



国外新能源高占比电力系统电力供应保障措施及启示

叶小宁, 王彩霞, 李琼慧, 杨超

(国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 随着全球能源转型深入推进, 新能源快速发展, 新能源高占比电力系统供应保障问题日益凸显, 近期已成为部分国家关注的焦点。为此, 首先详细分析了新能源出力特性以及在电力平衡、负荷支撑度等方面对电力供应保障的挑战; 其次选取德国、美国和日本等新能源发展较早占比比较高的典型国家, 从政策法规、监测预警、调度运行管理等方面, 深入研究了其在新能源高占比电力系统中采取的保障电力安全可靠供应的实践经验; 最后结合中国新型电力系统建设的实际情况, 提出了对中国新能源发展的启示, 为中国电力供应保障提供一定的参考借鉴。

关键词: 能源转型; 新能源; 电力系统; 电力供应; 保障措施

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202310101

0 引言

近年来, 中国新能源发展迅速且占比不断提高, 对电力系统安全稳定运行带来挑战, 电力系统供应保障问题越发明显^[1-5]。“十三五”期间, 中国新能源年均增长超过 7000 万 kW, 预计“十四五”期间年均新增装机规模超过 1 亿 kW, 实现倍增发展^[6]。到 2030 年, 中国风电、光伏等新能源发电装机规模将超过煤电, 成为装机第一大电源; 2060 年前, 新能源发电量占比有望超过 50%, 成为电量供应主体^[7-8]。

国外新能源发展较为领先的国家, 在电力供应保障方面积累了诸多经验, 中国从电网发展形态^[9]、供需双侧协同发展^[10-12]、电力市场建设^[13-17], 以及建立和完善安全预警机制^[18-21]等方面对国外典型国家的经验开展了深入研究。因此, 有必要结合国外新能源发展, 对国外在新能源占比较高的情况下, 解决电力保供问题的经验进行深入研究, 并结合中国新能源发展实际情况, 提出具有中国特色的适应新能源发展的参考意见。

本文首先分析了新能源高占比对电力供应保障的挑战, 然后聚焦新能源高占比的电力系统电

力供应保障问题, 选取德国、美国和日本等经验丰富的典型国家进行深入研究, 总结相关经验与启示, 最后结合中国新能源发展的实际情况, 提出了解决中国未来新能源跨越式增长的电力供应保障问题的建议, 为中国电力供应保障提供参考借鉴。

1 新能源高占比对电力供应保障的挑战

全球新能源快速发展, 已进入增量替代阶段, 并将逐步向存量替代过渡, 预计 2020—2030 年期间, 全球新能源新增发电量占全部新增发电量的比重超过 80%^[22-23]。“双碳”目标下中国新能源也将持续快速增长, 预计“十四五”期间年均新增装机规模超过 1 亿 kW, 实现倍增发展, 2025 年发电量占比将达到 20%, 2030 年、2060 年将分别超过 25% 和 50%。新能源高占比给电力供应保障带来较大挑战, 主要体现在以下 5 个方面。

1) 高比例新能源并网的发展态势使得电力系统电力电子化趋势凸显。相比传统电源形式的旋转机械接口, 风电、光伏等形式的电力电子接口具有响应快、惯量低的特点, 使得系统的频率响应能力下降, 最大频率偏差增大, 显著影响系统的频率稳定性。

2) 新能源在电力平衡中有效容量远低于常规

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-02-22。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (SGSHJY00GPJS 2200021)。



电源，供应保障能力偏低。新能源在系统平衡或容量充裕性分析中所考虑的能够等效替代常规电源发电容量，称作新能源的有效容量或保证容量。新能源出力的波动性与不确定性导致其参与系统平衡的有效容量远低于常规电源。在美国得州电力可靠性委员会冬季容量充裕性分析中，100 MW 的陆上风电在系统平衡中仅等效为 19 MW 的常规电源容量^[24]。

