第 49 卷 第 7 期：2683-2696 高电压技术 Vol.49, No.7: 2683-2696
2023 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221888

新型电力系统电力电量平衡分析研究综述

高红均，郭明浩，刘挺坚，刘俊勇
（四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：在“双碳目标”的背景下，我国对于新能源的利用得到长足发展，构建适应新能源占比逐渐提高的新型电力系统成为首要目标。风光电源出力的强波动性与不确定性的特点，给电力系统电力电量平衡带来全新的“保供难”与“消纳难”挑战，传统电力电量平衡分析模式与方法难以适应新能源占比不断提高的新型电力系统应用。为此，面向新能源占比不断提高的新型电力系统提出电力电量供需平衡分析体系。首先，分析了新型电力系统中源、网、荷以及平衡资源各环节的多重不确定性因素；其次，探讨新能源占比不断提高的新型电力系统中电力电量平衡的计算方法；进一步，归纳新型电力系统电力电量平衡的分析方法与供需失衡风险预警模式；最后，对新型电力系统电力电量平衡分析能力提升的措施与建议进行展望，力争为未来新型电力系统规划、运行与仿真分析提供思路。

关键词：新能源占比不断提高；新型电力系统；电力电量平衡分析；平衡资源；失衡预警

Review on Electric Power and Energy Balance Analysis of New-generation Power System

GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, LIU Junyong
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Under the background of “carbon peak and carbon neutralization target”, the utilization of new energy in China has made great progress, and the construction of a new-generation power system that adapts to the increasing proportion of new energy has become the primary goal. The characteristics of strong volatility and uncertainty of wind and solar power output bring new challenges of “difficult supply” and “difficult consumption” to the electric power and energy balance of the power system. The traditional power balance analysis model and method are difficult to adapt to the new-generation power system application with the increasing proportion of new energy. Therefore, this paper proposes a power and energy supply and demand balance analysis system for the new-generation power system with an increasing proportion of new energy. Firstly, the multiple uncertain factors of source, network, load, and balance resources in the new-generation power system are analyzed. Secondly, the calculation method of power and energy balance in the new-generation power system with the increasing proportion of new energy is discussed. Furthermore, the analysis method of power and energy balance and the risk early warning mode of supply and demand imbalance in new-generation power systems are summarized. Finally, the measures and suggestions for improving the power and energy balance analysis ability of the new-generation power system are put forward so as to provide ideas for the planning, operation, and simulation analysis of the new-generation power system in the future.

Key words: increasing proportion of new energy; new-generation power system; electric power and energy balance analysis; balance resources; imbalance warning

0　引言

近年来，全球气候问题、能源低碳发展引起了越来越多的关注[1]，我国也于 2020 年提出“3060 碳达峰碳中和”目标[2]，促使电力行业向低碳、可持续发展转型，特别是构建适应新能源占比不断提高的新型电力系统[3]。截至 2022 年初，我国新能源年度发电量突破 10 000 亿 kWh，其中风光发电量占比超 86%，占全国总发电量 9.25%[4]。到 2030 年风光机组总装机容量将达到 12 亿 kW 以上，新能源发电装机规模将超过煤电成为第 1 大电源[5]。

在不同的新能源发展阶段，电力系统电力电量平衡表现出不同的特点。目前，对于新能源低/中/高占比定义还未出现行业标准。有研究指出新能源

基金资助项目：国家重点研发计划(支撑 20%新能源电量占比场景下的电网智能调度关键技术)(2022YFB2403400)。
Project supported by National Key R&D Program of China(Key Technologies on Intelligent Dispatch of Power Grid Under 20% New Energy Integration Scenario)(2022YFB2403400).

占比可定义为新能源发电量与总发电量的比值[6-9]，在实际中往往送端电网的新能源装机规模较大，比如西北电网等，送端电网通过特高压外送通道对受端电网进行远距离送电，本质上受端电网对高占比新能源的波动性和不确定性进行了一定的平抑，故在探讨新能源高占比时需注意系统本地自平衡(新能源本地消纳)与大范围平衡的差异。例如，2021年甘肃电网总发电量1940亿kWh，新能源发电量446亿kWh，外送电量517亿kWh，其中外送新能源占比50%，大范围平衡(含外送)新能源占比为23%，而如果只考虑新能源本地消纳，电量占比只有13.2%，在此占比形式下甘肃电网仍然面临了电力电量平衡挑战。为一般性、普适性分析，本文涉及的新能源低/中/高占比电力系统中的新能源占比是指风/光新能源参与本地供电(本地消纳)的电量占比。虽然尚未有标准或文献给出低/中/高占比的实际数字，本文结合实际工程项目经验，初步将新能源本地消纳电量<10%的系统定义为新能源低占比电力系统；10%≤新能源本地消纳电量<25%的系统定义为新能源中占比电力系统；25%≤新能源本地消纳电量<40%的系统定义为新能源中高占比电力系统；新能源本地消纳电量≥40%的系统定义为新能源中极高占比电力系统。

风光资源“靠天吃饭”的特点导致出力不确定性与波动性。新能源低占比系统由于火电等常规机组配置充足，仅通过调节常规机组出力就可直接平抑新能源带来的波动和不确定性[10]。而对于新能源中等占比系统，风光电源代替部分常规电源，导致源荷两侧出现不匹配现象造成电力缺口，或偶尔出现新能源电量冗余，但伴随储能设备或负荷侧调节资源的兴起并加以利用可有效保障系统电力电量平衡[11]。不同于二者，新能源高占比(甚至极高占比)下的新型电力系统暴露出更加突出的电力电量平衡新问题：(1)弃电(弃风、弃光)；(2)缺电(电能短缺)；(3)弃电缺电同时出现；(4)弃电缺电交织出现。上述问题对高占比系统经济性、发电清洁性与供电可靠性造成严重影响，使得电力电量平衡问题变得复杂、繁琐，也意味着传统的电力电量平衡分析方法不适用于此，亟需一类精准、高效的电力电量平衡分析方法指导“保供”与“消纳”。同时，配套的新型电力系统电力电量供需失衡风险预警技术也需要被关注。

综合上述分析，本文立足于新能源占比不断提高的新型电力系统电力电量供需视角，对当下存在的相关问题与技术手段进行回溯，并对提高未来电力系统电力电量分析能力关键内容进行前瞻。首先，分析新型电力系统各环节多重不确定特性，包括电源侧、负荷侧、电网侧以及平衡资源部分；其次，探讨多重不确定因素对电力系统造成的影响及其表征方式与系统中平衡资源供需水平的评估计算方法；进而，对含有多重不确定性因素的新型电力系统电力电量平衡问题进行分析，同时考虑智能分级预警技术在供需平衡风险预警场景中的应用；最后，分别从加强多重不确定因素表征、提升平衡资源多时态感知、深化不确定因素融合仿真3方面对提升新型电力系统电力电量平衡分析能力的关键措施进行展望。

1 新型电力系统中的不确性分析

新能源占比不断提高的新型电力系统除“源网荷”各环节普遍具有的不确定因素外，互联传输通道的传输容量与系统平衡资源将呈现出更复杂的不确定问题。为此，本节对新型电力系统中新能源电源出力、多元负荷需求、互联传输容量、平衡资源供给中的不确定特性进行分析，具体内容如图1所示。

