

# 我国电力安全供应保障策略研究

饶宏<sup>1</sup>, 韩丰<sup>2</sup>, 陈政<sup>3</sup>, 黄国日<sup>3</sup>, 王丹<sup>2</sup>, 张野<sup>1</sup>, 蔡万通<sup>1\*</sup>, 徐敏<sup>1</sup>, 蒋维勇<sup>2</sup>, 周保荣<sup>1</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 2. 国网经济技术研究院有限公司 北京 102209;  
3. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广州 510663)

**摘要:** 电力事关国计民生、国家安全, 在推进碳达峰、碳中和过程中确保电力安全稳定供应是必须审慎面对的重大问题; 针对性分析我国电力供应的薄弱环节与面临挑战, 构建新时期电力安全供应保障体系, 是切实推动电力安全供应保障能力现代化、助力经济社会高质量发展的重要支撑。本文梳理了电力安全供应研究进展, 以为开展电力安全供应保障研究提供基础认知; 分析了我国电力安全供应现状, 研判了“十四五”时期及中长期我国电力安全供应形势; 结合近期发生的限电事件, 总结了我国电力供应存在的主要问题及挑战。研究提出了保障电力安全供应需采取的坚持安全第一、坚持低碳化路径、坚持市场化改革方向、坚持科技创新核心作用等原则, 构建了电力安全供应保障体系的“三步走”发展步骤。为此建议, 增强电力供应保障能力、筑牢电力供应安全根基, 发挥需求侧关键作用、提升电力供应本质安全水平, 构建以数字化技术为支撑的新一代电力安全供应技术体系, 完善市场体系和市场机制、形成全员参与的电力安全生态。

**关键词:** 电力安全; 供应保障; 碳达峰、碳中和; 新型电力系统

中图分类号: TM-9 文献标识码: A

## Strategy for Guaranteeing Power Supply Security of China

Rao Hong<sup>1</sup>, Han Feng<sup>2</sup>, Chen Zheng<sup>3</sup>, Huang Guori<sup>3</sup>, Wang Dan<sup>2</sup>, Zhang Ye<sup>1</sup>,  
Cai Wantong<sup>1\*</sup>, Xu Min<sup>1</sup>, Jiang Weiyong<sup>2</sup>, Zhou Baorong<sup>1</sup>

(1. China South Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing, 102209, China; 3. Energy Development Research Institute, China South Power Grid, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Electric power is vital for the national security, economy, and people's livelihood of a country. Ensuring the stable and secure supply of electric power is crucial for achieving carbon peaking and carbon neutrality. Therefore, it is imperative to analyze the weaknesses and challenges of power supply security in China and construct a power supply guarantee system that adapts to the new era and facilitate high-quality economic development. Herein, the research progress of power security supply is reviewed, the current status of power supply in China is summarized, and the trend in power security supply in China during the 14th Five-Year period and for the medium and long terms is analyzed. Moreover, considering the recent power rationing incidents, the problems and challenges for power supply in China are summarized and analyzed. On this basis, the basic principles of adhering to security first, a low-carbon path, market-oriented reforms, and technological innovations are proposed, and a three-step roadmap for constructing a new power supply guarantee system is investigated. Furthermore, we propose the following suggestions: (1) enhancing China's power supply

收稿日期: 2023-01-26; 修回日期: 2023-03-22

通讯作者: \*蔡万通, 南方电网科学研究院有限责任公司高级工程师, 研究方向为电力系统规划; E-mail: caiwt2@csg.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国电力安全供应保障研究”(2022-XY-88)

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

guarantee capabilities to solidify its foundation for power supply security; (2) improving the intrinsic security of power supply by focusing on the demand side; (3) establishing a new-generation technical system for guaranteeing power supply security; and (4) optimizing the market system to construct a power security ecology participated by all.

**Keywords:** power security; supply security; carbon peaking and carbon neutrality; new type of power system

## 一、前言

党的二十大报告对积极稳妥推进碳达峰、碳中和,推进国家安全体系和能力现代化做出了统筹部署与安排。电力是直接关系国计民生、国家安全的重点领域,在推进碳达峰、碳中和过程中必须审慎面对安全稳定供应问题。

近年来,国内外均发生不同程度的电力保供危机事件,显现了电力安全供应面临的严峻挑战。2021年,美国得克萨斯州遭遇低温寒潮影响,区域内风力发电机冻结、燃气发电机组因供气不足而出力下降,电力供应严重受限导致大范围的切负荷停电情况<sup>[1,2]</sup>。2022年,美国南部多个州受极端高温天气影响导致负荷激增,负责电力调度的独立运营商启动了三级警戒状态,被迫在负荷进一步上升时期开展停电操作<sup>[3,4]</sup>。2017年和2022年,我国台湾地区的燃气发电机组因供气系统、线路开关操作等故障,导致大范围、长时间的停电事故<sup>[5,6]</sup>。2022年夏季,我国四川省遭遇高温干旱的极端天气,水力发电量大幅下降,为缓解保供压力而启动最高级别的应急限电措施<sup>[7]</sup>。

在当前及今后一段时期内,我国电力供应安全新旧风险交织,油气资源短板仍然突出,地缘政治事件、国际气价大幅波动、极端自然天气等风险因素长期存在,能源转型过程中电力供应区域性、时段性紧张问题时有发生,电力供应安全保障任务依然艰巨。亟待系统研究并构建新时期电力安全供应保障体系,着力推动电力安全供应保障能力现代化。

为此,本文梳理电力安全供应研究进展、我国电力供应体系现状,研判“十四五”及中长期的供需平衡形势,总结电力供应存在的问题和挑战;提出保障电力安全供应的原则、构建电力安全供应保障体系的发展步骤及重点举措,以期在能源转型背景下的电力行业高质量发展研究提供基础参考。

## 二、电力安全供应研究进展

### (一) 国外电力安全供应的主要保障措施

电力危机事件对经济社会运行造成了极大影响,如美国得克萨斯州大停电造成经济损失约1950亿美元<sup>[8]</sup>。为了避免电力供应危机,各国构建了系列化的应对保障措施。这些经验做法是我国电力供应保障研究的有效参考。