3) 新能源对负荷支撑能力偏弱。新能源负荷支撑度是指新能源实际出力占对应时刻系统负荷的比例。2022 年，中国新能源平均负荷支撑度不足 15%，全年近四分之三时段新能源处于低负荷支撑度，高负荷支撑度时段不足 1%。由于新能源出力与负荷匹配性差，新能源负荷支撑度在晚高峰最低，并呈现“春高冬低”的季节性特征。

4) 负荷高峰保供应和负荷低谷保消纳的“两难”矛盾日益突出。随着新能源占比持续快速提升，新能源小发期间电力供应不足和大发期间消纳困难的问题将频繁交替出现。在火电装机规模一定的情况下，较大的开机方式有利于保障电力稳定可靠供应，但会挤占新能源发电空间，加大弃电风险；反之，要保证新能源高水平消纳，就需要适当减小火电开机容量，减弱保供能力。

5) 新能源出力不确定性叠加对系统的弱支撑能力，加重了极端天气下新能源高占比电力系统的脆弱性。近年来，国际上与新能源相关的电力供应安全事故频发，如表 1 所示。在这些事故中，新能源受极端天气影响，出力不确定性显著增加，在用电负荷急速增长时，新能源出力跟不上，加剧了电力平衡压力。

根据 IEA 研究报告^[25]，当新能源发电量占比超过 40%，新能源对电力供应的影响将成为电力

表 1 近年来新能源相关电力供应安全事故汇总
Table 1 Summary of new energy-related power supply security accidents in recent years

停电事故	事故影响	新能源影响	新能源装机比例/%
2017年2-8南澳大停电	停电30万kW，影响9万家庭	停电前1 h，新能源出力骤减63%	45.6
2020年8月美国加州高温停电	停电100万kW，影响330万人	停电前1 h，新能源出力骤减54%	27.0
2021年2月，美国得州寒潮停电	停电1650万kW，影响450万人	大量风电机组退出运行，损失64%的风电发电容量	30.5

系统面临的最主要问题。

2 国外新能源高占比电力供应保障的研究与实践

2.1 德国

2.1.1 德国在保障电力安全可靠供应方面的实践经验

截至 2022 年底，德国新能源装机占比高达 58%，发电量占比高达 33%。作为典型新能源高占比国家与全球能源转型先行者，德国在保障电力安全可靠供应方面取得了重要的实践经验，主要体现在以下 3 个方面。

1) 建立电力供应安全评估监测机制，及时预警能源转型带来的电力供应安全风险。为保障能源转型的安全性，德国依据《能源工业法》建立了电力供应安全评估监测机制，由德国联邦经济事务和能源部至少每 2 年对电力供应安全进行评估，由联邦审计院每 3 年对评估结果进行监测和审查。德国联邦经济事务和能源部采用的电力供应安全评估方法如图 1 所示，先基于欧洲电力市场分析模型确定未来电力供应典型场景，后利用电力供应安全分析模型开展未来典型场景下电力供应安全评估。

德国联邦经济事务和能源部最新发布的评估报告为《电力供应安全报告（2019 年）》^[26]。2022 年 3 月，联邦审计院发布了最新审查报告《能源转型中的电力供应安全和价格承受能力》^[27]，

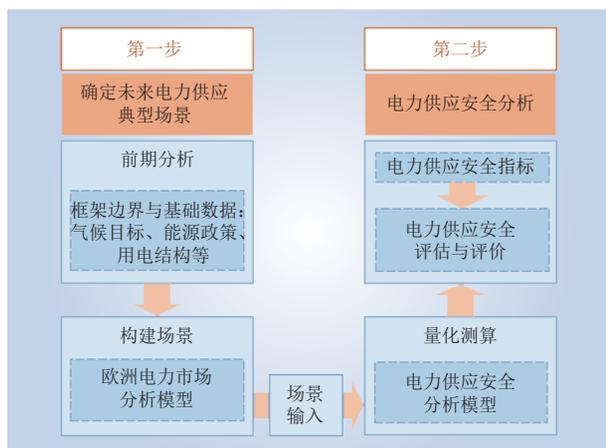


图 1 德国电力供应安全评估方法
Fig. 1 German electricity supply security assessment method

审查结论指出：电力供应安全应包括电力市场供应安全、供电可靠性和系统运行安全三大方面，安全评估须充分考虑退煤、弃核、极端气候、氢能发展等多因素的共同作用，滞后的电网建设将危及电力安全可靠供应，并阻碍气候目标实现。

