第 49 卷 第 7 期：2711-2724 高电压技术 Vol.49, No.7: 2711-2724
2023 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230246

高比例新能源系统供需平衡分析方法和对策

刘俊磊[1]，刘新苗[1]，卢 洵[1]，张东辉[2]，徐芸霞[2]，邢 月[2]
（1. 广东电网有限责任公司，广州 510620；2. 清华四川能源互联网研究院，成都 610000）

摘 要：我国正在建设高比例新能源系统，系统电源结构、运行方式和系统稳定特征将发生根本性改变，其中供需平衡问题将成为系统面临的首要问题。因此，针对高比例新能源系统供需平衡问题，首先从一次能源供应、灵活性资源和现有电网适应性 3 个方面总结面临的主要问题和风险；其次对高比例新能源系统的供需平衡主要分析方法进行调研综述，总结比较各主要方法应用于高比例新能源系统供需平衡分析的优缺点，给出各方法适用范围和应用建议；最后从灵活性资源供给、新型电网建设、新能源出力和负荷预测、新型调度体系及电力市场机制建立等方面提出高比例新能源系统供需平衡主要对策。

关键词：高比例新能源；供需平衡；电网规划运行；灵活性资源；新能源消纳；负荷供应

Analysis Methods and Countermeasures of Supply and Demand Balance of High Proportion of New Energy System

LIU Junlei[1], LIU Xinmiao[1], LU Xun[1], ZHANG Donghui[2], XU Yunxia[2], XING Yue[2]
(1. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510620, China;
2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610000, China)

Abstract: China is building a high proportion of new energy system, therefore, the power supply structure, operation mode and system stability characteristics of the system will be fundamentally changed, and the balance between supply and demand will become the primary problem facing the system. This paper focuses on the supply and demand balance of high proportion of new energy systems. Firstly, the main problems and risks faced from three aspects, namely, primary energy supply, flexible resources, and the adaptability of the existing power grid, are summarized. Secondly, the main analysis methods of supply and demand balance of high proportion new energy system are surveyed and summarized, the advantages and disadvantages of each main method applied to the supply and demand balance analysis of high proportion new energy system are summarize and compared, and the applicable scope and application suggestions of each method are given. Finally, the main countermeasures for the supply and demand balance of high proportion new energy system are proposed from the aspects of flexible resource supply, new power grid construction, new energy output and load forecasting, and the establishment of new dispatching system and power market mechanism.

Key words: high proportion of new energy; supply and demand balance; power grid planning and operation; flexible resources; new energy consumption; load supply

0 引言

在“双碳”目标导向下，我国以风电、光伏为主的新能源装机规模快速增加。2021 年底，风电装机 3.3 亿 kW，光伏装机 3.1 亿 kW，发电量占比 11.8%，目前处于中等位置[1]；根据国家发改委、国家能源局发布的《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》规划，预计 2030 年我国风电、光伏总装机超 12 亿 kW，超过煤电成为第 1 大电源，发电量占比 60%以上，相当部分区域风电、光伏装机占比 50%以上，处于高比例新能源系统(以下简称高比例系统)阶段。

在高比例系统中，系统电源结构、运行方式和系统稳定特征将发生根本性改变[2]，新能源成为供电主体，由于其出力的波动性和随机性，造成系统面临着短时电力和长时电量双重不平衡的风险[3-6]。尤其是极端天气直接导致风电、光伏的出力受限，若系统备用容量不足，则容易引发电力供应短缺。近年来，高比例系统中，因极端天气带来的负荷超预期增长、负荷高峰期新能源出力不足、电网灵活

基金资助项目：广东电网有限责任公司规划项目(030000QQ00220001)。
Project supported by Guangdong Power Grid Co., Ltd. Planning Project (030000QQ00220001).

性调节能力不足等原因[7]，导致的大停电事件时有发生，造成了严重的经济损失和社会影响，如：2016年9月南澳大停电[8-9]，2019年8月英国大停电[10-12]，2020年8月美国加州停电[13-14]，2021年美国德州大停电[15-16]，2020—2021年间我国内蒙古乌兰察布、湖南、江西等地出现电力供需紧张等[17-19]。

高比例系统中，供需平衡是其运行的首要难题[20]。文献[21-22]总结了源–网–荷–储各环节的结构演变和存在问题；文献[23]分析了能源供应方面的3大挑战，即能源安全、能源成本和能源环境；文献[24]总结了因系统“双高”特性带来的安全稳定问题；文献[25-26]指出新场景下系统的平衡难度，灵活平衡能力成为系统安全稳定运行的核心。

文献[25，27-29]等提出了电力系统的灵活性概念及特征。考虑灵活性的供需平衡分析方面；文献[25，30]建立了考虑系统灵活性的供需平衡模型；文献[25]总结了将灵活性纳入电力电量平衡的模拟方法，主要分非时序和时序生产模拟两类，具体包括典型场景模拟[21,31]、随机生产模拟[32-33]和时序生产模拟[3,34]；文献[28-29]则建立了系统灵活性供需平衡的定量评价指标及方法。

在上述已有供需平衡相关模型及分析方法的基础上，相关学者在规划运行方面进一步拓展了研究。文献[35]构建了考虑灵活性供需平衡的源–储–网一体化规划模型；文献[30，34]均基于灵活性评估指标建立了输电网两阶段扩展规划方法和模型；文献[36]将灵活性资源调节效益和碳贸易收益纳入优化目标，构建了考虑灵活性需求的多时间尺度协调优化规划模型；文献[3]建立了适应高比例新能源波动特性的电力平衡时序生产模拟模型，来模拟分析电源运行状况、发用电平衡和新能源消纳水平；文献[37]以多种能源的综合运行成本最低和风电消纳最大作为储能容量配置的优化目标，建立了基于供需弹性和储能的风电优化调度方法。

已有文献主要以某种单一方法对某些特定场景的灵活性供需平衡进行相关研究，本文试图就高比例系统供需平衡的风险、分析方法进行归纳总结并提出思考对策，首先总结了面临的主要问题和风险，然后对高比例系统的供需平衡主要分析方法进行调研综述和应用建议，最后从灵活性资源供给、新型电网建设、新能源出力和负荷预测、新型调度体系及电力市场机制建立等方面提出高比例系统供需平衡主要对策。

1 供需平衡主要问题和风险

对于新能源比例较低的传统电力系统来说，其供需平衡一般注重一次能源供应、装机充裕以及电网建设；而对于高比例系统来说，由于新能源出力的随机性、波动性和低利用小时特点，以及高比例系统稳定机理的重大变化，系统供需平衡面临主要问题和风险会发生重大变化。文献[21]将高比例系统分为中高比例和极高比例，本文主要针对中高比例系统，总结其供需平衡主要问题和风险为一次能源供应、灵活性资源以及电网适应性。

1.1 一次能源供应风险

近年来我国新能源发展迅速，根据国家统计局公布数据，截至2021年底，我国风电装机占比13.9%，太阳能占比13.0%，但目前的发电主体仍以煤电为主，装机占比46.7%，因此现有的一次能源供应风险主要体现在以煤炭为主的阶段性市场供应风险。

高比例新能源接入的系统能源结构发生改变[3,38-40]，新能源成为电量供应主体，系统一次能源供应的结构、策略和风险也随之改变。由于新能源出力的随机性，会带来高比例新能源接入系统的一次能源供应风险，整体表现为时、日、月、季度、年度的多时间尺度特点[41]。对于火电机组，煤电将由电量型电源向兜底保障的应急电源转变[42]，相对现有煤炭产能来说，电煤供应理论上不应再是一次能源供应的主要风险，主要风险是煤电装机下降造成新能源电量不足、进而导致的供电风险[23]，其次是电煤产能随着需求下降过快导致阶段性供应风险。另外，对于部分水电比例高的区域(如四川和云南)，以及气电比例较高的负荷中心区域，存在区域特点一次能源供应风险。

1.2 灵活性资源不足

传统电力系统的电力平衡是在“源随荷动”的运行规则下，计及机组投产、检修、断面输送等约束，将不确定性问题边界化处理，考察严重方式下的系统装机裕度和调峰裕度[25,43]。