美国高度关注电力系统安全工作,构建了分级的电力保障与监管管理体系<sup>[9]</sup>。联邦能源监管委员会(FERC)、北美电力可靠性公司(NERC)、受监管的各电力调度机构(RTO/ISO)是电力系统可靠性的主要负责部门<sup>[10]</sup>;FERC在全国范围内监管、统筹能源安全,NERC负责具体的电力可靠性管理,RTO/ISO承担电力可靠性分析工作。经电力可靠性分析形成的运行和规划可靠性报告,为有效管控电力资源充裕度风险提供了科学依据,在美国电力系统的长期和短期平稳运行方面发挥了重要作用<sup>[11,12]</sup>。针对信息系统对电力系统安全的影响,美国还提出了信息安全深度防护战略,由FERC等部门联合开展电力系统信息安全防护工作<sup>[13]</sup>。

欧盟制定了针对电力供应安全的统一法规,以预防和管理潜在的电力危机<sup>[14]</sup>;引入通用方法来识别危机情景、评估对应场景充裕性,以保持电网的稳定性并避免短缺。各成员国依据统一法规定期发布风险应对计划,管控区域内的电力供应危机事件<sup>[15,16]</sup>;成员国之间在危机预防与管理阶段提供互济援助。

### (二) 国内外电力安全供应研究现状

除了公共管理层面要求电力安全供应,学术界、产业界从不同方面就电力安全供应保障开展研究,为保障电力供应提供了丰富手段<sup>[17,18]</sup>。

在电力供应保障方面,结合电源发电特性(如天然气供应可靠性、风/光新能源不确定性),评估和分析了电力系统的运行可靠性<sup>[19-21]</sup>;针对运行调度方法进行优化,提高了电力供应的可用能力<sup>[22,23]</sup>。

在电网保障方面，将线路运行故障纳入可靠性评估过程，实现了传输系统对电力供应的影响分析<sup>[24-26]</sup>；较多开展了电网薄弱环节识别、网架恢复方法研究，从事前和事后的角度保障电网安全<sup>[27-31]</sup>。

在电力需求保障供应安全方面，考虑需求变化对电力安全供应的影响，充分利用负荷侧资源的灵活调节能力以提高电力供应保障水平<sup>[32,33]</sup>。

在电力技术保障供应安全方面，将仿真分析技术应用到电力安全供应模拟、实际运行监测过程，提高了系统的决策运行效率。重点探讨了仿真规模、仿真精度、仿真速度<sup>[34-41]</sup>，引入了人工智能、大数据分析、数字孪生技术支持调度生产、安全监测的辅助决策<sup>[42-44]</sup>。

在机制设计保障供应安全方面，针对提高发电容量充裕度以保障电力供应课题，管理机构、市场运营机构设计了多种容量保障机制（如容量市场、稀缺电价、容量补偿）<sup>[45-47]</sup>，提高了发电侧的容量可用度；适应新环境下的容量保障机制成为研究热点，以保障高比例新能源接入下的长期电力供应安全<sup>[48,49]</sup>。

值得注意的是，国内外已有研究虽为保障电力安全供应提供了丰富手段和解决方案，但仍停留在局部问题、表层因素，存在系统性不足、体制机制原因深究不足、中长期安全供应保障分析不足的情况，有关方法与措施不宜直接套用。需深层次剖析我国电力供应现状，把握基本原则，提炼关键步骤，支持形成契合国情实际的电力安全供应保障能力。

### 三、我国电力安全供应总体形势

#### （一）我国电力安全供应现状

##### 1. 电力消费现状

近年来，我国用电量保持了持续增长趋势，其中第一产业、居民生活用电增速较快<sup>[50]</sup>。2022年全国全社会用电量为 $8.64 \times 10^{12}$  kW·h，同比增长3.6%。分产业看，第一产业用电量为 $1.146 \times 10^{11}$  kW·h，同比增长10.4%；第二产业用电量为 $5.7 \times 10^{12}$  kW·h，同比增长1.2%；第三产业用电量为 $1.486 \times 10^{12}$  kW·h，同比增长4.4%；城乡居民生活用电量为 $1.337 \times 10^{12}$  kW·h，同比增长13.8%。

分地区来看，2022年中部地区、西部地区全社

用电量分别为 $1.6 \times 10^{12}$  kW·h、 $2.5 \times 10^{12}$  kW·h，分别同比增长6.7%、4.2%；东部地区、东北地区全社会用电量分别为 $4 \times 10^{12}$  kW·h、 $4.542 \times 10^{11}$  kW·h，分别同比增长2.4%、0.8%。全国共有27个省份用电量实现正增长，西藏、云南、安徽、宁夏、青海、河南、湖北、江西、陕西、内蒙古、四川、浙江12个省份用电量同比增长超过5%。

##### 2. 电力供应现状

我国电力装机容量持续增长，新增装机以清洁能源为主，电力行业延续绿色低碳转型趋势<sup>[50]</sup>。截至2022年年底，全国全口径发电装机容量为 $2.56 \times 10^9$  kW，其中非化石能源装机容量占比上升至49.6%。具体地，水电为 $4.1 \times 10^8$  kW，核电为 $5.553 \times 10^7$  kW，风电为 $3.65 \times 10^8$  kW，太阳能发电为 $3.9 \times 10^8$  kW，火电为 $1.33 \times 10^9$  kW。

在跨区电力供应方面，2022年全国跨区输送电量为 $7.654 \times 10^{11}$  kW·h，同比增长6.3%。2022年8月受极端高温天气影响，华东、华中等地区出现电力供应紧张情况；为保障用电平衡，电网加大跨区电力支援力度，当月跨区输送电量增长了17.3%。

##### 3. 电力产业及技术现状

我国“源-网-荷”技术快速发展，有效支撑了电力安全供应。

在电源侧，可再生能源发电并网技术提升了风/光资源的利用率，保障了绿色用电需求。例如，张北风光储输示范工程采用储能优化技术削弱风光出力的波动性，为大电网提供了稳定的电力供应<sup>[51]</sup>。超超临界火电机组、第三代核电<sup>[52]</sup>、新一代海上风电<sup>[53]</sup>等装备技术进步以及配套技术和供应链的发展，为电力供应保障提供了新增支持。