2) 依托欧洲同步电网和统一电力市场，发挥电网互联互通和跨国交易的重要支撑作用。邻国电力支援是德国应对新能源出力波动性的有效手段。德国与邻国电网互联互通，同周边9个国家之间输电容量约达2000万kW，占全年最大负荷的近30%。在新能源出力较小时，邻国输入电力、支撑电力供应；在新能源大发时，向邻国输送电力、减轻调峰压力。根据预测，欧洲互联电网将是德国未来电力供应安全的重要保障，德国也将从电力净出口国变为电力净进口国。德国2020~2035年电源结构变化预测如图2所示。

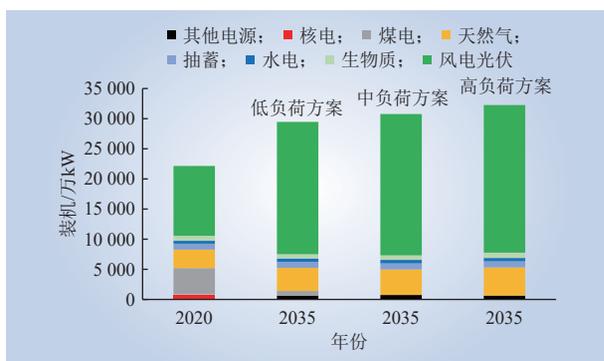


图2 德国2020~2035年电源结构变化预测

Fig. 2 Forecast of power supply structure change in Germany from 2020 to 2035

3) 保留一定的常规电源发电容量，发挥常规电源兜底保障作用。根据《德国2035电网发展规划》预测^[28]，虽然到2035年德国风电、光伏发电装机容量占比将达到75%左右，但仍有接近25%的燃气、水电等常规机组用以保证系统平衡，发挥兜底保障作用。德国2020—2035年电源结构变化如图3所示。

2.1.2 德国基于平衡组的电力行业管理机制

德国极具特色的基于平衡组的电力行业管理机制在保障电力安全可靠供应方面也发挥了重要作用。

平衡组是德国电网运行管理和市场组织的基本单元。电网中的生产者（电源）和消费者（用户）均须隶属于某一平衡组，并由某一主体担任

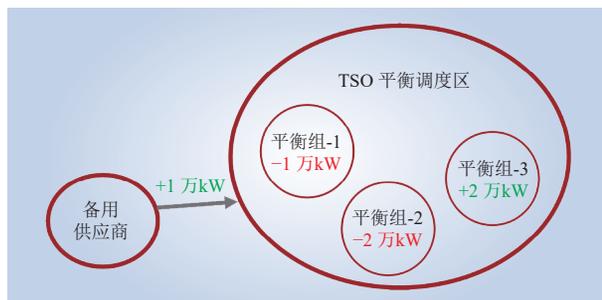


图3 输电运营商平衡偏差调整机制

Fig. 3 Balance deviation adjustment mechanism of power transmission grid operator

平衡组管理人。平衡组是一个虚拟的组合单元，成员之间无须通过电网连接，但必须处于同一个输电运营商的调度区域。

平衡组制定“自平衡”的发供电计划，实时运行中各平衡组偏差由输电运营商在系统层面进行统一平衡。平衡组基于每日发、用电量预测和市场交易组织，以“进出电量相等”为原则制定自平衡计划，上报输电运营商，如表2所示。实时运行中，平衡组均可能偏离其自平衡计划，此时由输电运营商调用预留的平衡备用容量在系统层面进行统一平衡，如图3所示。平衡备用容量包括一次、二次和三次备用容量，各类备用容量在目标、响应时间、启动方式及价格组成方面各有不同。输电运营商配置和调用平衡备用容量产生的平衡成本将根据各平衡组的平衡偏差情况分摊至各平衡组，作为惩罚费用。