1.1 新能源电源出力不确定性

1）新能源中长期出力不确定性。2030年新能源出力占系统总负荷之比为5%~51%，2060年新能源出力占系统总负荷之比为16%~142%[12]。此外，新能源电源发电量还呈现出季节性特点[13]，譬如风电在大小风期产能不同；光伏发电在春秋两季发电量较夏冬两季增多。

2）新能源短期出力不确定性。2019年，国家电网公司经营区内，新能源日最大功率波动达1.07亿kW，占其装机的31%，预估2050年新能源日最



图1 新型电力系统中多重不确定特性

Fig.1 Multiple uncertainties in new-generation power system

大功率将超过 10 亿 kW[14]；西北电网新能源相邻日的高峰出力相差可达 2000 万 kW，15 min 波动可达 400 万 kW[15]。新能源低出力时段，电力系统需要一定容量的灵活性资源实现电力平衡；新能源高出力时段则需要系统具有高效消纳手段，实现发电低碳与清洁。

3）新能源出力空间不确定性。以风电为例，风电场占地较为广阔，风机装机位置存在差异，同一厂址的不同风机可能在相同自然条件下出力不同，或存在发电互补情况即空间平滑效应，使得风电场总出力难以预计。随着新能源电源发展规模加快，此类现象将更加突出，因此电源空间维度特性也成为新能源占比不断提高的新型电力系统中电源侧的一类不确定因素。

4）极端天气频次增多。近年来全球变暖导致高温、极寒等极端天气频发，2020 年 8 月，美国加州经历严重高温天气，导致降温负荷急剧上升，风电、水电出力大幅度下降，最终发生大规模电力轮停事故[16]；2021 年 2 月，美国德州遭遇极寒天气，低温导致采暖负荷急剧上升，风机因叶片结冰停运，天然气因井口冻结等产量降低，影响燃气轮机运行，最终出现电力供需缺口造成保供危机[17]。特别地，在某些极端场景中极端条件对于系统的作用机制还会出现“演化、升级”，使得不确性进一步增强，如 2022 年 8 月我国四川地区在极端高温干旱天气条件中表现出随时间推移导致高峰时电力“短缺”向全天候电力电量“双缺”演变。

1.2 多元负荷需求的不确定性

多元新型负荷叠加使得需求侧不确定性进一步增强。随着经济发展与低碳化进程加快，电能替代传统能源趋势愈发明显，到 2025 年，电能占终端能源消费比重达到 30%[18]。其中，电动汽车、电热工业设备、农业电气化机械等一系列新型负荷出现在电力系统负荷侧，实现节能减排的同时也带来了新一轮的不确定因素，例如电动汽车充电频次与充电时机无法预测；电热工业设备受生产计划限制导致启停不确定；农业电力需求与季节性相关等。

1.3 互联传输容量的不确定性

跨区/省电网互联通道存在传输容量不确定性。由互联系统输电通道可用传输容量(available transfer capability，ATC)以及极限传输容量(total transfer capability，TTC)[19]定义可知：随着电网规模的增大，传输容量受电力系统基础状态的影响更加明显，系统基础状态包括输电网物理结构、电源侧机组组合情况、负荷侧电力需求大小以及系统受扰动情况等[20]，前者受输电通道规划、扩建计划制约，而后 3 者均直接或间接受新能源不确定性影响表现出传输容量不确定。此外，新能源的大规模接入还导致其接口出现大量电力电子装备，对电力系统的动态稳定特性造成影响[21]，若长期工作在高频、高负荷的状态也会提高电网故障发生率，对电能传输造成影响。

1.4 平衡资源供给的不确定性

平衡资源广泛存在于电力系统“源网荷储”各部分，如灵活性电源(火电机组、各类储能设备/机组)、互联互济电网、柔性负荷等可参与系统电力电量平衡调控的资源均为平衡资源。本节重点从电源侧的火电机组与负荷侧柔性负荷来阐述平衡资源的不确定性。

1）灵活性火电机组燃料供应链不稳定。火力发电作为重要灵活性电源起到高效的电力电量供需平衡调节作用，在理想状态下仅由自身发电灵活指标(爬坡能力、出力范围、能级连续度)决定所能提供的平衡资源[22]，但实际中燃料供应环节受到煤炭、天然气等一次能源市场以及国内外形式与相关政策的限制[23]。例如，2021 年 9 月，我国东北地区由于风电骤降，且一次能源价格激增导致煤炭供应出现缺口，造成大规模限电事件[24]。因此由燃料供应链主导的机组出力不稳定成为平衡资源中多重不确定性的一环。

2）负荷侧平衡资源不确定。随着电能消费品类复杂化发展，一批以电动汽车、温控负荷为代表的可调控负荷作为重要需求侧平衡资源参与到系统电力电量平衡调节中，这也表示传统的负荷侧刚性平衡资源向柔性平衡资源转型，由于部分资源受需求响应补贴、用户意愿、电力市场等因素发生改变或转移[25-26]，使得负荷侧平衡资源也变得不确定，如工业用户往往在需求响应中充当可中断负荷，其响应能力一般以合约制进行定夺，若涉及有序用电后的补贴与损失差距较大则可能导致实际与计划响应电量出现偏差，同时也反映出辅助服务市场对于负荷侧的影响会造成一定的不确性因素。

1.5 不确定因素对电力电量平衡的影响

风光电源出力的间歇性、负荷变化的波动性等不确定性因素将直接影响常规机组启停计划、生产计划，为保证高占比系统稳定运行、安全生产还需

要留有高额的备用容量，进而导致成本的高度非线性增长[27]，影响电力系统经济性；源–网–荷各环节的不确定因素叠加可能引发电源出力与负荷电力需求错匹，即电力电量供需失衡。其中，若新能源出力过高且消纳空间不足，会导致弃风弃光(弃电)现象发生，降低新能源利用率，影响发电清洁性[28]。若新能源出力小于负荷需求，且可控的电源或能够参与需求响应(demand response，DR)的用户调节能力不足，则将导致电源侧出现电力缺口(缺电)，背离电力系统供电可靠性要求[29]。除上述弃电、缺电的现象，可能还会产生弃电缺电同时出现以及弃电缺电交织出现的问题，其原因都是净负荷曲线剧烈波动忽小忽大导致电力电量平衡调控难度升级，且均会对电力系统经济性、发电清洁性以及供电可靠性造成影响。

2 新型电力系统电力电量平衡计算方法

如何准确计算含有多重不确定因素的新型电力系统电力电量平衡是实现系统规划与运行的核心。本节基于前文中对多重不确定因素的特性与影响分析探讨其表征方法，总结电力电量平衡的计算方法并提出部分问题的研究思路。

2.1 多重不确定性因素的表征方法

无论是在规划阶段还是运行阶段，对不确定性因素建模进行表征都是电力电量供需平衡计算与评估的基础。为在新能源逐渐提高占比的新型电力系统中开展电力电量平衡计算，针对多重不确定性因素叠加进行表征成为核心内容。对于不确定因素的刻画一般采用概率分布统计法[30]或场景波动模拟法[31]，在电力系统中多数研究利用概率分布分析的方法，提供未来时刻的不确定因素波动区间或密度函数，以此进行表征[32]。利用概率分布建模方法需要考虑两类问题：(1)如何针对单个不确定因素建模；(2)如何针对多重不确定因素的耦合建模。