在电网侧，特高压交/直流输电核心技术的发展与应用，支撑了电力系统的全网跨区平衡，解决了发电资源与负荷中心逆向分布的结构性矛盾<sup>[54]</sup>。智能电网调度控制系统<sup>[55]</sup>、新一代特高压交/直流电网仿真平台<sup>[56,57]</sup>的构建，增强了多层次交/直流混联特大电网的运营能力，保障了全网电力的供需平衡。

在负荷侧，智能电表和计量设备的推广应用，支持形成了世界规模最大的用电信息采集系统。依托强大的用电信息采集能力，部分地区构建了电力需求侧管理在线监测平台，实现了针对负荷管理的精准有效调节，降低了电源侧的调节压力<sup>[58]</sup>。管理机构利用负荷侧管理技术，通过供需双侧的互动手

段来维持电力系统的平衡稳定,提高了电力供应保障能力。

#### 4. 电力体制机制现状

自2015年新一轮电力体制改革以来,我国电力市场建设成效显著,构建了涵盖多地区、多交易周期、多交易品种的电力市场体系,为供需交易提供了有效信号,实现了电力供需动态均衡<sup>[59,60]</sup>。

在电价机制方面,随着燃煤价格的逐步放开,由市场交易形成的“有涨有跌”价格变化趋势愈发明显,显现了“市场发现价格”的作用,提高了市场主体的参与积极性。在市场环境下,电价更加灵活地反映了供需形势和成本变化,在一定程度上缓解了燃煤发电企业经营困难,激励企业增加电力供应,从而改善电力供求状况,更好保障电力安全稳定供应<sup>[61,62]</sup>。随着需求侧主体进入市场,市场价格信号的传导将进一步影响市场用户的用电行为。在市场环境下,高耗能企业电价将不受限制,相应用电消费将在高电价的影响下出现回落,由此释放了供给侧压力。整体上,电力价格的充分传导改善了电力供需格局,使电力供应更有保障<sup>[63]</sup>。

《电力现货市场基本规则(征求意见稿)》要求探索建立市场化的容量补偿机制<sup>[64]</sup>。相关机制将支持燃煤、燃气等市场化火电机组解决难以在电力现货市场获取收益、回收固定成本周期过长的问题,有利于发电企业可持续发展,进而以发电容量的充裕性保障长期电力供应安全<sup>[65]</sup>。

## (二) “十四五”及中长期我国电力安全供应形势研判

### 1. 电力供应

在“十四五”至“十五五”时期,我国常规电源装机容量将由 $2.13 \times 10^9$  kW增加至 $2.42 \times 10^9$  kW,新能源装机容量超过 $1.2 \times 10^9$  kW,新增电源以清洁能源装机为主(若无特殊说明,数据为作者团队测算而得,下同)。

面向中长期(见图1),从装机规模角度看,2030年非化石能源装机容量占比超过60%,2060年占比进一步提升至90%;从发电量结构角度看,2030年非化石能源发电量占比超过50%,2060年占比进一步提升。

### 2. 电力需求

在“十四五”时期,我国全社会用电量、最大

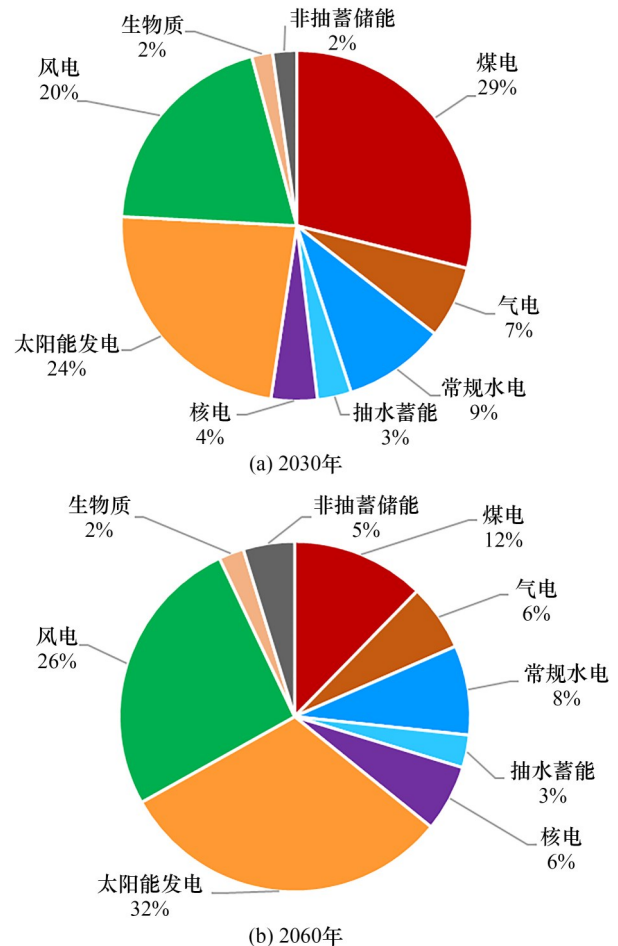


图1 我国未来电源结构预测结果

负荷分别为 $1 \times 10^{13}$  kW·h、 $1.65 \times 10^9$  kW,处于中速增长水平(6.3%、7%)。在“十五五”时期,我国工业化基本完成,经济与电力需求增速不断下降,全社会用电量、最大负荷分别为 $1.22 \times 10^{13}$  kW·h、 $2.03 \times 10^9$  kW,年均增长率分别为4%、4.2%。

全国各区域电力需求自2030年起从中速增长逐步转变为低速增长,东部、中西部地区的用电总量梯次达到饱和,全国电力需求在2040—2045年前后趋于饱和(见图2)。

### 3. 供需平衡

在“十四五”时期,全国电力供需形势仍然偏紧,电力缺口从受端扩展到全网。位于送端的西北、西南地区工业快速发展,而本地常规电源建设滞后,在保障协议外送的情况下将出现电力缺口。受端用电负荷体量大,常规电源发展较电力需求增长存在一定的滞后性,供需矛盾持续存在;预计华东、华中、东北、西南地区可保持电力平衡,而华北地区