表2 15 min 间隔内某个平衡组电量平衡案例

Table 2 Power balance case of a balance group within a 15 min interval

输入电量/(万kW·h)		输出电量/(万kW·h)	
发电厂X	115.3	用户A	1.4
发电厂Y	42.2	用户B	11.2
从S购买	10.0	向C出售	90.0
从T购买	5.1	向D出售	70.0
合计	172.6	合计	172.6

平衡组机制强化了平衡组管理主体的平衡责任，是一种“自下而上”的平衡管理机制，可大大降低系统平衡压力。近年来，在新能源发电量逐年提升的背景下，德国输电运营商平衡发电和用电的备用容量非但没有增加，反而有所下降。



主要原因在于：1) 平衡组机制有效激励了新能源预测技术水平的提升，减少了因新能源出力波动造成的系统平衡误差；2) 平衡组拥有“自调度”空间，可实现组内资源的最佳调度，充分挖掘灵活性潜力，进而提升了系统灵活性水平。

2.2 美国

2.2.1 美国可再生能源国家实验室相关研究

美国可再生能源国家实验室研究了未来新能源高占比对电力平衡的影响。研究指出，未来美国新能源高占比电力系统平衡将呈现 3 个特点：1) 因新能源预测误差导致的系统平衡备用需求将显著增加；2) 储能与需求侧资源将逐步成为平衡备用的主要提供者；3) 加强电网建设，提高跨区输电能力是实现新能源高占比的重要途径。测算表明，在未来新能源发电量占比接近 40% 的情景下，建设全国范围高压直流互联通道，可降低约 5% 的系统平衡装机需求。

2.2.2 美国得州和加州的相关举措

得州和加州是美国新能源发展的典范，近年来均出现过因极端天气等原因造成的电力供应短缺。新能源虽非直接诱因，但因其出力的不确定性，加重了事件严重程度。事后，得州和加州采取了相应防范措施^[29-30]。

得州是美国新能源发电量占比最高的地区，其新能源发电量占比已超过 20%。2021 年 2 月，极寒天气下得州出现严重电力短缺，超过 450 万用户电力供应中断。为防止类似事件再次发生，得州政府于 2021 年 6 月签署了系列法案推动电力系统改革，保障未来电力供应安全。1) 加强极端天气防御能力，对新能源等电源、输电和输气管道防寒改造做出强制要求，违规罚金高达 100 万美元；2) 完善电力应急事件监测预警体系，建立电力-气象联动预警系统，要求预警系统实时预测分析天气对电力系统运行的影响，全面、及时地向公众发布电力应急事件预警信息。

加州是美国新能源发电发展最为激进的地区，其新能源发电量占比也超过了 20%，2030 年可再生能源发电量占比目标为 60%，2045 年实现净零排放。2020 年 8 月，高温天气下加州发生限电事件，超过 24 万人供电中断。事后，加州加快储能大规模配置，提升系统灵活调节与顶峰能力。截至 2022 年底，加州储能总容量已近 500 万 kW。

2.3 日本

按照当前能源转型计划，日本 2050 年可再生能源发电占比将达到 50%~60%。由于可再生能源发电多为非同步电源，不具备转动惯量，未来日本将面临系统惯量水平持续降低，进而危及电力系统供应安全的问题。

日本提出维持惯量水平、修改电网导则、完善电力市场设计等一系列措施保障电网安全^[31-32]。1) 通过确保水电机组安全运行、维持同步电源运行、加装同步调相机等方式维持惯量水平；2) 修改电网导则，包括完善系统运行管理标准，如提升新能源发电机组故障穿越能力；制定技术规范，对新能源发电提供调频、转动惯量等能力做出具体要求；3) 完善电力市场设计，包括在容量市场中增设同步电源占比及容量价格，在辅助服务市场中进一步细化调频等交易品种，丰富交易时间尺度；4) 开展虚拟同步机、虚拟同步实时控制等技术研发。

3 相关启示与建议

本文系统分析了德国、美国和日本等新能源发达国家在新能源高占比的电力系统下，采取的电力供应保障措施。通过分析，将国外新能源高占比国家在电力供应保障技术支撑能力、电网基础设施、市场机制、行业管理等方面的研究和实践经验进行了总结。结合中国新能源发展和新型电力系统建设实际情况，对解决中国未来新能源跨越式增长后的电力供应保障问题，提出如下建议。