新能源电源理论上可视为典型的单一不确定特征变量聚合体。以风电为例，其出力决策参数主要为风速，所以可依据风速的历史数据随机生成大量场景来拟合该不确定因素的不确定性，或提取风速参数真实分布的近似分布并将真实分布假定服从于近似分布[33]，如文献[34]采用正态分布对风速特征进行建模并使用蒙特卡洛法(Monte-Carlo method)进行多时间尺度滚动预测；文献[35]直接采用威布尔分布(Weibull distribution)表示风速概率分布。随着抽样拟合次数的增多，蒙特卡洛法能够基本实现精确预测，但计算效率也同比下降。此外，在工程中新能源电源出力的决策参素除气象因素外还受地理位置、能量转换方式、电站设计、电气效率等方面的影响[36-37]，且各参数历史数据集也相对狭隘，即通过传统的概率统计方法得出的模型不具强代表性，此类现象也将随新能源占比的提高而愈发明显。

除表征单一不确定因素外，还应考虑系统中各环节存在的多重不确定性耦合问题。源荷两侧在一定条件下表现出高度相关性，如低温天气条件可能同时导致风机叶片覆冰停转出力骤降、采暖负荷飙升等。目前，对于多重不确定因素决策变量间的相关性分析方法包括线性相关系数[38]、秩相关系数[39]、Copula 函数[40]等代数方式，将这类代数方法应用于短期与极短期尺度上的耦合因素相关性分析中可取得较为理想的结果，但在中长期尺度中却难以施展，这是由于随时间推移源/荷波动频次与幅度大量增加、可供分析的场景与关联数据高度密集，采用确定性的代数运算难以在海量数据中准确描绘耦合因素的相关性。故此可以基于概率方法将传统源荷不确定因素耦合的相关性代数关系(联合分布)转变为概率分布的卷积[41]、卷差运算[42]。上述两方法对于系统仅存在两重不确定因素时具有较强的运算能力，不同于以火电为主的传统电力系统，新能源占比不断提高的新型电力系统将迎来风电出力、光伏出力、负荷出力、煤炭供应、平衡资源响应意愿等多重不确定因素的耦合聚集与叠加，显然，上述方法无法高效、精准表征多重不确定因素叠加问题。

综上，关于新型电力系统中不确定因素的表征方法如表 1 所示。近几年，人工智能逐渐兴起，广泛应用于不确定因素的表征、预测领域。就风光电源出力而言，现行更多的是对短期/极短期的功率点进行预测[43-45]，主要支撑日前/日内的电力电量平衡。为全方位实现多时间尺度电力电量平衡，需补足现行方法的多重不确定性因素表征短板。基于上述研究背景，关于此问题可从以下两方面展开研究，具体思路分别如图 2 所示。

1）自然不确定性建模

正如前文所述，目前并未出现新能源低/中/高占比的行业标准，因此对新能源占比不断提高的新型电力系统需要探究不同省级/区域级电网(特别是送端电网、受端电网)新能源电量占比与新能源装机容量占比系统的差异特征，并开展相关能源资源的

表 1 新型电力系统中不确定因素表征方法

Table 1 Characterization method of uncertain factors in new-generation power system

项目名称	单一不确定因素	多重不确定因素
代表实例	风速、太阳辐射强度等	源荷两侧不确定耦合因素、煤电联供不确定耦合因素等
表征本质	获得待表征因素的概率分布	
表征方法	抽样法/近似法	代数分析/概率运算
关键步骤	抽样法：利用蒙特卡洛法随机遍历抽样，获取不确定因素特征集合的概率分布	代数分析：通过耦合因素的相关性分析法，获取多重因素间的耦合代数关系
	近似法：将不确定因素决策参数的真实分布假定服从于近似分布	概率运算：采用卷积、卷差运算方法计算多重随机因素的联合概率分布
优点	操作方便、原理简单	表征能力强、计算效率高
缺点	难以获得完整的历史样本数据集；遍历抽样取得的结果精度与运算时长成正比；在实际问题中的代表性差	适用于仅存在两重不确定因素耦合的问题，难以表征实际中多重不确定性叠加问题

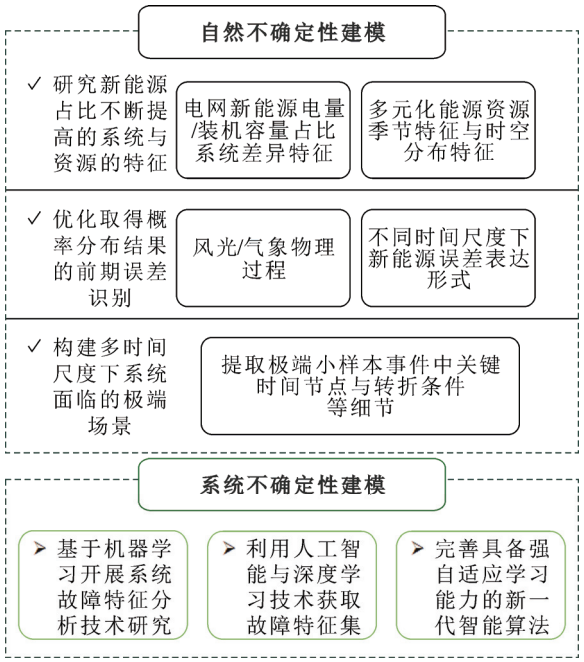


图 2 新型电力系统中不确定因素表征思路

Fig.2 Characterization ideas of uncertain factors in new-generation power system

季节/时空分布特征研究；基于以上特征结合风、光/气象物理过程，研究以系统新能源预测结果为依据的风电/光伏发电时间连续不确定误差建模方法[46]，重点厘清年–月–周–日不同时间尺度下新能源电量/电力的误差表达形式[47]，实现误差局部时间段的特征识别与分类，为取得良好的概率分布结果做好铺垫；此外，可以对融合了陡增陡降度(转折条件)[48]关键特征的新能源极端小样本事件提取方法进行研究，以此构建系统面临不同时间尺度下的新能源极端场景。

随着电力需求侧的低碳化转型，负荷不确定性成为影响电力电量平衡的主要干扰项之一。为此应重点关注不同类型负荷不确定性分布的关键影响集，如温度、疫情等，同时进一步研究基于预测结果的负荷时空不确定性建模方法以及极端场景构建技术[49]；进一步，结合源荷不确定性耦合主体的相关性度量结果，研究基于深度学习的多元新能源–负荷不确定性关联耦合刻画方法[50]；开展基于历史事件数据和主观预想场景建模方法共同驱动的年–月–周–日不同时间尺度源–荷反调峰极端场景及包络描述模式研究[51]。