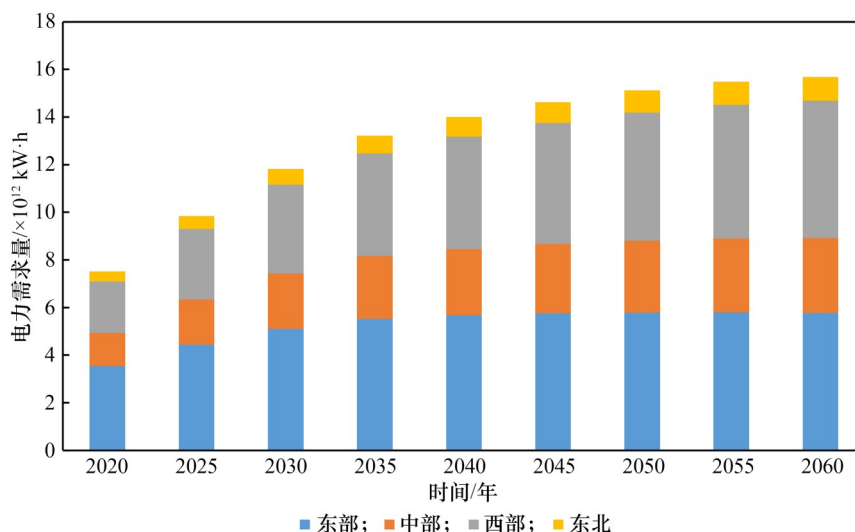


图2 我国部分地区电力需求增长趋势（2020—2060年）

缺口约为 $4 \times 10^6$  kW，西北地区缺口约为 $1.1 \times 10^7$  kW，南方地区缺口约为 $1 \times 10^7$  kW。

在“十五五”时期，全国电力供需形势较为严峻。在前中期，受端随着新纳规火电和沙漠、戈壁、荒漠5回外送通道的建成投产，电力供需基本平衡，而位于送端的西北、西南地区因本地保供电源不足而持续存在电力缺口。在中后期，各地区均存在电力缺口，仅考虑目前较为明确的电源建设，华东、东北、西南地区的缺口均在 $1 \times 10^7$  kW以下，华北、华中地区的缺口分别应 $1 \times 10^7$  kW~ $1.5 \times 10^7$  kW，西北地区的缺口在 $2 \times 10^7$  kW以上，南方五省份的缺口约为 $2.4 \times 10^7$  kW。

在中远期，非化石能源电源将成为电力系统的主体电源，能够发挥电力电量双保障作用；新型储能、抽水蓄能电站大规模建成投产，存量火电转变为灵活性调节电源，共同保障电力供需平衡。

## 四、我国电力安全供应保障方面的问题和挑战

### （一）存在的问题

近年来，受多重因素影响，东北、华南、西南等地区出现了大范围、长时间的错峰限电和有序用电情况，对经济社会发展、居民生活造成了明显影响。

究其原因，一方面，有多种因素叠加下负荷激增的影响，如四川省限电事件中居民用电需求同比增长超过90%，电源供应不足的短板更为明显；受

煤炭、天然气价格高涨且供应紧张的影响，“缺煤少气”导致火电机组非计划停运/受限的情况异常严峻；受极端干旱天气的影响，“汛期反枯”造成水电发电能力相比预期严重不足。另一方面，电源装机容量不足导致的电力“硬缺口”也是重要因素，而“靠天吃饭”的风电、太阳能发电无法提供有效的可用容量，难以应对季节性和极端天气条件下的负荷增长需求。

此外，相关机制不健全、不完善，如一次能源与电力规划缺乏统筹协调机制和保障机制，市场价格传导机制尚未完全理顺。尽管煤电上网电价的市场化程度正在逐步改善，但与上游完全市场化的电煤价格相比，火电企业发电成本无法有效疏导。增强极端天气预警机制的有效性，也是需要深化的工作。

### （二）面临的挑战

在今后一段时期内，受资源禀赋、结构调整、技术水平、体制机制、极端气候、国际形势等因素的影响，我国电力安全供应仍面临较大挑战。

#### 1. 电源持续可靠供给

当前，火电依然是我国的主体电源，但对进口煤炭和天然气的依赖程度较高，易受国际局势动荡影响，可靠供应存在一定的不确定性。水电开发趋于饱和，极端干旱容易造成发电能力下降，加剧电力供应紧张形势。核电建设处于向新一代先进核电技术过渡的平台期，受铀燃料供应、厂址资源、电站建设周期等因素制约。新能源装机规模虽然逐年

增加,但受制于出力波动性、间歇性、随机性,在短期内难以起到稳定电力供给的作用。然而,我国电力需求仍保持稳定增长趋势,尖峰负荷特征更加凸显,电力供需呈现“全局平衡、局部电力电量双缺”的局面<sup>[7]</sup>。

## 2. 电网安全稳定运行

当前,我国电网安全稳定水平整体较高,但随着新能源装机占比不断提升且未来逐步成为主体电源,大规模电力电子设备将普遍应用,因而电网呈现低转动惯量、宽频域振荡、“源荷”双侧波动等新特性,电力系统的稳定特性更为复杂。电网呈现交/直流送受端强耦合的形态,电压层级繁多,高低压层级电网之间、送受端电网之间协调难度较大。在海量的新能源、电动汽车接入后,电力系统信息感知能力不足,现有调控手段无法做到全面可观、可测、可控;针对电力系统的网络攻击案例屡见不鲜,信息安全防护形势较为严峻<sup>[66]</sup>。

## 五、保障电力安全供应的基本原则和关键步骤

### (一) 基本原则

当前及今后一段时期内电力安全供应面临的挑战,是电力行业高质量发展过程中出现的阶段性矛盾。宜着眼全局,统筹好发展与安全的关系,把握以下基本原则。

一是坚持安全第一原则。推动大电网、配电网、微电网协同发展,着力提升区域级、省级、城市级电力系统的自治运行能力,适度控制交流同步电网规模,严格防范系统性安全风险。

二是坚持低碳化基本路径。大力推进新能源开发利用,合理开发水电资源,安全有效发展核电,科学布局火电资源,发挥水、核、风、光、煤、气多能互补优势,构建绿色低碳能源结构。

三是坚持市场化改革方向。发挥价格在调动储能调节能力、煤电保供及调节能力、需求侧资源调节能力等方面的关键性作用,破除省间电力市场壁垒,推动形成全国/区域统一的能源电力大市场。