随着新能源并网比例的增加，由于新能源出力的随机性、波动性和阶段性反调峰特性，以及负荷侧波动性增加，系统净负荷波动性加大、峰谷差加大、随机性加大、峰谷切换速度加大[3,23]，高比例系统的电力平衡难度剧增、随机性加大，不仅需要更大规模调峰资源，而且对调峰资源的调峰能力、

响应速度、爬坡速度提出了更高的要求，仅靠火电等常规电源实现电力平衡不经济甚至不现实[44]。因此，文献[25，29，45]等提出电力系统灵活性概念。文献[11]定义电力系统灵活性为：在所关注时间尺度的有功平衡中，电力系统通过优化调配各类可用资源，以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力。高比例系统对源网荷储各类灵活性资源规模和性能要求较高，若灵活性资源配置未满足要求，系统将出现新能源消纳和负荷供应保障问题，对电力供需平衡构成根本性挑战。

1.3　现有电网适应性问题

高比例新能源并网，局部区域的就地平衡更加困难，各地区之间有必要通过进一步加强电网互联互济，实现互供电力、互通有无、互为备用[46]，系统内各关键断面的潮流变化幅度和速率将加大，对现有电网规划运行模式构成挑战。此外，新能源利用小时数一般远低于常规电源和负荷，现在不同省网普遍存在集中式新能源送出通道利用小时数偏低、通道经济性差问题，目前还可以采取风火打捆等方式进行提升[47]，在高比例新能源接入后，这个问题将进一步放大。新能源一般为电力电子接入，高比例新能源并网后电源结构发生巨大变化，电网稳定特性也会有较大改变，形成的稳定约束可能严重影响供需平衡。另外，我国正在面临电力运行调度传统“计划”方式挤压新能源发展空间的调度矛盾，以及新能源发电市场化消纳机制尚不健全的体制机制矛盾[48]。

2　供需平衡的分析方法和应用

对于新能源比例较低的传统电力系统来说，供需平衡的不确定性相对较低，平衡策略基本是“源随荷动”，基本分析方法也是各类边界化分析方法，如中短期电力平衡采用较多的是典型日法[38]，包括典型日高峰负荷时刻平衡和调峰平衡。在传统电力系统生产模拟中，特别是对于含大量水电的系统，也会采用时序生产模拟法，去模拟预测可能面临的调峰平衡风险，以及丰、枯时期的季节性电量不平衡风险，通过运行优化实现水电和火电之间的有效配合[49-50]。

高比例系统中，新能源出力的波动性、随机性和不可控，导致传统的电力平衡方式无法实现对净负荷曲线的包络，系统出现了局部多时段或阶段性电力不平衡现象，需要充分挖掘源–网–荷–储等环节的其他灵活性资源调控潜力，实现系统实时电力平衡[25]。从供需平衡分析方法来说，边界化分析方法和时序生产模拟也会继续发挥作用，但仅采用边界化处理方法对于系统运行经济性不再合适，平衡描述方式改变、关键平衡变量概率化以及分析方法手段升级都是必需的。

2.1　灵活性供需平衡的引入

电力电量平衡仍然是高比例系统需要计算的基础内容，但是由于新能源的随机性、波动性，分时刻的平衡难度更大，需要引入网荷储等多种资源实现各时刻电力平衡。文献[25]提出，由于高比例系统的系统平衡方式从电源跟踪负荷的单向模式变成源–网–荷–储互动方式，平衡也从传统电力平衡扩展到灵活性平衡[21,25,39]，其中灵活性平衡指系统在任何时刻、任一时间尺度下及任何方向上，各类资源的灵活性供给相对于灵活性需求的充裕程度超过允许水平。在极高比例系统(新能源发电量超过 50%)中，风/光电源特性主导了系统运行[21]。总之，高比例系统中，电力电量平衡是基础，但更突出的矛盾是各时刻的电力平衡，因此，有必要引入灵活性供需平衡或灵活性评价指标。

目前，考虑系统灵活性的供需平衡分析方法及流程如图 1 所示，主要包括：首先建立系统灵活性的“供给–传输–需求”数学模型[51-53]；其次采用合适的方法计算分析系统灵活性供需平衡情况，目前的研究大多采用基于典型场景或一定时段的时序生产模拟法，并采用随机优化、鲁棒优化和机会约束等方法来处理系统中的不确定性问题[54-56]；最后建立并计算灵活性度量指标以综合评估系统灵活性[57-60]。

灵活性供需平衡建模方面，供给模型需考虑一定时段内，系统中所有应对不确定性的灵活性调节资源能够提供的向上、向下灵活性供给能力，主要包括电源侧经灵活性改造的常规火电机组、电网侧抽水蓄能机组、用户侧需求响应以及灵活分布于系统各个环节的储能系统。传输模型可考虑节点灵活性资源按一定分配比例通过线路传输至灵活性需求处，实现灵活性供需的转移[30]。需求模型主要考虑综合风电、光伏、负荷后得到的净负荷时序波动变化。

系统灵活性评价方面，评价对象包含灵活性供给源、需求源和传输网架。评价维度包括：多方向灵活性调节能力；时间维度上的短、中、长全时段不同尺度；空间维度上的空间内部能力和跨区域支援能力。灵活性指标建立需考虑概率分布特性和时

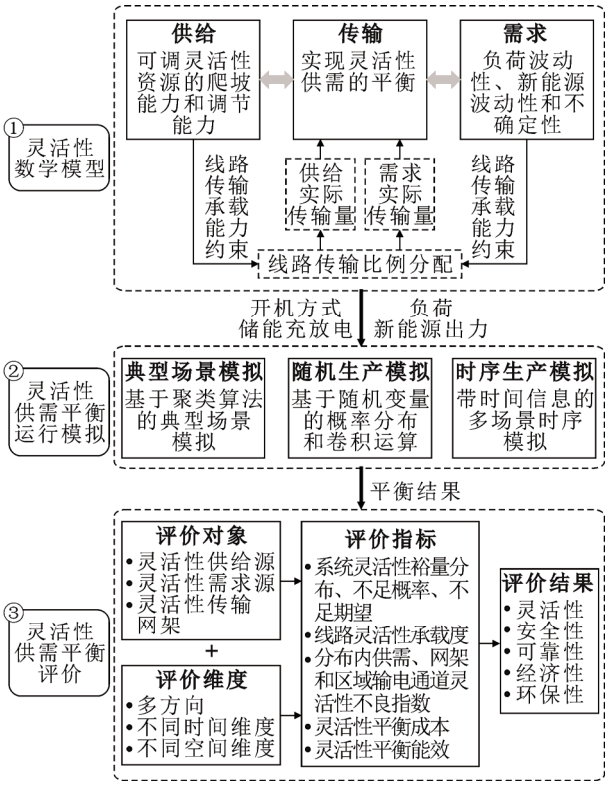


图 1 高比例系统的灵活性供需平衡分析方法

Fig.1 Analysis method of flexible supply and demand balance for high proportion new energy system

空特性，如文献[25]提出的系统灵活性裕量分布、不足概率和不足期望，文献[30]提出的线路灵活性承载度指标，文献[31]提出的灵活性在分区内供需、分区内网架及区域间输电通道的不良指数等，同时还可纳入灵活性平衡成本、能效等指标以全面评价系统安全、可靠、灵活、经济运行情况。

2.2 模拟计算方法和比较

高比例系统供需平衡模拟计算方法既包括对传统平衡方法和时序生产模拟的方法升级，也包括高比例新能源场景下独有的基于概率的随机生产模拟，总结如下。

1）基于聚类方法的典型场景模拟

该方法与传统典型日法都是基于系统的历史运行曲线，模拟极限场景下的电力平衡。不同的是，典型场景模拟是基于新能源和负荷的历史曲线，主要用于模拟分析高比例系统受极端天气和极端灾害的影响[61-65]，如寒潮[66-68]、飓风/台风[69]、沙尘[70-72]、地震[73]、磁暴[74]等，或选取实际案例典型值[75-77]、最值序列[78]，或采用 K-means 算法、Canopy 算法等聚类方法[79-82]来重构极端场景，其场景相较于典型日法更复杂。该方法可将大量历史运行场景缩减为几个典型场景，提高计算效率，但也存在一定局限性，如极端场景时间尺度可能过短(多以日居多)、场景样本选取缺乏更多数据支撑或场景单一，若用于长时间尺度的运行分析，可能无法反映新能源中长期波动和灵活性资源电力存储时间积累的运行特性。文献[21]指出，极端场景的模拟需基于长年的历史气象数据，建立源–网–荷–储各类设备的气象–运行特性映射函数，量化极端天气对供需平衡的影响，用于生产模拟或优化规划分析。