2）系统不确定性建模

随着新能源占比的逐步提高，电网规模增大且结构更加复杂、系统电力电子化趋势明显，两相叠加导致电力系统敏感脆弱，且由于网络拓扑与电源结构的改变使得电力系统易发生连锁故障[52]，因此电力系统故障成为系统中不确定因素的重要一环。首先可将机器学习与概率论等分析方法结合，基于其强非线性拟合优势弱化数据缺乏与维度灾难问题、避免人为设计环节误差的累积，降低故障分析及定位误差[53]，为多元故障的特征分析进行有利铺垫；其次，基于人工智能学习经验重点感知故障相对高发问题(如燃料气井升压、天然气管道跳闸、极端场景输电线路超负荷等)，采用深度学习模型获取故障特征集；进而依据故障特征的数据统计或编码方式开展新一代人工智能研究，进行无监督学习等自适应学习算法的完善和改进，以此在数据规模庞大、故障机理复杂的系统不确定性新态势下的故障表征问题中发挥作用[54]。

2.2 电力电量供需平衡量化计算方法

新能源占比不断提高的新型电力系统电力电量平衡量化计算是模拟系统规划与运行的基础，其主要目的在于评估新型电力系统是否具备成熟的可靠运行、安全生产的能力。因新能源中/高占比下的电力系统相较于低占比系统具有更长时间尺度调节能力、平衡资源在全时间尺度可实现协同参与运行且状态相依[8]，使得不同时间尺度下的能量交互更加紧密，特别是在中长期尺度的生产计划需要格外关注。从数学角度来看，就是根据系统各环节的不

确定因素进行随机模拟计算或以典型条件构建模拟场景进行计算。

随机模拟计算主要包括时序与非时序方法[55]。时序方法具有计算结果直观、反馈信息较多的优点，但若想获取年度模拟情况，需要对全年的新能源出力时序曲线进行表征刻画，而目前的表征方法不足以支撑中长期时序曲线的有效性与准确性。此外，实现全年系统模拟评估计算量非常大，耗时较长，因此应用时序方式时，往往需要利用时间降维、空间解耦的方法压缩模拟空间[56]。若模拟过程中机组组合(unit commitment，UC)模型中存在大量机组，则需对运算过程中的技术约束进行简化处理降低运算复杂度[57]，如忽略电网拓扑结构、不考虑机组冷热启动等。而在非时序模拟过程中需要输入的数据量仅由待评估状态数决定，故此计算速度较快，且便于考虑相对细化的不确定因素，如灵活机组检修计划停运、电路故障等，不过由于全程使用概率密度函数(probability density function，PDF)与累积分布函数(cumulative distribution function，CDF)等概率方法使得最终解以解集/区间形式存在[52]，因此仅可用作大致考量，无法取得系统内设备运行状态及具体出力，且在模型计算中面临机组数量较多时的多项式计算难度也不容忽视。

典型场景模拟计算主要用于电力系统典型日运行以及中长期运行模拟研究，旨在评估系统电力电量平衡资源是否充足，但也无法完整刻画多时间尺度下的电力电量平衡状态。值得一提的是，在实际电力系统平衡资源规划、调度过程中，一般利用粗放式的生产计划制订方法最大化扩张电力电量平衡的充裕区间[58]，也就是通过统筹运行周期内最大负荷数据与可迅速投产的装机容量，以此设置一定额度的置信区间来制订相应的发电计划，保证电量全时段满足最高的电力需求。随着风光等新能源并网规模的增加，这种制订方式的经济成本逐渐升高，造成经济性与安全性之间的矛盾[59]。因此，关于如何考虑含有多重不确定因素的中长期平衡资源供需评估也成为关键问题之一。以上电力电量供需平衡量化计算方法对比如表 2 所示。

综合上述分析，随机模拟与典型场景的计算方法本质都是取得一定时间范围内系统的模拟运行结果即产能结构，但仿真过程中均存在融合多重不确定因素困难的问题，且不易处理平衡资源的响应水平。为此，本节基于新型电力系统中平衡资源参与电力电量平衡调度运行角度，提出通过量化平衡资源的供应与需求量实现系统电力电量平衡计算，以此评估使新型电力系统可靠运行时平衡资源的供需要求，具体评估思路如图 3 所示。

1）平衡资源需求评估

为弱化新型电力系统各环节的波动与随机带来的电力电量平衡压力，对于平衡资源需求的有效评估是首要步骤。可通过分析新能源、负荷、电网故障、一次能源等多重不确定因素特性及其耦合作用关系，并基于连续时间微分技术，研究不确定场景下不同时间尺度平衡能力需求量化方法，重点模拟多重不确定因素耦合极端场景下的短期(日前)各时段平衡能力需求量[60]，如备用储备、调峰储备、分钟级响应调节资源等；基于灵活性调节资源的空间属性和电网调度安全导则要求[61]，量化不同不确

表 2 新型电力系统中电力电量供需平衡计算方法

Table 2 Calculation method of power supply and demand balance in new-generation power system

项目名称	随机模拟计算		典型场景计算(确定性模拟)
	时序模拟	非时序模拟	
输入数据	新能源出力与负荷需求时序数据；机组出力约束、电网传输约束；机组初始状态等	新能源出力的概率分布；负荷数据的概率分布；机组出力约束	新能源典型日出力数据；其他数据与时序模拟方法一致
应用模型	机组组合	随机优化	机组组合
优点	结果直观、信息全面	计算速率快、可融合不确定性	结果直观、信息全面
缺点	时序数据匮乏；计算耗时长；机组数量决定运算复杂度；中长期系统状态难以评估	无法反映出生产过程中机组状态与具体出力；模型预处理难度大	易忽略极端偶发场景；中长期平衡能力的评估不够完善

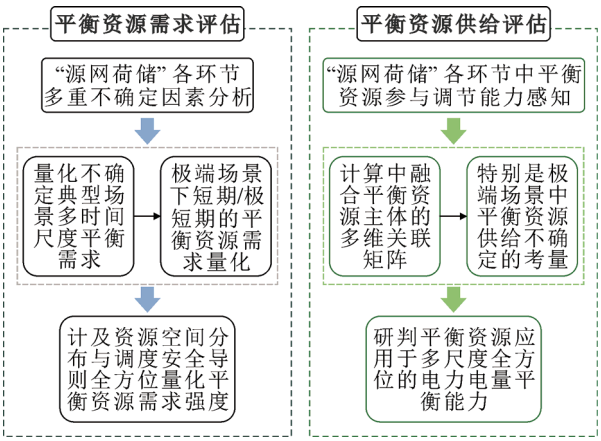


图 3 新型电力系统中平衡资源供需评估思路

Fig.3 Evaluation of balanced resource supply and demand in new-generation power system

定性范围下电力系统局部、邻域、广域的灵活性平衡能力需求强度。

2）平衡资源供给评估

平衡资源在维持电力系统平稳运行中至关重要，其多元化的资源主体参与平衡调节的方式更具时空相关的特点。因此可首先开展面向不同类型源–荷–储平衡资源的响应能力(包括响应量、响应持续时间、响应速率等)运行时序耦合评估方法研究[62]，从而获得各响应资源的时序耦合响应水平；构建基于关联规则挖掘与生成对抗学习方法[63]的不同源荷储平衡资源的价格–响应量–响应持续时间–响应速度(响应时间尺度)多维关联矩阵，并将其融合在评估过程中；其次预判源荷灵活性供给资源在不同时间尺度下对风光新能源不确定波动的局部自平衡、邻域互济平衡、广域全局趋优平衡能力。