1) 持续加强电网互联互通。美国研究成果与德国实践经验均表明，电网互联互通将是新能源高占比电力系统的重要特征，对保障电力安全可靠供应意义重大。建议中国持续加强电网互联互通，提升电网资源优化配置能力，夯实电力供应安全基础。优化电网调度运行模式，充分利用跨省跨区输电通道能力，实现更大范围调节能力互济。

2) 从供需双侧发力。从德国未来电网规划来看，在退煤弃核背景下，燃气等常规发电机组对保障电力供应仍不可或缺。美国相关研究和举措表明需求响应、储能等灵活调节资源将是未来保



障系统平衡的重要支撑。建议结合中国国情，高度重视发挥火电的基础支撑和兜底保障作用。强化需求侧管理，将需求侧资源作为常态化资源纳入电力系统运行管理，完善电力需求响应机制，充分挖掘需求侧资源的潜力。

3) 充分发挥市场机制作用。从德国经验来看，依托欧洲统一电力市场，通过跨国交易实现电力资源在更大范围内共享互济，是德国未来保障电力供应的重要手段。建议中国优化电力市场总体设计，实现电力资源在中国更大范围内共享互济和优化配置，加快形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系。推动中长期市场、现货市场和辅助服务市场有机衔接。

4) 建立安全监测预警机制。从法律层面建立电力供应安全评估监测机制是德国能源转型中保障电力供应安全的重要经验。美国得州寒潮后也建立了电力应急事件监测预警体系。建议中国在相关法律法规中进一步明确电力系统中网源荷储等各类主体的电力供应保障责任，建立电力安全监测与预警机制，定期开展中国电力供应安全评估，及时发布预警信息。

4 结语

通过研究发现国外针对新能源迅速发展采取的电力安全保供措施与经验主要有4个方面。

1) 在电网侧要加强电网互联互通，增强电网安全保供能力；2) 要加强供给侧的保障能力，同时加强需求侧资源管理；3) 要通过电力市场来实现资源的优化配置；4) 要建立和完善安全预警机制对电力供应情况实施监督和预警。

参考文献：

- [1] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, *et al.* Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. *Electric Power*, 2022, 55(5): 1-11.
- [2] 单葆国, 冀星沛, 许传龙, 等. 近期全球能源供需形势分析及中国能源电力保供策略[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 1-13.
SHAN Baoguo, JI Xingpei, XU Chuanlong, *et al.* Recent situation of global energy supply-demand and guarantee strategy of China's energy and power supply[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 1-13.
- [3] 张运洲, 刘俊, 张晋芳, 等. 中国新能源“后补贴时期”发展分析[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 1-7.
ZHANG Yunzhou, LIU Jun, ZHANG Jinfang, *et al.* Study on the development of renewable energy during "post-subsidy period" in China[J]. *Electric Power*, 2019, 52(4): 1-7.
- [4] 崔杨, 安宁, 付小标, 等. 面向高比例新能源电力系统调峰需求的储能容量配置方法综述[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 1-8.
CUI Yang, AN Ning, FU Xiaobiao, *et al.* Overview of energy storage capacity allocation methods for high-proportion new energy power system peak shaving demand[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2023, 43(1): 1-8.
- [5] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.
HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan[J]. *Electric Power*, 2020, 53(1): 1-9.
- [6] 国网能源研究院有限公司. 中国新能源发电分析报告 2022[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [7] 顾洪宾, 范慧璞, 谢越韬, 等. 双碳背景下全球可再生能源领域发展机遇展望[J]. 国际工程与劳务, 2022(9): 22-25.
- [8] 周天舒, 迟东训, 艾明晔. 双碳背景下可再生能源面临的挑战及对策建议[J]. 宏观经济管理, 2022(7): 59-65.
ZHOU Tianshu, CHI Dongxun, AI Mingye. Challenges of and countermeasures for renewable energy sources against the background of carbon peaking and carbon neutralization[J]. *Macroeconomic Management*, 2022(7): 59-65.
- [9] 高海翔, 王小宇, 刘锋, 等. 未来电网运行形态研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 58-65.
GAO Haixiang, WANG Xiaoyu, LIU Feng, *et al.* Operation morphology design for future power grids[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2014, 33(1): 58-65.
- [10] 林伯强, 占妍泓, 孙传旺. 面向碳中和的能源供需双侧协同发展研究[J]. 治理研究, 2022(3): 24-34, 125.
LIN Boqiang, ZHAN Yanhong, SUN Chuanwang. A study of the coordinated development of energy supplies and the demand for carbon neutrality[J]. *Governance Studies*, 2022(3): 24-34, 125.
- [11] 张晓斐. 推动实现“双碳”目标背景下若干问题的思考研究[J]. 能源与节能, 2022(4): 69-71.
ZHANG Xiaofei. Thinking and research on several issues in context of promoting the realization of "dual carbon" goal[J]. *Energy and*