2）基于概率的随机生产模拟

在传统随机生产模拟的基础上，高比例系统中，随机生产模拟应用的核心是以随机变量概率分布函数表示负荷与新能源，即考虑系统不确定性因素，采用解析法和模拟法等拟合系统净负荷曲线及其概率分布，求解最优运行方式下含概率分布特性的新能源消纳能力[32]、系统灵活性调节能力[33]。其中，处理计及新能源和负荷等不确定性因素的手段可采用随机优化法[83]，相应的规划优化及运行调度问题通常采用两阶段[84-85]或多阶段随机优化模型[86]。

随机生产模拟方法只需新能源的概率分布信息，可解决规划初期缺乏详细新能源数据的问题，计算速度快，但未考虑长时序耦合影响、机组组合情况和爬坡性能等因素，有一定局限性。另外，随机生产模拟需要提取新能源出力等关键因素概率信息，结果中包含概率信息，对操作人员要求高、难度大。

3）基于多场景的时序生产模拟

该方法基于传统时序生产模拟，增加了对多个场景下风/光出力曲线变化规律的考虑，根据新能源和负荷的时序数据，结合电网运行方式的时序变化特性，逐时段模拟一定边界条件下系统的发用电平衡情况和新能源消纳水平[3,87]，其被广泛应用于新能源消纳能力评估，但长时间尺度的计算量大、耗时长[88-90]。在考虑灵活性平衡计算方面，目前的研究主要以日尺度的短时序生产模拟计算系统灵活性指标[21]，对不确定性随机变量的建模尚不完善，且未考虑空间尺度问题[21]。

因此，文献[21]指出，后续研究中多场景时序生产模拟优化需完善空间相关性、元件状态时序连接关系、多随机变量相关性的建模，建立多场景间的时序联系，优化模拟时长和算法，提高多时空尺度供需平衡计算的时效性和准确性。不确定性随机变量的建模可采用鲁棒优化法[91]，为降低鲁棒优化

的保守性，可从数据中挖掘随机变量的变化范围[92]，或建立分阶段鲁棒优化[93]；或采用机会约束法来降低不确定性因素在系统中的风险，并通过模拟法和解析法将模型转化为确定性模型后再求解，解决模型难以直接求解的问题[94]。

本文总结上述各类模拟方法的不同维度优缺点如表 1 所示。

2.3　供需平衡分析方法应用和建议

由前文分析可见，各类供需平衡方法均有优缺点，在高比例系统规划运行各个阶段的供需平衡分析中，需要根据需求和方法特点应用不同的方法。本文试图提出如下应用和建议。

1）规划阶段

高比例系统中的中长期规划可以采用典型日法研究系统装机和电源结构在极端情况下的供需安全裕度，确定规划电源装机和源网荷储灵活性资源基本需求。可以采用随机生产模拟法，根据新能源的概率分布信息模拟其出力的概率分布特性，得到概率化评估结果，初步评估规划总体方案的经济性和可行性。进一步地，基于聚类方法的典型场景模拟，可以较为详细地研究各典型场景下规划结果适应性。如果有条件，可以采用简化要素的时序生产模拟，甚至采用基于多场景的时序生产模拟，将模拟运行结果应用于规划评估，能够得到更详细、更全面的系统规划供需平衡评估结果，如新能源消纳水平、系统运行经济性、负荷供应能力等。

2）运行阶段

电力系统运行阶段，如果是中长期(如年及以上)运行模拟，则和规划较为类似，不再赘述；不同点在于运行阶段对新能源投产计划、出力模拟更为精准，也更有条件采用基于多场景的时序生产模拟得到更详细的供需平衡结果。

对于短期运行方式测算，如日前方式运行，主要是通过生产模拟运行结果安排具体的发电机组出力曲线，可结合典型日法和多时空时序生产模拟法，建立更详细的多随机变量相关性、空间相关性和元件状态时序连接关系的模型，提升日前运行模拟的准确性，实现一定时段内的灵活性资源最佳组合，最大化资源利用率，降低运行成本。另外，也需要应对突发状况，需要进行一些极端情况下的典型场景模拟。

各类分析方法各有优缺点，在实际应用中，应根据具体分析需求，取长补短，交叉配合选取各类方法，在建立可靠模型的基础上，有条件尽量采用程序化的生产模拟法，输入可视具体研究需求适当简化，关键参数的不确定性、新能源不确定性采用多抽样构建多场景进行模拟。

表 1　考虑灵活性供需平衡的模拟计算方法对比

Table 1　Comparison of simulation calculation methods considering flexible supply and demand balance

评价维度	典型场景模拟	随机生产模拟	多场景时序生产模拟	多场景时序生产模拟优化
方法简化度	★★★★	★★	★★★	★★★
输入要求	★★★★	★★★	★★★	★★★★
新能源消纳分析	★	★★	★★★★	★★★★
场景完整度	★★	★★★	★★★	★★★
日内电力平衡模拟	★★★	★★	★★★★	★★★★
不确定因素建模	★★★	★★★	★★	★★
长时序耦合影响	/	/	★★	★★★★
空间尺度影响	/	/	/	★★★

注：“★”越多表明该方法在相应指标项的输入要求越低或能力越突出，方法的总体评价可以初步用“★”的个数简单评价，“★”越多优势越大。“/”表示方法没有该项指标评价维度。

3）整体供需平衡分析思路建议

本文提出的高比例系统的供需平衡分析整体框架如图 2 所示，综合了初步的电力电量平衡分析，以及通过模拟进行灵活性资源校核，具体如下所述。

步骤 1：电力电量平衡。根据系统源–网–荷–储数据，进行典型场景下的电力电量平衡分析，在考虑一定规模的需求侧响应情况下，快速估算系统装机裕度，若装机裕度满足系统目标，则进行运行模拟校核；若不满足，则需重新优化电源装机规模和类型，直至满足目标。

步骤 2：运行模拟。结合实际分析所侧重的需求及不确定性因素，选择合适的模拟计算方法，构建模型和场景，将灵活性资源拓展至源网荷储共同参与，开展考虑系统灵活性资源充裕度的模拟计算。考虑到高比例系统会出现数天甚至数周的新能源大发，以及储能等能量调节资源有限，本文建议规划阶段可采用简化要素的长模拟时长时序生产模拟，在运行阶段根据需要采用更精确的短周期时序生产模拟，并适当考虑关键参数敏感性。若灵活性资源充裕度满足系统要求，则进入方案综合评价；若不满足，则可采用优化机组组合、检修计划、灵活性资源规模安排及调用等措施重新优化方案，再次重复步骤 1 和步骤 2，直至满足要求。