3 新型电力系统电力电量平衡分析与预警

3.1 多重不确定因素下的电力电量平衡分析

在新能源占比不断提高的电力系统中，源–网–荷各环节的不确定性因素都会对电力系统运行产生影响，并且伴随着能源转型的过程，多种属性能源融合与复杂运行场景交织将使得电力系统的不确定性和波动性特征更加显著[64]。基于以上背景，如何量化并分析新型电力系统中多重不确定因素对系统电力电量平衡的影响，是提升新能源高占比下的新型电力系统稳定运行的关键，特别是极端场景中电力系统的供需平衡状态更需要注意。

目前，计及不确定性因素典型场景的电力系统分析大多以概率分析为主，该过程以获得系统输出变量的概率统计特征为目标，量化输入不确定性因素对电力系统运行的影响。文献[65-67]均以蒙特卡洛抽样计算法为基础，通过采样获得输入不确定变量的样本，并将概率方程转化为一系列的确定性方程问题进行求解，从而获得输出不确定变量的统计特征。蒙特卡洛方法计算简便，能够适用于复杂的实际问题，但计算效率低下，不满足电力电量分析的高效要求，所以可以作为基准以检验其他方法的准确性[68]。极端条件下系统各环节将表现出更加冗杂、突出的现象，其偶发的特点导致中长期尺度的历史数据与应对经验不足，概率分析的方法或许会出现偏差，且极端条件的出现往往伴随短时强波动，因此基于多时间尺度进行电力电量平衡资源的概率化裕度分析至关重要。就当下而言还未出现有效的极端场景电力电量分析相关内容，因此本文在此提出一种考虑多维时空的平衡分析思路，如图 4 所示。

1）年–月概率化电量平衡分析。首先，提取年度、月度新能源发电量预测数据的典型、极端电力曲线进行场景分解，获得二者特征集；然后考虑融合电源侧灵活性改造、储能侧资源投资、负荷侧需求响应聚合等灵活性措施[69]的中长期年–月电量平衡精细化扩展模拟分析，以此获得全系统/分区的时序新能源利用率和负荷供应率；进一步，基于细颗粒尺度的模拟结果统计表征实现年度、月度概率化电量平衡能力评估。

2）周–日概率化电力平衡分析。基于机器学习智能辨识实现大规模供–需双侧不确定性场景以及不确定特征聚类缩减[70]；应用多重不确定因素耦合极端场景下的平衡需求和供给不确定性结果，研究基于系统运行典型边界条件的周–日时间尺度源–储–荷平衡优化模拟技术[71]，获得各模拟场景下的时序电力平衡/不平衡指标(新能源利用率和负荷供应率)；基于预测更新数据，开展周–日时间尺度的平衡能力滚动迭代更新分析。

3）空间互联概率化平衡分析。搭建网络约束/跨区互联通道不确定性传输能力下的系统不同时空尺度电力电量平衡分析模型[72]，计及网络约束/跨区互联互济条件并基于交替乘子迭代开展电力系统时空电力电量平衡分区计算。

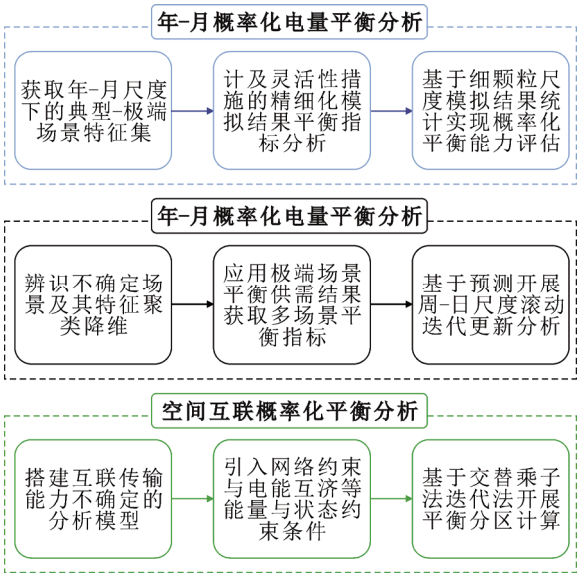


图 4 新型电力系统中多维时空平衡分析思路

Fig.4 Multidimensional space-time balance analysis in new-generation power system

3.2 电力系统供需平衡预警技术

电力系统的稳定运行状态在不确定因素作用下，可能变为非工况运行状态[73]。当系统处于稳定状态时，及时前瞻多重不确定因素(包括机组检修计划、极端天气条件、运行方式变化、设备故障、切负荷操作等)，分析在扰动产生后可能出现的功率、电压越限[74]，预判电网的运行态势，从而为电网发电计划、排查故障、安排调度等任务提供依据。

传统的电网风险预警主要采用基于*N*−1 安全校核，按照“最严重事故决策标准”来指导决策[75-76]，为精准实现电网风险预警，需要遍历电网的每个节点进行安全校核计算。若应用于新能源占比不断提高的复杂电力系统将产生巨大的计算量，进一步增加运算时间，降低实时预警效率。对于此类问题，延伸出了诸多宏观上的分级预警模式[77-78]，通过初步粗判将风险分类，根据其优先级进行计算预警，还发展出了更多的可缩减电力系统预警规模的精细化算法[79-81]，通过电网区域划分、关键节点识别、压缩场景等方法将大规模预警场景降维提高计算效率。采用以上方式处理后，依旧存在一定计算规模，并且预警分级也存在经验性误差，精细化算法也可能导致某些高风险设备或场景被忽略。除此之外，国内外对于系统保供能力已有多种评估指标与预警机制，但对于消纳能力的预警机制的研究几乎空白。本文在此就电力电量供需平衡预警提出智能预警措施供研究人员进行参考，如图 5 所示。

1）完善电力电量平衡预警指标体系。构建能有效表征新能源占比不断提高的新型电力系统电力电量多时间尺度平衡能力的分层多维指标体系(包括调峰裕度、供电裕度、爬坡裕度等)；加强保供应与促消纳两种预警体系建设，以精细化裕度预警指标指导平衡资源有序提供上/下调节能力；基于时空电力电量平衡分析结果，重点研究面向保供电与促消纳协同优化的电力电量平衡与失衡预警计算方法。

2）规划失衡分级预警与平衡路径。构建基于重要度与累积效应分析的阶梯式电力电量失衡后果量化方法；研究考虑概率化电力电量失衡量与后果的动态分级预警方案；面向电力电量平衡目标要求的不同时空灵活性平衡资源最优化精准平衡快速决策方法与平衡能力提升最优路径。

3）制订失衡感知主动预警机制。研究基于大数据统计分析的电网关键传输断面与传输能力辨识方法[82]，主动感知系统的空间平衡能力裕度与失衡主动预警；基于源荷预测时序波动性数据的爬坡能力主动感知形成预警能力；研究面向极端误差场景下的系统备用储备水平分析与预警技术；开展面向日前–日内预测数据匹配对标分析的系统平衡能力主动分析技术。