四是坚持科技创新核心作用。将科技创新作为第一生产力,以技术进步来切实提升化石能源的清洁低碳利用水平;协调水电开发与生态保护,积极应对风/光等新能源发电的规模化应用挑战,推动

生物质能、氢能、潮汐能等新能源的高效利用。

### (二) 关键步骤

遵循电力安全供应保障的基本原则,科学论证并制定电力安全发展路线图;体现能源转型、科技创新、体制机制完善等层面的客观规律,分步构建电力安全供应保障体系。

第一阶段,巩固完善以煤电为基础电源、确保新能源消纳的电力安全供应保障体系。煤电仍是电力安全供应的主体,可再生能源装机占比稳步提高,但间歇性、随机性、波动性问题仍处被动应对状态。重点工作包括:确保煤电稳定供应,建设煤电辅助服务机制,加快新型储能研发应用,扩大需求侧响应规模,优化升级主干网架,应用分布式智能电网,提升大规模新能源消纳能力。

第二阶段,构建以煤电与可再生能源协同为核心的电力安全供应保障体系。可再生能源装机占比超过煤电,间歇性、随机性、波动性问题逐步得到解决,与煤电共同承担发电主体地位。重点工作包括:聚焦煤电与可再生能源协同安全保供,推进煤电向“储能+清洁低碳电源”转型,开展新型储能大规模应用,释放需求侧资源保供能力,发挥分布式电源和电动汽车储能的关键支撑作用,推动大电网和分布式智能电网融合发展,基本杜绝重大安全风险。

第三阶段,发展以供给侧与需求侧协同为核心的电力安全供应保障体系。可再生能源成为电力安全保供的主体,电能、氢能等二次能源深度融合利用,火电、水电转为调节功能。重点工作包括:聚焦供给侧的集中式可再生能源与需求侧的分布式资源协同安全保供,构建大电网与分布式智能电网深度耦合、分层分区相对自治的电力供应系统,确保新能源发电自由接入,形成本质安全型电力安全供应保障体系。

## 六、保障我国电力安全供应的重点举措

### (一) 增强电力供应保障能力,筑牢电力供应安全根基

加大力度统筹新能源开发和利用。立足新能源基地建设周期较长、能源资源与负荷中心逆向分布实际情况,着力开展大规模新能源基地和送出通道

建设，尽快推动新能源大规模并网与集中外送，确保碳达峰（2030年）前合力构建新能源大规模可用、传统能源后备充足的电力供应保障体系。科学开展技术经济评价，协调发挥科技驱动、政策主导、市场支撑等作用，为新能源快速“立足”提供有利发展环境。

适时推动煤电的清洁低碳转型。研究保留燃煤电厂的区域分布，确保必要的转动惯量以维持电力系统安全稳定水平。根据碳中和目标分解未来碳排放量的年度压减规模，将保留的燃煤电厂逐步改造为储能电源。利用风、光大发时段或夜间负荷低谷时段的电力，加热太阳能光热电站中的熔盐以储存高温热能（相变储热），在负荷高峰时段释放热能并产生高温高压的水蒸气，用于火电机组发电，实现清洁供电和供热。

加强电网规划建设，为新能源并网消纳提供坚实支撑。针对沙漠、戈壁、荒漠大规模新能源基地外送的发展需求，采用“以源结网”技术路线，将大规模新能源在基地汇集后，通过柔性直流等输电孤网直送负荷中心的方式，支撑新能源富集地区的能源开发与利用。划分合理规模的同步电网，构建结构清晰、安全可控的网架结构，以有效管控直流多落点、主网架短路电流超标等问题。进行差异化的配电网建设，合理划分变电站供电范围，构建高压/中压/低压配电网相互匹配、强简有序、过渡清晰的网络，简化非标准接线等问题。

### （二）发挥需求侧关键作用，提升电力供应本质安全水平

长期以来，需求侧资源在保障电力安全供应方面的关键作用一直没有获得足够重视。随着能源转型深入推进，分布式电源、分布式储能、柔性负荷、电动汽车、能源电力产消者等新型需求侧资源大量涌现，形成了“用则利、不用则害”的安全属性；应充分发挥相应功能作用，将之转化为保障电力安全供应的重要力量。

在新发展阶段，需从根本上改变传统“重供给侧、轻需求侧”的认识，将需求侧置于事关新型能源体系建设成败的战略层面，开展深化论证和科学安排；发挥负荷侧灵活调节资源在保供应、降成本方面的关键作用。以安全供应为基础，推动构建新型需求侧体系，使需求侧成为电力平衡的基本单

元，就地生产、就地消费，便于各参与主体之间的灵活互动；供给侧对需求侧起支撑和调节作用，使电力需求和供给在需求侧自平衡，提升电力供应的本质安全水平。推动灵活可调资源、电动汽车、虚拟电厂等负荷侧资源参与电网互动并积极跟随新能源出力特性，促进新能源消纳以实质性减少新能源弃电。推动负荷侧参与电网互动以削减尖峰负荷，减少为满足高峰负荷引起的投资，有效提升电网设备利用率。

### （三）构建以数字化技术为支撑的新一代电力安全供应技术体系

在新能源发电占比大幅提升的背景下，电力安全供应的主要技术矛盾表现为：安全状态透明化、安全管控智能化的实际需求，与电源、电网、负荷、储能以及相关市场、气象、环境等的状态可见、未来可知、运行可控水平均较低之间的不匹配。应以数字化技术为核心，构建新一代电力安全供应技术体系。

开展支撑数字电网的智能终端与传感技术研究。围绕高精度小微传感量测，研发高灵敏度的电力专用磁场传感元件，宽频域、低噪声的电力专用电场传感元件，高分辨率、低误差的电压电流传感元件，重点突破电力专用的主控芯片、边缘计算芯片、新能源芯片。

开展新型电力系统信息通信支撑技术研究。发展新型电力系统的端到端通信与计算模式、端到端信息通信及计算资源的虚拟化管控技术，构建电力通信与计算资源的定制化、差异化服务机制。基于海量信息数据分析和高性能计算技术，建设电网超强感知能力、智慧决策能力、快速执行能力。

开展新型电力系统的云边协同安全关键技术研究。突破复杂环境下的动态身份认证、访问控制技术，面向新型电力系统的网络隐蔽对抗及通道检测需求，挖掘并管控电力专用协议以及隐蔽通道的漏洞，增强本质安全能力。