步骤 3：综合评价。根据运行模拟结果，建立量化评价指标体系，主要包括高比例系统的供需平

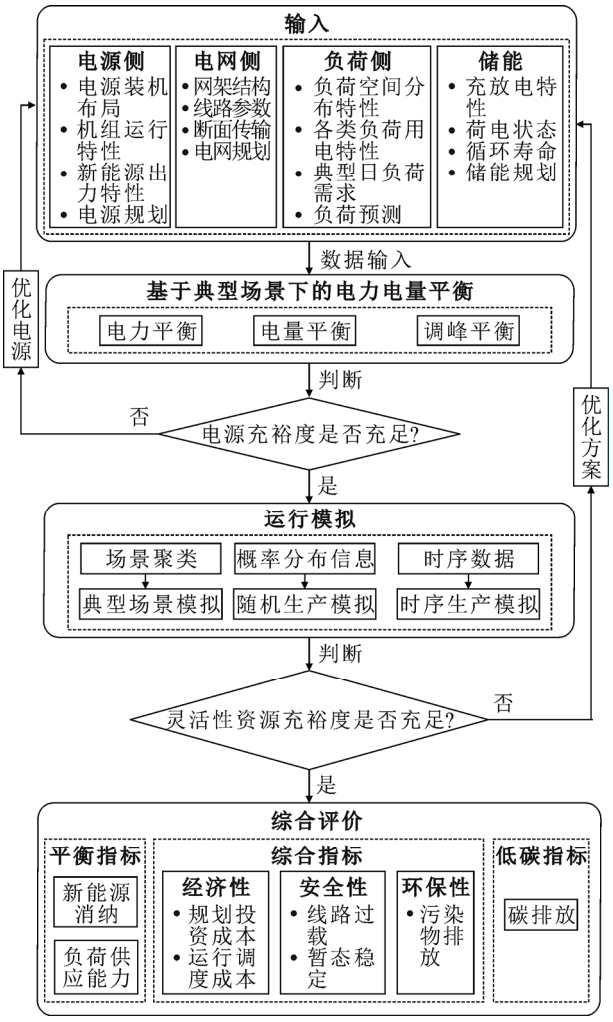


图 2 高比例系统的供需平衡分析框架

Fig.2 Analysis framework of supply-demand balance of high proportion new energy system

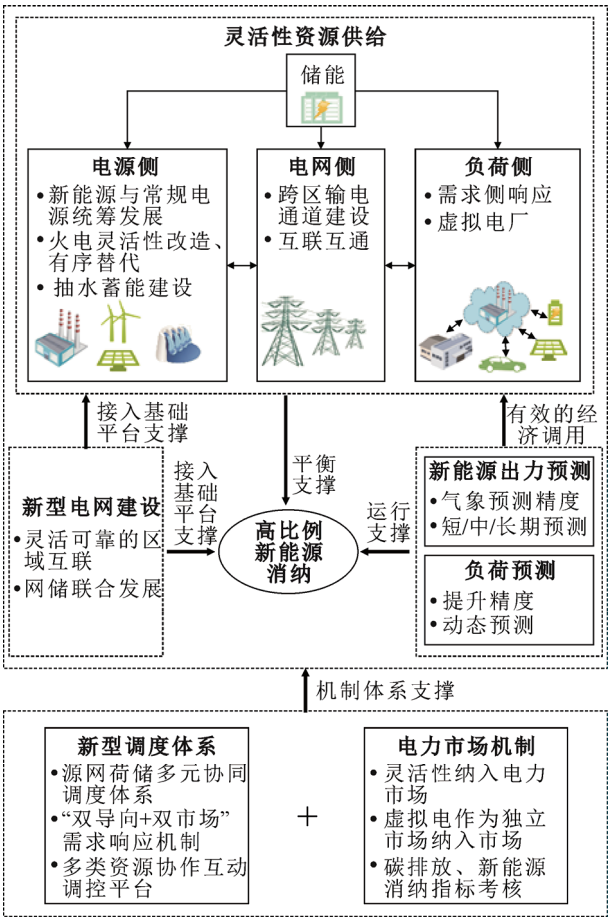


图 3 高比例系统的供需平衡对策

Fig.3 Supply and demand balance of high proportion new energy system

衡指标、综合性指标(含经济性、安全性和环保性)以及考虑低碳的综合指标，根据指标计算结果，对当前方案进行综合评价，实现多方案的比较，为系统实现高效、经济、节能的供需平衡策略制定提供参考。

3 供需平衡主要对策

为实现高比例系统的供需平衡，本文提出 4 个方面的对策，如图 3 所示。一是需要充分挖掘和统筹调控源网荷储各侧的灵活性资源，为高比例新能源消纳提供充足的平衡调节资源；二是构建新型电网，优化建设区域间的互联互通输电通道，为各类供、需资源接入系统参与平衡调节提供平台支撑；三是提升新能源出力和负荷预测的精度并优化预测时长，以实现灵活性资源更有效的经济调用，支撑供需实时平衡计算；四是同步建设相匹配的新型调度体系和电力市场机制来实现资源的投资建设和经济调度，为系统实现经济、高效、公平的整体供需平衡调度运行提供机制和体系支撑。

3.1 统筹协调多类型源网荷储灵活性资源供给

高比例系统面临多时间尺度、不同响应速度和频次以及灵活性资源需求，需要多类型的源网荷储灵活性资源。如图 4 所示，优先挖掘现有各类灵活性资源潜力，如电源侧统筹新能源与常规电源发展，推动火电的灵活性改造和有序替代[95-98]，同时规模化建设当前最经济的容量型储能抽水蓄能，这些是当前调用频次最高、容量最大的基本灵活性资源[26]。电网侧，通过大容量跨区输电通道建设(如高压直流输电等)提升区域间的互联互通能力，实现空间上的跨区灵活性资源共享[99-101]。负荷侧大力发展需求侧响应，降低系统灵活性资源配置需求和运行成本，进一步可以结合分布式电源发展虚拟电厂，以期实现负荷侧高频经济调用的灵活性资源[102-103]。新型

储能是未来高比例系统中的关键灵活性资源，可配置于源–网–荷不同环节，与各类已有经济型灵活性资源协调配合，因地制宜，补充各个环节的灵活性资源欠缺[26]。目前，需要重点研究高比例新能源背景下，新型储能在各个环节的配置比例，以及与已有灵活性资源配合配置问题[104-106]。

3.2　适应高比例新能源的新型电网建设

如图 5 所示，高比例新能源并网后的新型电网不仅要承担给负荷供电、电网接入的基本任务，还需要在以下几个方面做出突出改变。

1）更灵活、更可靠的区域互联能力。在高比例新能源下，现有的常规交流互联可能难以承受复杂而多变的潮流变化和潮流穿越，本文建议拓宽思路，在现有通过长距离直流实现跨区互补的基础上，进一步引入多种交直流混联的区域化模块化构网思路。

2）从单一供电电网建设向网储联合发展，摆脱单一输送通道性质。在电网枢纽节点引入储能支撑，拓宽电网能量输送的时间弹性，增强电网抵御各类事故能力[107-108]。在负荷中心关键点引入储能，增强负荷侧虚拟电厂调控能力，进一步降低负荷侧刚性。对于新能源利用小时数低的输电通道，积极鼓励新能源场站加装氢能等设备[109]，降低阶段性集中大量弃电，同时，本文提出设想，可以借鉴配网转供，考虑在新能源通道间加装临时转供措施。

3.3　新能源出力预测和负荷预测

高比例新能源场景下，源荷双侧的波动性和随机性加大了系统平衡难度，如图 6 所示，需要进一步提升新能源出力和负荷预测的准确性和及时性，以实现对有限灵活性资源的有效利用和精准安排。新能源出力预测的精度依赖于气象预测的精度，需要进一步前置提升气象预测精度[21,110]。预测时长上，既要保留现有的超短期预测(未来 4 h 内)和短期预测(未来 72 h 内)，还需建立中长期的新能源出力预测机制和方法[111]，可采用物理模型驱动法和数据驱动法，根据实际需求，结合物理驱动法的应用广、解释性强等特点[112-113]，以及数据驱动法的建模高效性和实用性等特点[114-115]，取长补短，配合使用。高比例新能源场景下需要深入挖掘和发挥负荷侧灵活资源，如需求侧响应、虚拟电厂等[116-118]，负荷预测在现有预测进一步细化的基础上[119-121]，还需动态做好负荷侧灵活资源的预测。

3.4　新型调度体系和电力市场机制的建立

高比例系统中，传统“源随荷动”调度方式、按照计划协议方式统筹考虑电力平衡的方式难以适用，如图 7 所示，有必要建立适应高比例新能源接入的新型协调调度体系，同时建立对应的电力市场机制。文献[122]提出建立源网荷储多元协同调度体