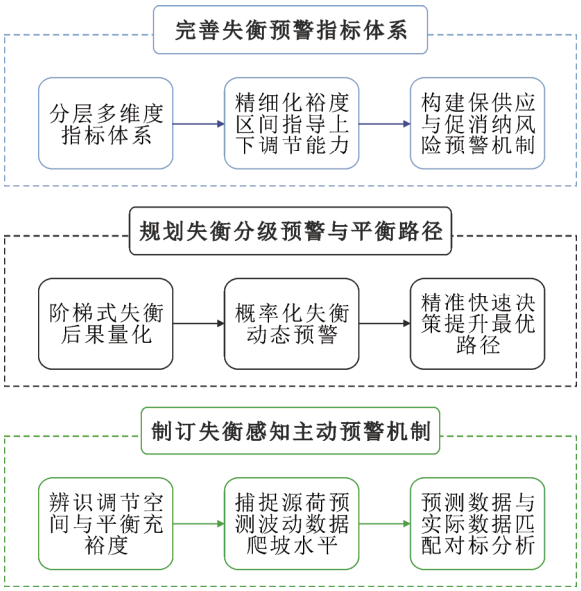


图 5 新型电力系统中失衡预警体系构建思路

Fig.5 Construction ideas of imbalance pre-warning system in new-generation power system

4 提升新型电力系统电力电量平衡分析能力的措施与建议

总揽前文可见新能源高占比的新型电力系统电力电量平衡问题的特别之处。尤其是贯穿在系统中的多重不确定因素叠加现象导致电力电量分析能力有待提高。为此本节从平衡分析过程中的各环节提出 3 点措施与建议，包括加强多重不确定因素表征、提升平衡资源感知、深化不确定因素与供需平衡融合仿真。具体内容如图 6 所示。

4.1 加强多重不确定因素的准确表征

多重不确定因素的精准表征是保证电力电量供需平衡分析方法有效性的首要前提[83]。与传统电力系统或新能源占比处于“分水岭”前的电力系统不同的是，高比例新能源电力系统中除源–网固有的不确定因素外，还增加了负荷、储能等平衡资源的复杂多重不确定因素，因此需要从电力系统全方位(包括源网荷储各环节以及年月日时各时段)加强不确定因素表征方法。基于 2.2 节中的研究背景与解决思路，本文认为未来研究可从以下 3 方面开展：(1)

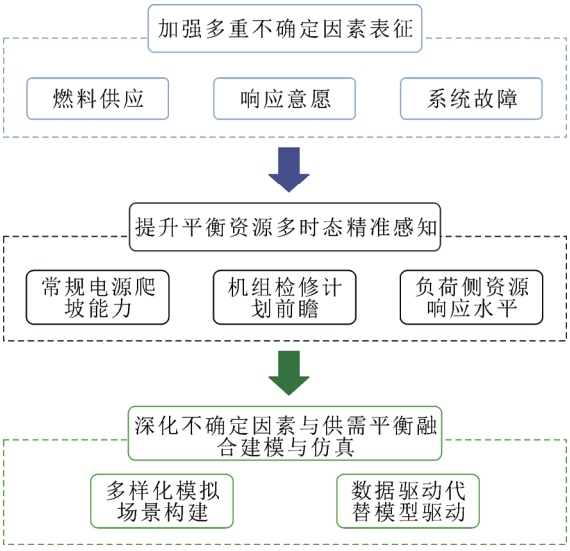


图 6 提升新型电力系统电力电量平衡分析能力的措施

Fig.6 Measures to improve power balance analysis ability of new-generation power system

燃料供应：基于煤炭、天然气等一次能源中长期价格走势，研究煤炭、天然气等一次能源供给不确定性建模方法，特别是建立考虑短期一次能源供给紧张、火电机组/天然气机组发电能力不确定性传导机制[84]。(2)响应意愿：研究不同时间尺度不同类型平衡资源(电源侧、储能、负荷侧)市场价格不确定性响应[85-86]建模方法。(3)系统故障：结合电网关键断面预想故障的不确定模拟技术[87]，研究多重不确定因素(新能源、负荷、一次能源供给、市场电价、电网故障)的概率耦合表征方法与极端场景快速生成技术。

4.2 提升平衡资源的多时态精准感知

如前文所述，平衡资源对于新型电力系统电力电量平衡调节极为重要，且不同类型的资源也表现出不同的参与平衡调节的能力。为实现未来新能源高占比的新型电力系统稳定运行，有必要提升平衡资源多时态精细化的精准感知。以火电机组为例，在传统电力系统中可通过协调火电机组出力实现运行全周期内的电量平衡[88]，但随着新能源占比逐渐提高、火电机组退化，一则导致火电机组可用容量减少，使原本稳定、平滑的爬坡能力变得敏感、转折[89]，这就需要精准感知功率转折点附近状态，及时提供平衡资源补足电力缺口，以应对多重不确定性对保供能力的冲击；二则在新能源占比不断提高的新型电力系统中由于机组长期的频繁启停、高载满发等原因导致设备检修次数增多[90]，因此也需对检修计划进行前瞻预判，及时修正生产计划确保运行周期内电量平衡，提高供电可靠性。

特别地，负荷侧的平衡资源容量更需要精准感知。除 2.3 节提出的平衡资源供需评估内容外，还应参考电力用户的用电习惯对负荷侧特征进行划分，如电动汽车可归为可转移负荷；商业用户可归为可调节负荷；工业用户可归为可中断负荷[91]。其响应潜力、响应速度、响应时长更是存在较大差异，即在参与电力电量平衡调节时表现出不同的响应模式，如在日前/日内时段中可转移、可调节负荷响应程度更高[92]，而可中断负荷往往需要一定时间进行调整或中断，且造成的经济/生产影响较大，故此一般以合约形式参与到中长期响应中[93]。整体来看负荷侧参与运行时存在不确定性给电力电量平衡分析带来挑战，因此精细化感知多时态负荷侧柔性平衡资源容量状态，研判各类供给主体响应意愿，有利于提高电力电量分析能力。

4.3 深化多重不确定因素下的供需平衡融合建模与仿真

目前模拟运行仿真中考虑不确定性的方法主要包括随机优化[94]、模糊优化[95]、鲁棒优化[96]、分布式鲁棒优化[97]等，已有研究基于典型日进行了分析。文献[94]引入机组启停约束及灵活性裕度机会约束，提出一种火电机组灵活性改造规划及运行综合不确定优化模型；文献[95]计及多元需求响应提出了一种含有源–荷隶属度的模糊机会约束的新型电力系统运行模型；文献[97]提出了一种考虑风电不确定性的电热综合能源系统分布式鲁棒协调优化调度模型。为实现从各个时间维度模拟运行衍生出多阶段优化的概念，即从时间尺度将系统运行过程划分为若干相互联系的阶段，且在每个阶段依据该时段状态做出相应的决策，换言之，就是通过构建场景树来推演决策树。如文献[98]对日前经济调度模型中的时间不确定性，利用多阶段分布式鲁棒优化方法进行建模；文献[99-100]均采用多阶段随机优化方法对电力系统运行/规划进行仿真模拟。

