运行特性更为复杂，现有仿真分析手段不足以支持对电网的认知需要，亟需突破机电、电磁多时间尺度的大电网暂态仿真分析技术，提高对新型电力系统特性的认知水平。

在源网荷储资源协调控制技术方面，利用“大云物移智链”等先进技术手段，研究主动配电网运行分析及协调控制技术、供需互动服务技术、分布式微网自平衡技术，实现广域分布式海量源网荷储资源的总体协调控制。

在“双高”电力系统故障防御技术方面，海量电力电子设备接入新型电力系统之后将极大改变系统的暂态特性，既带来新的稳定问题，也因其数字式快速调控能力而给稳定控制提供新的机遇和选择；研究适应“双高”电力系统的综合安全防御体系，利用现代信息通信技术来广泛调动各类控制资源，实现经济、高效、智能的故障快速判断清除以及故障后的紧急协调控制、传播路径阻断。

3. 技术标准布局

以标准化组织为依托，联合国家、行业相关机构及产业上下游单位，开展新型电力系统技术标准体系建设；加快新能源并网、多元负荷接入、源网荷储协同控制等重要标准的研究制定，对技术、产业发展起到引领方向、保障质量的作用。

在电源侧，加快提升新能源并网标准水平，逐步具备与同步电源相近的运行支撑能力；重构水电和火电机组的设计、制造、运行技术标准体系；推进抽水蓄能、电化学储能电站建设的标准化。

在电网侧，强化源网荷储协同控制标准化的顶层设计，加快广域分散协同优化控制标准研究；深化灵活柔性输电技术标准体系建设，加快分布式微电网、智慧配电网重要核心标准研制。

在负荷侧，优化完善电动汽车充换电、港口岸电设施技术标准体系，加快虚拟电厂、需求侧响应技术标准体系建设和关键标准研制，满足负荷与电网良性互动的需要。

（三）发挥远期支撑作用的颠覆性技术

在传统技术路线下构建以新能源为主体的新型电力系统存在困难，需要颠覆性技术革新。鉴于颠覆性技术突破存在较大的不确定性、需要长期高投入，建议加大国家级科技计划支持，在转型期论证并实施国家科技重大专项，着力开展技术攻关，为构建新型电力系统、实现碳中和目标提供技术支撑。

在高效电氢双向转换技术方面，充分发挥氢能作为含能体二次能源的优势，推动利用富余的可再生能源制取“绿氢”，借助电氢转换与储存装置，实现跨季节、跨行业的可再生能源存储与调节，解决长周期电量平衡问题。

在新型储能技术方面，争取在具备大容量、高安全、长寿命、低成本特征的变革性储能方向取得重大突破，构建广域协同的储能形态，成为完全可观可控的调节资源，全面满足各类应用场景（从暂态到稳态）的技术需求。

在高效 CCUS 技术方面，目前 CCUS 技术的效率、成本与能耗问题制约了商业应用规模，应加大技术研发力度，充分挖掘应用潜能，助推跨系统循环碳经济发展。CCUS 技术的成熟与应用是碳中和阶段煤电存续的前提条件，有利于保持一定比例的同步电源规模，将有力支撑交流电力系统的安全运行。

在全新能源直流组网技术方面，应充分发挥柔性直流可实现新能源无同步电源并网、大规模多点汇集和送出方面的优势，重点研发全新能源输送的多端特高压柔直技术，支持在网架薄弱、缺乏同步电源支撑的地区集中开发新能源的需求。

六、对策建议

（一）试点开展新型电力系统建设

西藏、青海、新疆等省份的可再生能源资源禀赋良好，相关发电装机容量、发电量的占比均位居全国前列，青海电网已连续多年成功开展全清洁能源供电实践。建议在 3 个省份率先启动新型电力系统建设试点工作，充分发挥电网支撑、拉动、服务功能，全方位推动当地经济社会的可持续发展，为全国开展新型电力系统建设积累经验。

（二）建立健全电力绿色转型政策体系

建议加快制定符合煤电由电力电量主要提供者向调节支撑功能提供者转变的产业政策，缓解未来电力供应保障、电网安全运行的潜在风险。合理实施大容量海上风电、高效率光热发电等关键新兴技术的补贴扶持政策，统筹推进项目示范、应用布局、标准体系、盈利模式设计，促进产业综合效益提升和可持续发展。考虑不同类型储能发挥的功能以及受益对象，按照“谁受益、谁承担”原则构建成本疏导机制，为储能行业快速发展提供必要条件。