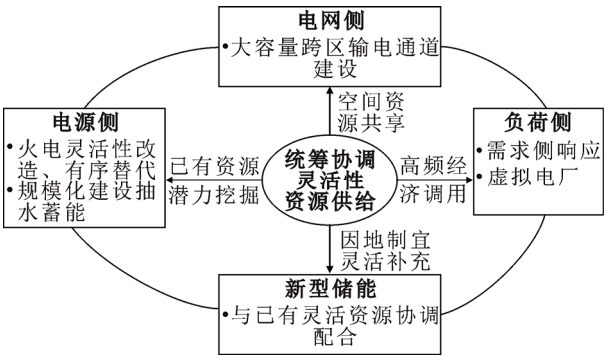


图 4　统筹协调多类型源网荷储灵活性资源供给

Fig.4　Coordinate and coordinate the supply of flexible resources for multiple-types source network storage

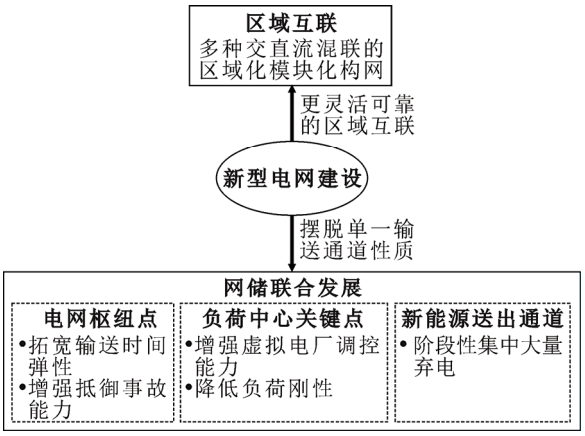


图 5　适应高比例新能源的新型电网建设

Fig.5　New power grid construction adapting to high proportion new energy

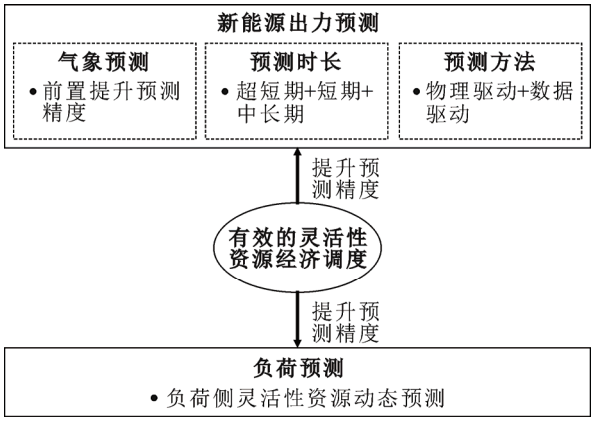


图 6　新能源出力预测和负荷预测

Fig.6　New energy output prediction and load prediction

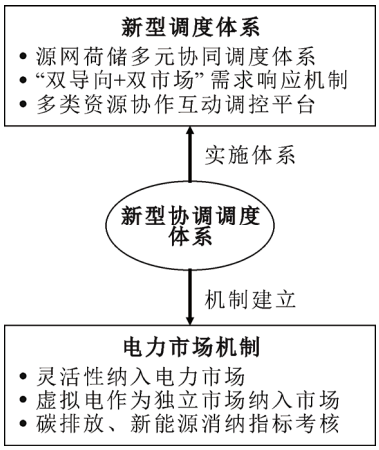


图 7 新型调度体系和电力市场机制建立

Fig.7 Establishment of new dispatching system and electricity market mechanism

系，建立了适应电力现货市场模式的“双导向、双市场”需求响应机制，设计多类资源协作互动调控平台，汇集各类潜在调节资源，为源网荷储协同调控提供实施体系。此外，将灵活性纳入电力市场交易是能源领域的必然趋势，电力市场要能够反映当前系统的灵活性水平及不足，给出灵活性资源投资信号，激励用户主动参与清洁能源消纳[123-125]。同时有必要将虚拟电厂作为独立市场主体纳入市场交易体系[126]，将碳排放指标和新能源消纳指标作为市场交易重要考核对象[127]。

4 结论

高比例系统的电源结构、运行方式和系统稳定特征均发生转变，短时多发的电力不平衡和长时电量不平衡将成为系统面临的首要问题。因此，本文分析总结了新场景下系统供需平衡的问题风险、研究分析方法和主要对策，为未来电力系统的相关研究奠定基础，具体结论如下：

1）新场景下，系统的供需平衡风险主要来自煤电装机下降导致的整体新能源电量供应不足、区域水电和气电比例高导致的一次能源供应风险；系统源网荷储各类灵活性资源配备不足导致的新能源消纳和负荷供应电力保障问题；电网关键断面潮流变化大、通道利用小时数偏低、通道经济性差、稳定约束导致的电网供需平衡风险。

2）供需平衡分析方法方面，传统的边界化分析方法和时序生产模拟继续发挥作用，但需升级优化平衡描述方式、关键平衡变量概率化和分析方法手段等来兼顾系统运行经济性。此外，在实际应用中，应结合具体问题的分析需求及各类方法的优缺点，取长补短，交叉配合选取合适的手段，建立可靠的模型，尽量程序化生产模拟，视具体研究需求适当简化输入，提高研究高效性和可靠性。

3）高比例系统的供需平衡要立足全局，从灵活性资源供给、新型电网建设、新能源出力和负荷预测以及新型调度体系及电力市场机制建立等方面综合提升。

参考文献 References

[1] 2021年非化石能源发电装机容量首超煤电[J]. 中国电力企业管理，2022(3)：6-7.
The installed capacity of non-fossil energy power generation surpassed coal-fired power generation for the first time in 2021[J]. China Power Enterprise Management, 2022(3): 6-7.

[2] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[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.

[4] 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 Xuenong. 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.

[5] 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.

[6] 张东辉，康重庆，卢 洵，等. 高比例新能源系统中储能配置规模论证[J]. 南方电网技术，2022，16(4)：3-11.
ZHANG Donghui, KANG Chongqing, LU Xun, et al. Demonstration on the scale of energy storage deployment in high-proportion new energy power system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 3-11.

[7] 梁 双，严 超，厉 瑜，等. 电力系统应对极端天气自然灾害存在的薄弱环节及对策建议[J]. 中国工程咨询，2022(9)：27-31.
LIANG Shuang, YAN Chao, LI Yu, et al. Weak links and countermeasures for the power system to cope with extreme weather and natural disasters[J]. Chinese Engineering Consultants, 2022(9): 27-31.

[8] 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 Hui, SUN Feng, LI Tie, 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.

[9] 曹 阳，刘 巍，张一群. 风电大规模接入电网事故分析与探讨[J]. 中国电力企业管理，2020(1)：44-47.
CAO Yang, LIU Wei, ZHANG Yiqun. Analysis and exploration of

large-scale wind power grid connection accidents[J]. China Power Enterprise Management, 2020(1): 44-47.

[10] 樊　陈，姚建国，张琦兵，等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术，2020，39(4)：34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.

[11] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化，2019，43(24)：1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.

[12] 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 Huadong, XU Tao, GUO Qiang, 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 the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.

[13] 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.

[14] 赵静波，张思聪，廖诗武. 美国加州 2020 年 8 月中旬停电事故分析及思考[J]. 电力工程技术，2020，39(6)：52-57.
ZHAO Jingbo, ZHANG Sicong, LIAO Shiwu. Analysis and reflection for the rotating outages in mid-August 2020 in California[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 52-57.

[15] 王伟胜，林伟芳，何国庆，等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：4033-4042.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4042.

[16] 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)：7764-7774.
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, 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): 7764-7774.

[17] 谭显东，刘　俊，徐志成，等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力，2021，54(5)：1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.

[18] 李宝聚，齐宏伟，傅吉悦，等. 极端气象天气对新能源运行影响分析[J]. 吉林电力，2022，50(1)：10-13.
LI Baoju, QI Hongwei, FU Jiyue, et al. Analysis on the impact of extreme weather on new energy operation[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(1): 10-13.

[19] 国网宣传部，国网湖南、江西、浙江电力. 国家电网全力应对寒潮影响　确保供电安全可靠[N]. 国家电网报，2020-12-16.
State Grid Propaganda Department, Hunan, JIangxi and Zhejiang Power Network. State Grid of China is fully responding to the impact of cold waves to ensure safe and reliable power supply[N]. State Grid News, 2020-12-16.