源于新能源占比不断提高的新型电力系统的多重不确定性特点，上述方法在仿真过程中对于多重不确定因素的融合能力较弱。一方面，由于不确定因素的表征方式单薄而不具强代表性，只能对某几类特定的不确定因素进行片段化考量(如新能源出力、负荷波动)[101]，缺乏与不确定因素集的广泛融合，导致仿真结果对实际运行的参考价值不大。

另一方面，由于仿真过程中需要应用类似于隶属度函数、权重系数这类经验性参数[102]，可能使仿真结果出现偏差。因此在计及不确定因素的融合仿真中可从以下方面思考：(1)构建多样化模拟运行场景。从时间维度捕捉年–月中长期尺度的典型、极端决策因素集、感知日–时短期尺度的功率转折点特征从空间维度分析系统多重不确定性耦合的关联性，并结合二者开展高效的聚类、分解等预处理技术，实现构建多元化场景应用于仿真。(2)开展数据驱动代替模型驱动与多重不确定因素的融合仿真研究。传统模型驱动需要分析系统各环节物理特性，构建时空代数模型应用于仿真运行中[103-104]。而数据驱动的原理则为应用已知数据求解未知数据[105]，以此降低融合多重不确定因素时的表征难度。

5 结论

本文基于含有多重不确定因素的新能源高占比新型电力系统电力电量平衡分析视角，从高占比系统中的多重不确定因素特性、电力电量平衡计算方法、电力电量平衡分析与预警以及提升电力系统电力电量平衡分析能力的措施 4 方面回顾了当前国内外研究成果，探讨了现存技术手段的优缺点以及部分问题存在的研究空白，并且为了将其应用于新能源占比逐渐提高的新型电力系统电力电量平衡分析中，提供了对应的解决思路与未来研究方向。特别是，在分析过程中加强多重不确定因素的准确表征、提升平衡资源多时态精准感知以及深化系统具有多重不确定因素的融合建模与仿真这 3 点建议。

为全面达成“双碳目标”，除在电力系统规划、运行、交易、政策方面统筹升级，还需格外关注新型电力系统的自身需求即电力电量平衡问题，在保证供电可靠性的前提下兼顾发电清洁性与系统经济性，实现新型电力系统向“更快速、更全面、更综合”的电力电量平衡分析体系转型。希望本文可为后续关于新能源占比不断提高的新型电力系统电力电量平衡分析的研究提供参考方向。

参考文献 References

[1] IEA. 全球能源部门 2050 年精零排放路线图[EB/OL].[2022-10-26]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/327b3e18-319c-4107-9b97-8c5-a1a79b94e/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_Chinese. pdf.
IEA. Global energy sector’s net zero emissions roadmap by 2050 [EB/OL].[2022-10-26]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/ 327b3e18-319c-4107-9b97-8c5a1a79b94e/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_Chinese. pdf.

[2] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2022-10-26]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652. htm.
Xinhua News Agency. Speech by Xi Jinping at the 75th United Nations general assembly general debate[EB/OL].[2022-10-26]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652. htm.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案[EB/OL].[2022-10-26]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013. htm.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Implementation plan for promoting high-quality development of new energy in the new era[EB/OL].[2022-10-26]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm.

[4] 国家能源局. 我国新能源发电量年内首超一万亿千瓦时[EB/OL]. [2022-10-26]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/31/c_1310404016. htm.
National Energy Administration. China’s new energy generation surpasses one trillion kilowatt-hours for the first time in one year[EB/OL]. [2022-10-26]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/31/c_1310404016. htm.

[5] 李元丽. “十四五”时期我国可再生能源发展将进入新阶段[EB/OL]. [2022-09-20]. https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-06-14/doc-imizmscu6650706. shtml?finpagefr=p_115.
LI Yuanli. China’s renewable energy development to enter a new stage during the 14th five-year plan period[EB/OL].[2022-09-20]. https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-06-14/doc-imizmscu6650706.shtml?finpagefr=p_115.

[6] 别朝红，林超凡，李更丰，等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2735-2744.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.

[7] 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 Jianan, 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.

[8] 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.

[9] 王仁顺，赵 宇，马福元，等. 受端电网高比例可再生能源消纳的运行瓶颈分析与储能需求评估[J]. 电网技术，2022，46(10)：3777-3785.
WANG Renshun, ZHAO Yu, MA Fuyuan, et al. Operational bottleneck analysis and energy storage demand evaluation for high proportional renewable energy consumption in receiving-end grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3777-3785.

[10] 叶 畅，柳 丹，杨欣宜，等. 基于最小惯量评估的高比例新能源电力系统优化运行策略[J]. 电网技术，2023，47(2)：502-509.
YE Chang, LIU Dan, YANG Xinyi, et al. Optimal operation strategy of high proportion new energy power system based on minimum inertia evaluation[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 502-509.

[11] GUO M H, WANG W, CHEN R H. Renewable hybrid energy system scheduling strategy considering demand response[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102247.

[12] 郭剑波. 高比例新能源电力系统面临的挑战及关键技术应对措施[R]. 北京：国家电网，2020.

GUO Jianbo. Challenges faced by high penetration renewable energy power systems and key technological countermeasures[R]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2020.

[13] 董吉哲，谢开贵，马 冲，等. 计及风速和负荷特性的风火打捆发电系统规划[J]. 电力系统自动化，2016，40(15)：59-66.
DONG Jizhe, XIE Kaigui, MA Chong, et al. Optimal planning of bundled wind-thermal generation power systems considering wind speed and load characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 59-66.

[14] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. 中国电力企业管理，2021(25)：8-11.
GUO Jianbo. New power systems the challenges faced and the mechanisms considered[J]. China Power Enterprise Management, 2021(25): 8-11.

[15] 国家电网有限公司. 国家电网有限公司服务新能源发展报告(2019)[EB/OL]. [2022-10-26]. https://guangfu.bjx.com.cn/news/20190411/974307. shtml.
State Grid Corporation of China. State Grid Corporation of China report on supporting the development of new energy(2019)[EB/OL]. [2022-10-26]. https://guangfu.bjx.com.cn/news/20190411/974307. shtml.

[16] 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 Kexin, GUO Hongye, CHEN Qixin. 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.

[17] 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.

[18] 屈 博，刘 畅，李德智，等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理，2021，23(2)：1-3，9.
QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the development strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral”[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 1-3, 9.

[19] 王铮澄，周艳真，郭庆来，等. 面向变化场景的输电断面极限评估主动迁移学习方法[J/OL]. 中国电机工程学报，2022：1-13 [2022-10-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220620.1513.012. html.
WANG Zhengcheng, ZHOU Yanzhen, GUO Qinglai, et al. Active transfer learning for TTC assessment of transmission interfaces with Changing operating scenarios[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022: 1-13[2022-10-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20220620.1513.012. html.

[20] 刘若凡，刘俊勇，刘友波，等. 风电接入下断面极限传输功率运行规则的场景聚类提取方法[J]. 电力自动化设备，2014，34(10)：69-74，80.
LIU Ruofan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Scenario clustering method for extracting TTC operating rules of transmission corridor with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 69-74, 80.