- Energy Conservation, 2022(4): 69–71.
- [12] 袁怀宇, 李凤琦. “双碳”目标影响供给侧结构性改革的机制与应对策略[J]. 理论探讨, 2022(1): 140–145.
- YUAN Huaiyu, LI Fengqi. On Mechanism and Countermeasures of the impact of "Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals" on Supply-side Structural Reform[J]. Theoretical Investigation, 2022(1): 140–145.
- [13] 刘瑞丰, 尹莉, 张浩, 等. 国际典型电力市场风能交易规则研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 10–12.
- LIU Ruifeng, YIN Li, ZHANG Hao, *et al.* Wind power trading rules in typical international electricity markets[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 10–12.
- [14] 王步云, 郭晨, 张炜, 等. 现货市场新能源参与方式及其对市场出清价格的影响分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 56–63.
- WANG Buyun, GUO Chen, ZHANG Wei, *et al.* Participation patterns of renewable energy in spot electricity market and its impact on market clearing price[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 56–63.
- [15] 练依倩, 郭祚刚, 喻磊, 等. 市场出清机制下综合能源服务商竞争策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 10–16, 42.
- LIAN Yiqing, GUO Zuogang, YU Lei, *et al.* Competition strategy of integrated energy service provider under pool-based market mechanism[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(7): 10–16, 42.
- [16] 谢俊, 汪震, 杨欢, 等. 对未来电力市场形态的若干思考[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(4): 50–56.
- XIE Jun, WANG Zhen, YANG Huan, *et al.* Investigation on future electricity market modality[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 50–56.
- [17] 王彩霞, 李梓仟, 李琼慧, 等. 丹麦新能源参与电力市场机制及对中国的启示[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 143–150.
- WANG Caixia, LI Ziqian, LI Qionghui, *et al.* Participation mechanism of renewable energy in the electricity market in Denmark and its implications for China[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 143–150.
- [18] 王宣元, 马莉, 曲昊源. 美国得克萨斯州风电消纳的市场运行机制及启示[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 10–18, 27.
- WANG Xuanyuan, MA Li, QU Haoyuan. Market mechanisms for wind generation in ERCOT market and the inspiration for China[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 10–18, 27.
- [19] Ea Energy Analyses Agora. The Danish experience with integrating variable renewable energy[EB/OL]. (2015-09-01) [2017-07-15]. https://www.agora-energiwende.de/fileadmin2/Projekte/2015/integration-variabler-erneuerbarer-energien-daenemark/Agora_082_Deutsch-Daen_Dialog_final_WEB.pdf.
- [20] 李更丰, 邱爱慈, 黄格超, 等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1–11.
- LI Gengfeng, QIU Aici, HUANG Gechao, *et al.* New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 1–11.
- [21] 王佐. 基于大规模新能源接入的电网规划风险预警系统研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(12): 203–208.
- WANG Zuo. Research on risk early warning system of power grid planning based on large-scale new energy access[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(12): 203–208.
- [22] IEA. World energy outlook 2021[EB/OL]. (2021-10-01) [2023-03-15]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- [23] IEA. World energy outlook 2022[EB/OL]. (2020-11-05) [2023-03-15]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>.
- [24] ERCOT. Seasonal assessment of resource adequacy for the ERCOT region [EB/OL]. (2021-10-01) [2023-03-15]. https://www.ercot.com/files/docs/2020/11/29/SARA_Winter2020-21.pdf.
- [25] IEA. Secure energy transitions in the power sector[EB/OL]. (2021-04-07) [2023-05-19]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed98d01e-dbe7-47c6-897e-feb27877bd59/Secure_energy_transitions_in_the_power_sector.pdf.
- [26] BMWI. Secure energy transitions in the power sector[EB/OL]. (2019-11-07) [2023-02-21]. <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/Areas/ElectricityGas/CollectionCompanySpecificData/Monitoring/MonitoringReport2019.pdf>.
- [27] BRH. Special report on climate change governance in Germany [EB/OL]. (2022-3-24)[2022-04-03]. https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/EN/Berichte/climate_chance_governance_volltext.pdf.
- [28] BNetzA. Anhang zum Netzentwicklungsplan strom 2035, version 2021[EB/OL]. (2022-2-17) [2022-09-05]. <https://www.netzentwicklungsplan.de/archiv/netzentwicklungsplan-2035-2021>.
- [29] 倪宇凡, 郑漳华, 冯利民, 等. 近年来国外严重停电事故对我国构建新型电力系统的启示[J]. 电器与能效管理技术, 2023(5): 1–8.
- NI Yufan, ZHENG Zhanghua, FENG Limin, *et al.* Power outages abroad in recent years and lessons to build new power system in