[20] 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 Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[21] 鲁宗相，林弋莎，乔　颖，等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化，2022，46(16)：3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.

[22] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[23] 辛保安，单葆国，李琼慧，等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3117-3125.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125.

[24] 肖先勇，郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统：贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术，2022，54(1)：47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.

[25] 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.

[26] 张晋芳，元　博. “十四五”电力系统灵活性资源供需平衡分析[J]. 中国电力企业管理，2020(19)：36-38.
ZHANG Jinfang, YUAN Bo. Analysis of the supply-demand balance of flexible resources in the power system during the 14th five year plan period[J]. China Power Enterprise Management, 2020(19): 36-38.

[27] HOLTTINEN H, TUOHY A, MILLIGAN M, et al. The flexibility workout: managing variable resources and assessing the need for power system modification[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(6): 53-62.

[28] 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.

[29] 肖定垚，王承民，曾平良，等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术，2014，38(6)：1569-1576.
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576.

[30] 林芝羽，李华强，苏韵掣，等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(5)：46-57.
LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.

[31] 游广增，汤翔鹰，胡　炎，等. 基于典型运行场景聚类的电力系统灵活性评估方法[J]. 上海交通大学学报，2021，55(7)：802-813.

YOU Guangzeng, TANG Xiangying, HU Yan, et al. Flexibility evaluation method for power system based on clustering of typical operating scenarios[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(7): 802-813.

[32] 刘 纯，屈姬贤，石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报，2020，40(10)：3134-3143.
LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134-3143.

[33] 杨 策，孙伟卿，韩 冬. 考虑新能源消纳能力的电力系统灵活性评估方法[J]. 电网技术，2023，47(1)：338-346.
YANG Ce, SUN Weiqing, HAN Dong. Power system flexibility evaluation considering renewable energy accommodation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 338-346.

[34] 刘万宇，李华强，张弘历，等. 考虑灵活性供需平衡的输电网扩展规划[J]. 电力系统自动化，2018，42(5)：56-63.
LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, et al. Expansion planning of transmission grid based on coordination of flexible power supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 56-63.

[35] 杨修宇，穆 钢，柴国峰，等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. 电网技术，2020，44(9)：3238-3245.
YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, et al. Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3238-3245.

[36] 杨 珺，李凤婷，张高航. 考虑灵活性需求的新能源高渗透系统规划方法[J]. 电网技术，2022，46(6)：2171-2181.
YANG Jun, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Power system planning method with high new energy penetration considering flexibility requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2171-2181.

[37] 谢忠华，叶俨毅，刘 俊，等. 基于供需弹性和储能的风能优化调度方法研究[J]. 能源与环保，2021，43(11)：177-181.
XIE Zhonghua, YE Yanyi, LIU Jun, et al. Research on optimal dispatching method of wind energy based on elasticity of supply and demand and energy storage[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(11): 177-181.

[38] 吴克河，王继业，李 为，等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(4)：966-978.
WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-978.

[39] 鲁宗相，李 昊，乔 颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网，2021，4(1)：12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18.

[40] 卓振宇，张 宁，谢小荣，等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[41] 田世明，栾文鹏，张东霞，等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.

[42] 辛保安，陈 梅，赵 鹏，等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：6919-6930.
XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930.

[43] 李剑辉，李 力，高 超，等. 电力系统充裕度评估分析系统的构建与实现[J]. 电力系统及其自动化学报，2013，25(5)：13-21.
LI Jianhui, LI Li, GAO Chao, et al. Construction and development of software package for power system adequacy assessment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 13-21.

[44] FRERIS L, INFIELD D. Renewable energy in power systems[M]. Chichester, UK: Wiley, 2008.

[45] ULBIG A, ANDERSSON G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[C] // Proceedings of 2014 Power Systems Computation Conference. Wroclaw, Poland: IEEE, 2014: 1-8.

[46] 张振宇，王文倬，王智伟，等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化，2019，43(11)：174-180.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, WANG Zhiwei, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 174-180.

[47] 刘新苗，卢 洵，娄源媛，等. 基于时序运行模拟的风火打捆最优容量配比整定[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(21)：53-62.
LIU Xinmiao, LU Xun, LOU Yuanyuan, et al. Optimal setting of wind-thermal-bundled capacity ratio based on chronological operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 53-62.

[48] 张 显，史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化，2020，44(16)：1-11.
ZHANG Xian, SHI Lianjun. Future research areas and key technologies of electricity market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 1-11.

[49] 夏 清，王少军，相年德，等. 时序负荷曲线下电力系统概率性水电生产模拟[J]. 中国电机工程学报，1998，18(6)：429-433.
XIA Qing, WANG Shaojun, XIANG Niande, et al. Hydro station's probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 429-433.

[50] 朱 睿，胡 博，谢开贵，等. 含风电−光伏−光热−水电−火电−储能的多能源电力系统时序随机生产模拟[J]. 电网技术，2020，44(9)：3246-3253.
ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Sequential probabilistic production simulation of multi-energy power system with wind power, photovoltaics, concentrated solar power, cascading hydro power, thermal power and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3246-3253.

[51] 吕 泉，张佳伟，张 娜，等. 含多元灵活性资源的省级电−热综合能源系统耦合平衡分析模型[J]. 电力系统自动化，2022，46(16)：95-102.
LÜ Quan, ZHANG Jiawei, ZHANG Na, et al. Coupling balance analysis model of provincial integrated electricity-heat energy system with multi-type flexibility resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 95-102.

[52] 童宇轩，胡俊杰，刘雪涛，等. 新能源电力系统供需灵活性量化及分布鲁棒优化调度[J/OL]. 电力系统自动化，2023：1-18 [2023-02-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP. 20230203. 1325.004. html.
TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of supply and demand flexibility and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy-dominated power systems[J/OL]. Automation of

Electric Power Systems, 2023: 1-18[2023-02-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230203.1325.004.html.

[53] 史　喆，梁　毅，李　华，等. 计及灵活性多目标电−热−交通综合能源系统区间优化运行[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(21)：33-42.
SHI Zhe, LIANG Yi, LI Hua, et al. Interval optimal operation of a multi-objective electric-thermal-transportation integrated energy system considering flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 33-42.

[54] 黄旭祥，韩学山，李家维，等. 大电网储能与各类电源协同规划[J]. 分布式能源，2019，4(5)：67-74.
HUANG Xuxiang, HAN Xueshan, LI Jiawei, et al. Coordinated planning of energy storage and various power sources in large power grid[J]. Distributed Energy, 2019, 4(5): 67-74.

[55] 姜海洋，杜尔顺，金　晨，等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2101-2114.
JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101-2114.

[56] 鉴庆之，刘晓明，杨金叶，等. 考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置[J]. 现代电力，2021，38(3)：286-296.
JIAN Qingzhi, LIU Xiaoming, YANG Jinye, et al. Optimal allocation of power system flexible resources considering demand response[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(3): 286-296.

[57] 蔡文斌，程晓磊，南家楠，等. 高比例新能源电力系统灵活性资源充裕性评估分析[J]. 电气传动，2022，52(20)：57-62.
CAI Wenbin, CHENG Xiaolei, NAN Jia'nan, et al. Assessment and analysis of adequacy of flexibility resource of power system with high proportion new energy[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 57-62.

[58] 周光东，周　明，孙黎滢，等. 含波动性电源的电力系统运行灵活性评价方法研究[J]. 电网技术，2019，43(6)：2139-2146.
ZHOU Guangdong, ZHOU Ming, SUN Liying, et al. Research on operational flexibility evaluation approach of power system with variable sources[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2139-2146.

[59] 赵晶晶，朱炯达，李振坤，等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. 电力系统自动化，2022，46(16)：61-71.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 61-71.

[60] 叶　畅，伊华茂，朱炯达，等. 考虑灵活性供需平衡及响应速度的分布式电源集群划分方法[J]. 中国电力，2023，56(2)：150-156.
YE Chang, YI Huamao, ZHU Jiongda, et al. A cluster partition method for distributed generation considering flexibility supply-demand balance and response speed[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 150-156.