### （四）完善市场体系和市场机制，构建全员参与的电力安全生态

当前的电力安全供应由电网企业、管理部门主导，而电源企业、储能企业、普通民众等主体参与度不高。应加快建设完善市场体系和市场机制，平

衡发电企业、电网企业、售电企业、用户、投资方、服务商等各方利益,形成全员参与的电力安全供应新格局。

建立健全发电容量成本回收机制。采取容量补偿、容量市场等方式,发现并补偿常规电源调节备用的价值;妥善处理市场化改革带来的发电环节“搁浅”成本,提高电力安全供应的可持续保障能力。

构建促进新能源发展的市场机制。有序推动新能源参与电力市场交易,以市场化方式提高新能源发电收益,吸引社会资本参与新能源发电投资建设。增强电网企业推进新型电力系统建设的可持续投资能力,完善抽水蓄能、新型储能等调节资源成本回收机制,扩大绿色电力交易试点范围,支持能源消费模式创新。

分类、分环节理顺电价形成机制,纵深推动电价改革。从全系统角度看待新型电力系统建设和新能源消纳的成本,处理好新能源发展、高系统性消纳成本之间的关系。以上网电价、输配电价、调节性资源价格、交叉补贴费用等形式,合理分摊并及时疏导系统性成本,解决定价扭曲、市场传导不畅等问题。

加快建立统一的能源电力大市场。针对区域电力市场开展先行先试,总结经验并应用于全国统一的电力市场体系建设;推动电力市场、碳交易市场、一次能源市场、绿色电力市场等多元市场的协同运营与发展。完善跨省、跨区的能源电力市场交易机制,破除省间壁垒,保障民生用电需求。

## 七、结语

多次限电事件的发生反映了我国电力安全供应基础不牢固的特征。在未来能源转型过程中,电力供应安全方面的挑战将持续存在。需要着力推动电力安全供应保障能力现代化,确保电力供应安全。本文以我国电力安全供应保障策略为研究切入点,在把握总体形势、剖析存在的问题与挑战的基础上,提出了保障电力安全供应的基本原则和关键步骤;形成的重点举措覆盖电力供应保障能力建设、需求侧关键作用发挥、电力安全供应技术突破、市场体系与市场机制完善等方面。

着眼后续研究,建议结合国内外宏观经济、能

源行业的新发展态势,细化和深化我国电力安全供应保障体系构建的时间表、路线图、施工图;针对性制定风险防范应对措施,前瞻性开展技术经济评价,形成支撑新型能源体系长远发展的对策建议。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** January 26, 2023; **Revised date:** March 22, 2023

**Corresponding author:** Cai Wantong is a senior engineer from the China South Power Grid Electric Power Research Institute. His major research field is power system planning. E-mail: caiwt2@csg.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Power Security Supply Guarantee” (2022-XY-88)

### 参考文献

- [1] 侯验秋,丁一,包铭磊,等.电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7764-7775.  
Hou Y Q, Ding Y, Bao M L, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China’s new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21):7764-7775.
- [2] 钟海旺,张广伦,程通,等.美国德州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2022,46(6):1-9.  
Zhong H W, Zhang G L, Cheng T, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9.
- [3] 高温下的美国加州会大规模限电吗?[EB/OL].(2022-09-09)[2023-02-15].<https://mp.weixin.qq.com/s/xx-bKyloqpEbH1MDZ6XzfA>.  
Will there be large-scale power cuts in California under high temperature? [EB/OL]. (2022-09-09)[2023-02-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/xx-bKyloqpEbH1MDZ6XzfA>.
- [4] 李可昕,郭鸿业,陈启鑫.从加州限电事故与美国WEIM机制看电力市场的融合协同[J].电力系统自动化,2021,45(10):1-8.  
Li K X, Guo H Y, Chen Q X. Integration and collaboration of electricity market from perspectives of electricity restriction accident in California and mechanism of western energy imbalance market in USA [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 1-8.
- [5] Hui H X, Ding Y, Luan K N, et al. Analysis of “8-15” blackout in Taiwan and the improvement method of contingency reserve capacity through direct load control [C]. Portland: 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM), 2018.
- [6] 吴界辰,汪莹,易海琼,等.中国台湾“3·3”大规模停电事故分析及其对未来电网发展的启示[J].电力建设,2022,43(7):73-79.  
Wu J C, Wang Y, Yi H Q, et al. Analysis of the power outage in Taiwan, China on March 3, 2022 and its implications for future power grid development [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 73-79.
- [7] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等.从四川高温干旱限电事件看新型