- China[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2023(5): 1–8.
- [30] 胡秦然, 丁昊晖, 陈心宜, 等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(24): 11–18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, *et al.* Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(24): 11–18.
- [31] KANEKO N, FUJIMOTO Y, HAYASHI Y. Sensitivity analysis of factors relevant to extreme imbalance between procurement plans and actual demand: case study of the Japanese electricity market[J]. *Applied Energy*, 2022, 313: 118616.
- [32] 袁玉湘, 赵守和. 日本分布式可再生能源并网应对策略 [J]. *供用电*, 2018, 35(9): 62–68.
YUAN Yuxiang, ZHAO Shouhe. Japan's countermeasures for distributed renewable energy generation parallel in the power grid[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 35(9): 62–68.

作者简介:

叶小宁 (1990—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事新能源发展规划、并网运行分析、新能源政策及市场机制研究, E-mail: yexiaoning@sgeri.sgcc.com.cn;

王彩霞 (1985—), 女, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事新能源政策与电力市场机制设计, 高比例新能源电力系统运行分析研究, E-mail: wangcaixia@sgeri.sgcc.com.cn;

李琼慧 (1969—), 女, 硕士, 高级工程师 (教授级), 从事能源与电力发展战略规划研究, E-mail: liqionghui@sgeri.sgcc.com.cn;

杨超 (1988—), 男, 博士, 工程师, 从事新能源发展规划和并网运行分析研究, E-mail: yangchao@sgeri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 于静茹)

Power Supply Ensuring Measures and Implications of Foreign Countries' Power Systems with High Proportion of New Energy

YE Xiaoning, WANG Caixia, LI Qionghui, YANG Chao

(State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: With the global energy transformation and the rapid development of new energy, the power supply security issue of the power system with high proportion of new energy has become increasingly prominent and attracted focal attentions in some countries. Firstly, we analyzed in detail the power output characteristics of new energy and its challenges to power supply security in power balance and load support degree. Secondly, by selecting Germany, the United States, Japan and other typical countries with a relatively high proportion of new energy development, we made an in-depth study of their practical experience of ensuring the safe and reliable power supply in the power system with a high proportion of new energy from three aspects of policies and regulations, monitoring and early warning, dispatching and operation management. Finally, based on the actual situation of China's new power system construction, we proposed the implications for China's new energy development, which can provide a certain reference for China's power supply security.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.SGSHJY00GPJS2200021).

Keywords: energy transition; new energy; power system; power supply; ensuring measures