[61] 鞠冠章，王靖然，崔　琛，等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J]. 智慧电力，2022，50(11)：77-83.
JU Guanzhang, WANG Jingran, CUI Chen, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 77-83.

[62] 周波涛，钱　进. IPCC AR6 报告解读：极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展，2021，17(6)：713-718.
ZHOU Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.

[63] 李崇银，杨　辉，赵晶晶. 大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生[J]. 大气科学学报，2019，42(3)：321-333.
LI Chongyin, YANG Hui, ZHAO Jingjing. Combinational anomalies of atmospheric circulation system and occurrences of extreme weather/climate events[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(3): 321-333.

[64] 孙　劭. 我国极端天气气候事件发生规律、特点及影响[J]. 中国减灾，2021(15)：8-17.
SUN Shao. The occurrence law characteristics and impact of extreme weather and climate events in China[J]. Disaster Reduction in China, 2021(15): 8-17.

[65] 吴大明. 近年来全球极端天气气候事件情况及影响分析[J]. 中国减灾，2021(15)：22-25.
WU Daming. Analysis of global extreme weather and climate events and their impacts in recent years[J]. Disaster Reduction in China, 2021(15): 22-25.

[66] 钟海旺，张广伦，程　通，等. 美国得州 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 Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, 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.

[67] 严道波，文劲宇，杜　治，等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(9)：121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.

[68] 张勇军，许　亮，吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(15)：12-17.
ZHANG Yongjun, XU Liang, WU Chengwen. Research on ice disaster risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 12-17.

[69] LI G F, ZHANG P, LUH P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U.S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.

[70] 赵明智，吴丽玲，王　帅，等. 沙漠沙尘对光伏组件输出性能影响实验研究[J]. 热科学与技术，2021，20(4)：340-347.
ZHAO Mingzhi, WU Liling, WANG Shuai, et al. Experimental study on the effect of wind-sand in desert on the output performance of photovoltaic modules[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(4): 340-347.

[71] 张　璐，宋桂英，范　凡，等. 2021 年 3 月 14-16 日中国北方地区沙尘暴天气过程诊断及沙尘污染输送分析[J]. 环境科学学报，2022，42(9)：351-363.
ZHANG Lu, SONG Guiying, FAN Fan, et al. Diagnosis of sandstorm weather process and analysis of sand pollution transportation in northern china from 14th to 16th, March 2021[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(9): 351-363.

[72] 王　宁，陈　健，张缘园，等. 2021 年中国北方首次沙尘天气的多源遥感分析[J]. 中国环境科学，2022，42(5)：2002-2014.
WANG Ning, CHEN Jian, ZHANG Yuanyuan, et al. Multi-source remote sensing analysis of the first sand and dust weather in northern China in 2021[J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2002-2014.

[73] 贺海磊，郭剑波. 考虑共因失效的电力系统地震灾害风险评估[J]. 中国电机工程学报，2012，32(28)：44-54.
HE Hailei, GUO Jianbo. Seismic disaster risk evaluation for power systems considering common cause failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 44-54.

[74] 吴伟丽，刘连光，王开让. 磁暴扰动下电力系统故障风险评估方法

与模型[J]. 中国电机工程学报，2015，35(4)：830-839.
WU Weili, LIU Lianguang, WANG Kairang. Risk assessment methods and models of power system fault due to geomagnetic disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 830-839.

[75] JING R, WANG X N, ZHAO Y R, et al. Planning urban energy systems adapting to extreme weather[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 3: 100053.

[76] BENNETT J A, TREVISAN C N, DECAROLIS J F, et al. Extending energy system modelling to include extreme weather risks and application to hurricane events in Puerto Rico[J]. Nature Energy, 2021, 6(3): 240-249.

[77] ESPINOZA O, TIWARY A. Assessment of autonomous renewable energy system operability under extreme events and disasters[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44: 100995.

[78] PERERA A T D, NIK V M, CHEN D L, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. Nature Energy, 2020, 5(2): 150-159.

[79] BAHL B, KÜMPEL A, SEELE H, et al. Time-series aggregation for synthesis problems by bounding error in the objective function[J]. Energy, 2017, 135: 900-912.

[80] STADLER M, GROISSBÖCK M, CARDOSO G, et al. Optimizing distributed energy resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel[J]. Applied Energy, 2014, 132: 557-567.

[81] YEGANEFAR A, AMIN-NASERI M R, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Improvement of representative days selection in power system planning by incorporating the extreme days of the net load to take account of the variability and intermittency of renewable resources[J]. Applied Energy, 2020, 272: 115224.

[82] KOTZUR L, MARKEWITZ P, ROBINIUS M, et al. Impact of different time series aggregation methods on optimal energy system design[J]. Renewable Energy, 2018, 117: 474-487.

[83] 黎静华. 风电功率特性分析与场景预测[M]. 北京：科学出版社，2021.
LI Jinghua. Feature analysis and scenario forecasting of wind power[M]. Beijing, China: Science Press, 2021.

[84] CATALAO J P S, POUSINHO H M I, MENDES V M F. Optimal offering strategies for wind power producers considering uncertainty and risk[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(2): 270-277.

[85] 黎静华，谢育天，曾鸿宇，等. 不确定优化调度研究综述及其在新型电力系统中的应用探讨[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3447-3464.
LI Jinghua, XIE Yutian, ZENG Hongyu, et al. Research review of uncertain optimal scheduling and its application in new-type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3447-3464.

[86] 卫志农，裴　蕾，陈　胜，等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.

[87] 朱俊澎，施凯杰，李　强，等. 考虑输电网潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. 电网技术，2022，46(5)：1947-1955.
ZHU Junpeng, SHI Kaijie, LI Qiang, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation capacity evaluation considering transmission network power flow constraints[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1947-1955.

[88] ARRITT R F, DUGAN R C. Value of sequential-time simulations in distribution planning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 4216-4220.

[89] 刘　纯，曹　阳，黄越辉，等. 基于时序仿真的风电年度计划制定方法[J]. 电力系统自动化，2014，38(11)：13-19.
LIU Chun, CAO Yang, HUANG Yuehui, et al. An annual wind power planning method based on time sequential simulations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 13-19.

[90] 左立光，刘洲洲，彭　旭. 基于时序生产模拟的电网新能源跨区域消纳评估[J]. 能源与节能，2022(11)：33-35，39.
ZUO Liguang, LIU Zhouzhou, PENG Xu. Evaluation of cross-regional new energy consumption in power grid based on timing production simulation[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(11): 33-35, 39.

[91] BEN-TAL A, EL GHAOUI L, NEMIROVSKI A. Robust optimization[M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2009.

[92] 鲁卓欣，徐潇源，严　正，等. 不确定性环境下数据驱动的电力系统优化调度方法综述[J]. 电力系统自动化，2020，44(21)：172-183.
LU Zhuoxin, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Overview on data-driven optimal scheduling methods of power system in uncertain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 172-183.

[93] WIESEMANN W, KUHN D, SIM M. Distributionally robust convex optimization[J]. Operations Research, 2014, 62(6): 1358-1376.

[94] 于宗超，刘　绚，严　康，等. 考虑 DLR 和风电预测不确定性的机会约束机组组合模型[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1204-1213.
YU Zongchao, LIU Xuan, YAN Kang, et al. Combination model of chance-constrained security constraint unit with considering the forecast uncertainties of DLR and wind power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1204-1213.

[95] 马汀山，王　妍，吕　凯，等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报，2022，42(S1)：136-148.
MA Tingshan, WANG Yan, LÜ Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 136-148.

[96] 杨寅平，曾　沅，秦　超，等. 面向深度调峰的火电机组灵活性改造规划模型[J]. 电力系统自动化，2021，45(17)：79-88.
YANG Yinping, ZENG Yuan, QIN Chao, et al. Planning model for flexibility reformation of thermal power units for deep peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 79-88.

[97] 潘尔生，田雪沁，徐　彤，等. 火电灵活性改造的现状、关键问题与发展前景[J]. 电力建设，2020，41(9)：58-68.
PAN Ersheng, TIAN Xueqin, XU Tong, et al. Status, critical problems and prospects of flexibility retrofit of thermal power in China[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 58-68.