（三）充分发挥市场配置资源的决定性作用

打破省份之间的市场壁垒，建立适应大范围市场运作的输配电价机制，完善网源荷储协调互动机制，推动建设全国统一电力市场。拉大峰谷分时电价、丰枯季节电价，完善辅助服务市场，充分激发需求侧响应、煤电灵活性改造等灵活性资源作用的发挥。完善碳排放市场，加快构建有利于 CCUS 技术升级的市场机制，推动燃煤发电机组尽快实现净零排放。

（四）凸显科技创新的支撑引领作用

发挥社会主义市场经济条件下新型举国体制优势，实施国家重大科技攻关专项计划，打造深度融合的“政产学研用”科技创新体系。加强新型电力系统基础理论研究，集中突破新型电力系统协调控制等关键技术体系以及高效碳捕捉和循环利用、超大规模储能等颠覆性技术系列。联合开展核心技术装备的研制攻关，推进科技示范工程建设，整体性提升我国电工电气装备的技术水平。

参考文献

[1] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究: 综合卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Research Group of Chinese Energy Development Strategy. Research on mid- and long- term (2030, 2050) energy development strategy of China: Comprehensive volume [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[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 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Research Group of Strategy of Energy Field of China. Energy technologies roadmap to 2050 of China [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[3] 吴敬儒. 中国电力工业2010—2050 年低碳发展战略研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
Wu J R. Research on low carbon development strategy of Chinese electrical industry in 2010—2050 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.

[4] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望 [J].电网技术, 2009, 33(2): 1–7.
Kang C Q, Chen Q X, Xia Q. Prospects of low-carbon electricity [J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1–7.

[5] 黄学农. 国家能源局: 我国可再生能源实现跨跃式发展——我国可再生能源发展有关情况介绍 [J]. 中国电业, 2021 (4): 6–9.
Huang X N. National Energy Administration: The leapfrog development of China’s renewable energy: Introduction to China’s renewable energy development [J]. China Electric Power, 2021 (4): 6–9.

[6] 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.

[7] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493–5505.
Chen G P, Dong Y, Liang Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493–5505.

[8] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20–26.
Chen G P, Li M J, Xu T, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1) : 20–26.

[9] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1–11.
Zhou X X, Chen S Y, Lu Z X. Review and prospect for power system development and related technologies: A concept of three-generation power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1–11.

[10] 刘伟, 彭东, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1–6.
Liu W, Peng D, Bu G Q, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid connected photovoltaic generation [J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1–6.

[11] 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 M J, Chen G P, Dong C, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System technology, 2019, 43(11): 3979–3986.

[12] 李强, 袁越, 谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 115–122.
Li Q, Yuan Y, Tan D Z. Progress on application of energy storage technology in wind power integration [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010, 38(1): 115–122.

[13] 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 W L, Qiu M, Lai X K. Application of energy storage technologies in power grids [J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1–9.

[14] 曾鸣, 许彦斌. 综合能源系统要义: 源网荷储一体化+多能互补 [N]. 中国能源报, 2021-04-12(04).
Zeng M, Xu Y B. Essentials of integrated energy system: Integration of source, network, load and storage + multi-energy complementarity [N]. China Energy News, 2021-04-12(04).

[15] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1–7.
Zhang W L, Tang G F, Zha K P, et al. Application of advanced power electronics in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1–7.

[16] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999–5008.
Zhou X X, Lu Z X, Liu Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999–5008.

[17] 陈国平, 李柏青, 李明节, 等. 新一代特高压交直流电网仿真平台设计方案 [J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3228–3237.
Chen G P, Li B Q, Li M J, et al. New generation UHVAC/DC power grid simulation platform design scheme [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3228–3237.

[18] 周孝信, 田芳, 岳程燕, 等. 直流输电系统的电磁暂态实时数字仿真 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
Zhou X X, Tian F, Yue C Y, et al. Electromagnetic transient real-time digital simulation of HVDC transmission system [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.

[19] 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): 369–379.
Chen G P, Liang Z F, Dong Y. 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): 369–379.