- 电力系统保供挑战与应对展望 [EB/OL]. (2022-12-26)[2023-02-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971>.
- Gao H J, Guo M H, Liu J Y, et al. Power supply challenges and prospects in new-generation power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [EB/OL]. (2022-12-26)[2023-02-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971>.
- [8] University of Texas at Austin. The timeline and events of the February 2021 Texas electric grid blackouts [R]. Austin: University of Texas at Austin, 2021.
- [9] Dupuy M, 高驰. 加强电力可靠性: 欧盟及美国探索新流程完善季度电力分析 [R]. 北京: 睿博能源智库, 2022.  
Dupuy M, Gao C. Enhancing power reliability: EU and US explore new processes to improve quarterly power analysis [R]. Beijing: Regulatory Assistance Project, 2022.
- [10] 唐桃波, 夏云非, 鲁文, 等. 美国近年的停电事故及对我国电力系统安全稳定运行的启示 [J]. 电力建设, 2003, 24(11): 2-4.  
Tang T B, Xia Y F, Lu W, et al. Power failure of this year in USA and its inspiration to safe stable operation of power system in China [J]. Electric Power Construction, 2003, 24(11): 2-4.
- [11] North American Electric Reliability Council. 2022 state of reliability [R]. Atlanta: North American Electric Reliability Council, 2022.
- [12] North American Electric Reliability Council. 2022—2023 winter reliability assessment [R]. Atlanta: North American Electric Reliability Council, 2022.
- [13] 梁潇, 高昆仑, 徐志博, 等. 美国电力行业信息安全现状与特点分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 221-228.  
Liang X, Gao K L, Xu Z B, et al. A survey on cybersecurity of U.S. electric power industry [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 221-228.
- [14] Security of electricity supply [EB/OL]. [2023-02-07]. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply_en).
- [15] Risk preparedness plans in the electricity sector by national competent authorities and commission's opinions [EB/OL]. [2023-02-07]. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply/risk-preparedness-plans-electricity-sector-national-competent-authorities-and-commissions-opinions\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply/risk-preparedness-plans-electricity-sector-national-competent-authorities-and-commissions-opinions_en).
- [16] Regulation EU 2019/941 of the European parliament and of the council of 5 June 2019 on risk-preparedness in the electricity sector and repealing directive 2005/89with EEA relevance/ECText. [EB/OL]. [2023-02-07]. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/941/oj/eng>.
- [17] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.  
Sun H D, Xu T, Guo Q, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [18] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.  
Zeng H, Sun F, Li T, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [19] Bao M L, Ding Y, Shao C Z, et al. Nodal reliability evaluation of interdependent gas and power systems considering cascading effects [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4090-4104.
- [20] Bao M L, Ding Y, Singh C Z, et al. A multi-state model for reliability assessment of integrated gas and power systems utilizing universal generating function techniques [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6271-6283.
- [21] 汪海瑛. 含大规模可再生能源的电力系统可靠性问题研究 [D]. 武汉: 华中科技大学(博士学位论文), 2012.  
Wang H Y. Research on reliability of power system containing large-scale renewable energy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology(Doctoral dissertation), 2012.
- [22] 杨阳. 考虑负运行备用的电力系统可靠性分析及其优化调度研究 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2020.  
Yang Y. Operating reliability analysis and optimization research of power system considering down operating reserve [D]. Hangzhou: Zhejiang University(Master's thesis), 2020.
- [23] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 安全性与经济性协调的鲁棒区间风电调度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1033-1040.  
Chen J H, Wu W C, Zhang B M, et al. A robust interval wind power dispatch method considering the tradeoff between security and economy [J]. Proceedings of CSEE, 2014, 34(7): 1033-1040.
- [24] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统可靠性分析 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2681-2688.  
Zeng Q Y. Analysis on reliability of UHVAC and UHVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2681-2688.
- [25] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.  
Xie S Y, Wang X L, Wang X F. Reliability estimation of AC/DC hybrid power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 10-16.
- [26] 邹欣, 程林, 孙元章. 基于线路运行可靠性模型的电力系统连锁故障概率评估 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 7-11.  
Zhou X, Cheng L, Sun Y Z. Cascading failure probabilistic assessment of power systems based on operational reliability model for transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 7-11.
- [27] Abedi A, Gaudard L, Romerio-Giudici F. Review of major approaches to analyze vulnerability in power system [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 183: 153-172.
- [28] Fang J K, Su C, Chen Z, et al. Power system structural vulnerability assessment based on an improved maximum flow approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 777-785.
- [29] 孙顺祥. 输电网脆弱线路及脆弱断面识别方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学(硕士学位论文), 2019.  
Sun S X. Research on identification method of vulnerable lines and vulnerable sections of transmission network [D]. Wuhan: Wuhan University(Master's thesis), 2019.
- [30] 曹曦, 王洪涛, 刘玉田. 输电网架恢复的分层协同优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4906-4917.  
Cao X, Wang H T, Liu Y T. A hierarchical collaborative optimization method for transmission network restoration [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4906-4917.
- [31] 王春义, 刘玉田. 输电网架恢复的动态优化决策方法 [J]. 电力系

- 统自动化, 2011, 35(2): 23–27.
- Wang C Y, Liu Y T. A dynamic optimization decision-making method for power system skeleton restoration [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(2): 23–27.
- [32] 陈臻, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(34): 67–73.
- Chen C, Wu W C, Zhang B M, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique [J]. *Proceedings of CSEE*, 2012, 32(34): 67–73.
- [33] 崔文琪. 考虑聚合空调负荷提供运行备用的电力系统可靠性分析 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2019.
- Cui W Q. Power system reliability evaluation considering operation reserve provided by air conditioners [D]. Hangzhou: Zhejiang University(Master's thesis), 2019.
- [34] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 18–32.
- Guo Q, Lu Y H. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 18–32.
- [35] 冯漠可, 王傲群, 袁帅, 等. 国产化电磁暂态仿真平台发展方向分析及展望 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 64–74.
- Feng M K, Wang A Q, Yuan S, et al. Analysis and prospect of development of China's independent electromagnetic transient simulation platform [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 64–74.
- [36] 陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2854–2864.
- Chen Y, Gao S L, Song Y K, et al. High-performance electromagnetic transient simulation for new-type power system based on cloud computing [J]. *Proceedings of CSEE*, 2022, 42(8): 2854–2864.
- [37] 薛禹胜, 谢东亮, 薛峰, 等. 支持信息-物理-社会系统研究的跨领域交互仿真平台 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 138–148.
- Xue Y S, Xie D L, Xue F, et al. A cross-field interactive simulation platform for supporting research on cyber-physical-social systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 138–148.
- [38] 欧开健. 交直流大电网多时间尺度混合实时仿真技术及其工程应用 [D]. 广州: 华南理工大学(博士学位论文), 2017.
- Ou K J. Research on the multi-time scale real-time hybrid simulation technologies for AC/DC large-scale power grid and its engineering application [D]. Guangzhou: South China University of Technology(Doctoral dissertation), 2017.
- [39] 董毅峰, 王彦良, 韩信, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(8): 2213–2231.
- Dong Y F, Wang Y L, Han J, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system [J]. *Proceedings of CSEE*, 2018, 38(8): 2213–2231.
- [40] 戴仁昶, 王亚伟, 刘广一, 等. 电力系统预想故障分析GPU并行和图并行计算的比较研究 [J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2064–2069.
- Dai R C, Wang Y W, Liu G Y, et al. Research on GPU based and graph computing based contingency analysis [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2064–2069.
- [41] 李雪, 张琳玮, 姜涛, 等. 基于CPU-GPU异构的电力系统静态电压稳定域边界并行计算方法 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19): 4070–4084.
- Li X, Zhang L W, Jiang T, et al. CPU-GPU heterogeneous computing for static voltage stability region boundary in bulk power systems [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19): 4070–4084.
- [42] 乔骥, 王新迎, 闵睿, 等. 面向电网调度故障处理的知识图谱框架与关键技术初探 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(18): 5837–5848.
- Qiao J, Wang X Y, Min R, et al. Framework and key technologies of knowledge-graph-based fault handling system in power grid [J]. *Proceedings of CSEE*, 2020, 40(18): 5837–5848.
- [43] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 200–223.
- Yang B, Chen Y J, Yao W, et al. Review on stability assessment and decision for power systems based on new-generation artificial intelligence technology [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 200–223.
- [44] 邵天睿, 尚涛, 李显旭. 数字孪生电网安全分析 [J]. *电力信息与通信技术*, 2022, 20(8): 60–65.
- Shao T R, Shang T, Li X X. Security analysis of digital twin of power systems [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2022, 20(8): 60–65.
- [45] 侯孚睿, 王秀丽, 锁涛, 等. 英国电力容量市场设计及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 F R, Wang X L, Suo T, 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.
- [46] 魏玢. 美国PJM电力市场及其对我国电力市场化改革的启示 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(8): 32–35.
- Wei F. Experience in PJM market in the United States: A good reference for the power market reform in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 32–35.
- [47] 喻芸, 荆朝霞, 陈雨果, 等. 电力市场环境典型发电容量充裕性机制及对我国的启示 [J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2734–2742.
- Yu Y, Jing Z X, Chen Y G, et al. Typical generation resource adequacy mechanism in electricity market and enlightenment to China [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2734–2742.
- [48] 陈政. 面向新型电力系统的容量补偿机制设计 [J]. *中国电力企业管理*, 2022 (10): 46–49.
- Chen Z. Design of capacity compensation mechanism for new power system [J]. *China Power Enterprises Management*, 2022 (10): 46–49.
- [49] 尚楠, 张翔, 宋艺航, 等. 适应清洁能源发展和现货市场运行的容量市场机制设计 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 174–182.
- Shang N, Zhang X, Song Y H, et al. Design of capacity market mechanism adapting to clean energy development and spot market operation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(22): 174–182.
- [50] 中国电力企业联合会. 2022年上半年全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL]. (2022-07-22)[2023-01-31]. <http://mm.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20220726/159959.html>.
- China Electricity Council. Analysis and forecast report on national power supply and demand situation in the first half of 2022