[98] 徐　浩，李华强. 火电机组灵活性改造规划及运行综合随机优化模型[J]. 电网技术，2020，44(12)：4626-4635.
XU Hao, LI Huaqiang. Planning and operation stochastic optimization model of power systems considering the flexibility reformation[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4626-4635.

[99] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报，2015，30(15)：1-14.
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14.

[100] 朱介北，周小尧，曾平良，等. 英国交直流输电网规划方法及对中国电网规划的启示[J]. 全球能源互联网，2020，3(1)：59-69.
ZHU Jiebei, ZHOU Xiaoyao, ZENG Pingliang, et al. Great Britain’s transmission grid planning method and its enlightenment to China’s grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1):

59-69.

[101] 焦瑞浩，丁　剑，任建文，等. 适应大规模清洁能源并网和传输的未来新型直流电网研究[J]. 智慧电力，2019，47(6)：9-18.
JIAO Ruihao, DING Jian, REN Jianwen, et al. Future new DC power grids for large-scale clean energy integration and transmission[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 9-18.

[102] 孙宇军，王　岩，王蓓蓓，等. 考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(2)：106-113，159.
SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 106-113, 159.

[103] 秦子恺，黄婧杰，周任军，等. 计及源−荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报，2022：1-9 [2022-09-28]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001108.
QIN Zikai, HUANG Jingjie, ZHOU Renjun, et al. Virtual power plant considering source-load uncertainty multi-objective robust optimization scheduling[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022: 1-9 [2022-09-28]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001108.

[104] 卢　洵，张东辉，周姝灿，等. 复杂交直流电网系统级新型储能协调规划布局方法[J/OL]. 南方电网技术，2023：1-11[2023-02-22]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/44.1643.tk.20230202.1705.007.html.
LU Xun, ZHANG Donghui, ZHOU Shucan, et al. A new coordinated planning layout method at the system level of energy storage for complex AC/DC power grids[J/OL]. Southern Power System Technology, 2023: 1-11[2023-02-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20230202.1705.007. html.

[105] 龚贤夫，卢　洵，刘新苗，等. 缓解网络阻塞的储能规划优化方法[J]. 南方电网技术，2022，16(4)：12-20.
GONG Xianfu, LU Xun, LIU Xinmiao, et al. Optimization method of energy storage planning for alleviating network congestion[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 12-20.

[106] 彭　穗，龚贤夫，刘新苗，等. 计及直流调节能力的含风电电力系统储能优化配置[J]. 中国电力，2022，55(1)：37-45.
PENG Sui, GONG Xianfu, LIU Xinmiao, et al. Optimized energy storage configuration of wind power integrated power system considering DC regulation capacity[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 37-45.

[107] 余潇潇，宋福龙，李　雋，等. 含高比例新能源电力系统极端天气条件下供电安全性的提升[J/OL]. 现代电力，2023：1-11[2023-02-22]. https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, LI Jun, et al. Power supply security improvement of power grid with high proportion of renewable energy under extreme weather events[J/OL]. Modern Electric Power, 2023: 1-11[2023-02-22]. https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.

[108] 杨水丽，来小康，丁　涛，等. 新型储能技术在弹性电网中的应用与展望[J]. 储能科学与技术，2023，12(2)：515-528.
YANG Shuili, LAI Xiaokang, DING Tao, et al. Application and prospect of new energy storage technologies in resilient power systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 515-528.

[109] 陈鸿琳，刘新苗，余　浩，等. 基于近似动态规划的海上风电制氢微网实时能量管理策略[J]. 电力建设，2022，43(12)：94-102.
CHEN Honglin, LIU Xinmiao, YU Hao, et al. Real-time energy management strategy based on approximate dynamic programming for offshore wind power-to-hydrogen microgrid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 94-102.

[110] 靳晶新，叶　林，陆佳政，等. 融合多维气象信息的风能资源评估方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：477-487.
JIN Jingxin, YE Lin, LU Jiazheng, et al. Combined method for wind energy resource assessment considering multi-dimensional meteorological information[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 477-487.

[111] 蒋建东，孙书凯，董　存，等. 风电中长期电量预测研究现状[J]. 高电压技术，2022，48(2)：409-419.
JIANG Jiandong, SUN Shukai, DONG Cun, et al. Research status of mid-long term wind power generation forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 409-419.

[112] 高　博，茆　超，张冲标，等. 基于时空图网络的分布式光伏发电出力预测[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(3)：125-133.
GAO Bo, MAO Chao, ZHANG Chongbiao, et al. Output prediction of distributed photovoltaic power generation based on spatial-temporal graph neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 125-133.

[113] 牛东晓，纪会争. 风电功率物理预测模型引入误差量化分析方法[J]. 电力系统自动化，2020，44(8)：57-65.
NIU Dongxiao, JI Huizheng. Quantitative analysis method for errors introduced by physical prediction model of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 57-65.

[114] 潘　霄，张明理，刘德宝，等. 基于鲁棒多标签生成对抗的风电场日前出力区间预测[J]. 电力系统自动化，2022，46(10)：216-223.
PAN Xiao, ZHANG Mingli, LIU Debao, et al. Interval prediction of wind farm day-ahead output based on robust multi-label generative adversarialt[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 216-223.

[115] 朱继忠，董瀚江，李盛林，等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. 中国电机工程学报，2021，41(23)：7905-7923.
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7905-7923.

[116] 韩　亮，张维静，胡娱欧，等. 考虑虚拟电厂的电力系统灵活性提升方案研究[J]. 电力需求侧管理，2022，24(4)：14-20.
HAN Liang, ZHANG Weijing, HU Yuou, et al. Power system flexibility improvement scheme considering virtual power plant[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 14-20.

[117] 卫　璇，潘昭光，王　彬，等. 云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望[J]. 全球能源互联网，2020，3(6)：539-551.
WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 539-551.

[118] 黄远明，张玉欣，夏赞阳，等. 考虑需求响应资源和储能容量价值的新型电力系统电源规划方法[J]. 上海交通大学学报，2023，57(4)：432-441.
HUANG Yuanming, ZHANG Yuxin, XIA Zanyang, et al. Power system planning considering demand response resources and capacity value of energy storage[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 432-441.

[119] 曾　鸣，杨雍琦，李源非，等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报，2016，36(3)：681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.

[120] 刘小龙，李欣然，刘志谱，等. 基于负荷重要性和源−荷互补性的离网系统终端电/热/冷负荷投切策略[J]. 电工技术学报，2021，36(3)：552-564.

LIU Xiaolong, LI Xinran, LIU Zhipu, et al. Research on power/heating/cooling load switching strategy of off-grid system based on load importance and source load complementarity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 552-564.

[121] 齐　宁，程　林，田立亭，等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化，2020，44(10)：193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.

[122] 游大宁，刘航航，鲍冠南，等. 源网荷储多元协同调度体系研究与实践[J]. 浙江电力，2021，40(12)：20-26.
YOU Daning, LIU Hanghang, BAO Guannan, et al. Research and practice on the multiple collaborative scheduling system of source-grid-load-storage[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(12): 20-26.

[123] SU W C, HUANG A Q. A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers[J]. Applied Energy, 2014, 119: 341-350.

[124] ZHOU K L, YANG S L, SHAO Z. Energy internet: the business perspective[J]. Applied Energy, 2016, 178: 212-222.

[125] 杨东升，王道浩，周博文，等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术，2019，40(2)：107-114.
YANG Dongsheng, WANG Daohao, ZHOU Bowen, et al. Key technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.

[126] 康重庆，陈启鑫，苏　剑，等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.

[127] 尚　楠，陈　政，卢治霖，等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术，2023，47(1)：142-154.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 142-154.



刘俊磊
1985—，男，博士，高工
主要从事电力系统规划运行与稳定分析方面的研究
E-mail: 18802000394@163.com

LIU Junlei
Ph.D.
Senior engineer



张东辉(通信作者)
1984—，男，硕士，教授级高工
主要从事交直流系统规划、运行方式及软件开发方面的研究
E-mail: zhangdh_energy@163.com

ZHANG Donghui
Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-02-23　修回日期　2023-05-24　　编辑　程子丰