- [EB/OL]. (2022-07-22)[2023-01-31]. <http://mm.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20220726/159959.html>.
- [51] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59–64.  
Gao M J, Hui D, Gao Z H, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59–64.
- [52] 第三代核电技术:“华龙一号” [J]. 工业设计, 2021 (9): 17.  
Third-generation nuclear power technology: Hualong-1 [J]. Industrial Design, 2021 (9): 17.
- [53] 王秀丽, 赵勃扬, 郑伊俊, 等. 海上风力发电及送出技术与就地制氢的发展概述 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 1–12.  
Wang X L, Zhao B Y, Zheng Y J, et al. A general survey of offshore wind power generation and transmission technologies and local hydrogen production [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 1–12.
- [54] 付超, 邱建, 李诗旸, 等. 昆柳龙多端直流稳定控制策略设计及系统构建 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 33–40.  
Fu C, Qiu J, Li S Y, et al. Stability control strategy and system design for Kunliulong multi-terminal HVDC transmission [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 33–40.
- [55] 宋鑫, 赵家庆, 丁宏恩, 等. 智能电网调度控制系统的省地一体化架构设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 118–124.  
Song X, Zhao J Q, Ding H E, et al. Design of province–prefecture integrated architecture for smart grid dispatching and control system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 118–124.
- [56] 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.
- [57] 郭琦, 曾勇刚, 李伟, 等. 交直流大电网混合实时仿真(SMRT)平台研发与工程应用 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 33–38.  
Guo Q, Zeng Y G, Li W, et al. Development and engineering application of super mixed real-time simulation(SMRT) platform for AC–DC hybrid bulk power systems [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 33–38.
- [58] 李作锋, 陈振宇. 江苏电力需求响应的探索和实践 [J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 4–8.  
Li Z F, Chen Z Y. The exploration and practice of Jiangsu power demand response [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 4–8.
- [59] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 1–15.  
Chen Q X, Fang X C, Guo H Y, et al. Progress and key issues for construction of electricity spot market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 1–15.
- [60] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172–3186.  
Song Y H, Bao M L, Ding Y, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform [J]. Proceedings of CSEE, 2020, 40(10): 3172–3187.
- [61] 陈宗法. 多重目标下如何让煤电存续发展 [J]. 中国电力企业管理, 2022 (25): 48–53.  
Chen Z F. How to make coal power sustainable development under multiple objectives [J]. China Power Enterprises Management, 2022 (25): 48–53.
- [62] 黄文华. 电价机制对发电容量充裕性影响的比较研究 [D]. 武汉: 华中科技大学(硕士学位论文), 2010.  
Huang W H. A study on affection of electricity price on capacity adequacy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology(Master’s thesis), 2010.
- [63] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2–9.  
Ding Y, Hui H X, Lin Z Z, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2–9.
- [64] 国家能源局. 国家能源局综合司关于公开征求《电力现货市场基本规则(征求意见稿)》《电力现货市场监管办法(征求意见稿)》意见的通知 [EB/OL]. (2022-11-25)[2023-01-31]. [http://www.nea.gov.cn/2022-11/25/c\\_131067969\\_3.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-11/25/c_131067969_3.htm).  
National Energy Administration. Notice of the general department of the National Energy Administration on publicly soliciting opinions on the *Basic rules of the electricity spot market(draft for comments)* and the *Supervision measures for the spot electricity market(draft for comments)* [EB/OL]. (2022-11-25)[2023-01-31]. [http://www.nea.gov.cn/2022-11/25/c\\_131067969\\_3.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-11/25/c_131067969_3.htm).
- [65] 张粒子, 许通, 宋少群, 等. 电力市场中发电容量充裕性评估方法及保障机制 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 55–63.  
Zhang L Z, Xu T, Song S Q, et al. Evaluation method and guarantee mechanism of power generation capacity adequacy in electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 55–63.
- [66] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806–2818.  
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of CSEE, 2022, 42(8): 2806–2818.