[21] 陈立征. 考虑极端气象事件的电力系统风险评估[D]. 济南：山东大学，2018.
CHEN Lizheng. Power system risk assessment considering extreme weather events[D]. Jinan, China: Shandong University, 2018.

[22] IMPRAM S, NEŞE S V, ORAL B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: a survey[J]. Energy Strategy Reviews, 2020, 31: 100539.

[23] 陈皓勇. 从限电限产透视“能源不可能三角”[J]. 中国电力企业管理，2021(34)：44-47.
CHEN Haoyong. The “energy impossible triangle” through the lens of power and production restrictions[J]. China Power Enterprise Management, 2021(34): 44-47.

[24] 陶 凤，吕银玲. 追踪东北限电：电力缺口为何这么大[N]. 北京商报，2021-09-28(002).
TAO Feng, LÜ Yinling. Tracking power rationing in Northeast China: why is the power shortage so severe[N]. Beijing Business Daily, 2021-09-28(002).

[25] 孙伟卿，郑钰琦，薛贵挺. 考虑响应率差异的需求响应交易机制设计与效果分析[J]. 电力系统自动化，2021，45(22)：83-94.
SUN Weiqing, ZHENG Yuqi, XUE Guiting. Design and effect analysis of demand response transaction mechanism considering response rate difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 83-94.

[26] 徐青山，丁一帆，颜庆国，等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(23)：6791-6800.
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791-6800.

[27] LEE S Y, JIN Y G, YOON Y T. Determining the optimal reserve capacity in a microgrid with islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1369-1376.

[28] 高红均，刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报，2016，36(18)：4911-4922.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.

[29] 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.

[30] 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.

[31] NIE S, HUANG Z C, HUANG G H, et al. Optimization of electric power systems with cost minimization and environmental-impact mitigation under multiple uncertainties[J]. Applied Energy, 2018, 221: 249-267.

[32] 吴问足，乔 颖，鲁宗相，等. 风电功率概率预测方法及展望[J]. 电力系统自动化，2017，41(18)：167-175.
WU Wenzu, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Methods and prospects for probabilistic forecasting of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 167-175.

[33] QUAN H, KHOSRAVI A, YANG D Z, et al. A survey of computational intelligence techniques for wind power uncertainty quantification in smart grids[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(11): 4582-4599.

[34] HAN Q K, MENG F M, HU T, et al. Non-parametric hybrid models for wind speed forecasting[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 554-568.

[35] 丁 明，吴义纯，张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(10)：107-110.

DING Ming, WU Yichun, ZHANG Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.

[36] 马 伟，乔 颖，谢丽蓉，等. 考虑气象特征波动划分阈值的双目标短期风功率预测[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4154-4162.
MA Wei, QIAO Ying, XIE Lirong, et al. Short-term wind power prediction with dual targets considering the threshold of meteorological characteristic fluctuation partition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4154-4162.

[37] 兰 飞，农植贵，黎静华. 风电功率序列的时空相关性研究[J]. 电力系统及其自动化学报，2016，28(1)：24-31.
LAN Fei, NONG Zhigui, LI Jinghua. Research on spatial and temporal correlation of wind power sequence[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 24-31.

[38] 黄南天，刘德宝，蔡国伟，等. 基于多相关日场景生成的电动汽车充电负荷区间预测[J]. 中国电机工程学报，2021，41(23)：7980-7989.
HUANG Nantian, LIU Debao, CAI Guowei, et al. Interval prediction of electric vehicle charging load based on scene generation with multiple correlation days[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7980-7989.

[39] ZHANG N, KANG C Q, SINGH C, et al. Copula based dependent discrete convolution for power system uncertainty analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5204-5205.

[40] 丁 明，林玉娟. 考虑风光荷不确定性的随机生产模拟[J]. 太阳能学报，2018，39(10)：2937-2944.
DING Ming, LIN Yujuan. Probabilistic production simulation considering randomness of renewable wind power, photovoltaic and load[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2937-2944.

[41] 李海波. 高比例可再生能源电力系统灵活性评估与优化规划[D]. 北京：清华大学，2017.
LI Haibo. Flexibility assessment and optimization planning of high penetration renewable energy power systems[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2017.

[42] 冯双磊，王伟胜，刘 纯，等. 风电场功率预测物理方法研究[J]. 中国电机工程学报，2010，30(2)：1-6.
FENG Shuanglei, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on the physical approach to wind power prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(2): 1-6.

[43] 管 霖，赵 琦，周保荣，等. 基于多尺度聚类分析的光伏功率特性建模及预测应用[J]. 电力系统自动化，2018，42(15)：24-30.
GUAN Lin, ZHAO Qi, ZHOU Baorong, et al. Multi-scale clustering analysis based modeling of photovoltaic power characteristics and its application in prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 24-30.

[44] YU G Z, LIU C Q, TANG B, et al. Short term wind power prediction for regional wind farms based on spatial-temporal characteristic distribution[J]. Renewable Energy, 2022, 199: 599-612.

[45] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Continuous-time co-operation of integrated electricity and natural gas systems with responsive demands under wind power generation uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3156-3170.

[46] KIM N, PARK H, LEE J, et al. Short-term electrical load forecasting with multidimensional feature extraction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2999-3013.

[47] 余光正，陆 柳，汤 波，等. 考虑转折性天气的海上风电功率超短期分段预测方法研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(13)：4859-4870.
YU Guangzheng, LU Liu, TANG Bo, et al. Research on ultra-short-term subsection forecasting method of offshore wind power considering transitional weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4859-4870.

[48] MONFORTI F, GONZALEZ-APARICIO I. Comparing the impact of uncertainties on technical and meteorological parameters in wind power time series modelling in the European Union[J]. Applied Energy, 2017, 206: 439-450.

[49] WANG Q, ZHANG X G, YI C Z, et al. A novel shared energy storage planning method considering the correlation of renewable uncertainties on the supply side[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2051-2063.

[50] ZULOAGA S, VITTAL V. Integrated electric power/water distribution system modeling and control under extreme mega drought scenarios[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 474-484.

[51] 和敬涵，罗国敏，程梦晓，等. 新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(17)：5506-5515.
HE Jinghan, LUO Guomin, CHENG Mengxiao, et al. A research review on application of artificial intelligence in power system fault analysis and location[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5506-5515.

[52] LI S, DING T, MU C G, et al. A machine learning-based reliability evaluation model for integrated power-gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2527-2537.

[53] LI S, DING T, JIA W H, et al. A machine learning-based vulnerability analysis for cascading failures of integrated power-gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2259-2270.

[54] 李海波，鲁宗相，乔 颖，等. 基于非时序生产模拟的风电消纳评估方法[J]. 电力建设，2015，36(10)：129-137.
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Evaluation method of wind power accommodation capacity based on non-sequential production simulation[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 129-137.

[55] LI H B, LU Z X, QIAO Y, et al. A non-sequential probabilistic production simulation method for wind energy curtailment evaluation considering the seasonal heat supply constraints[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 462-473.

[56] 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.

[57] 孙 欣，夏 清. 基于精细化管理模式的电网运行方式[J]. 电力系统自动化，2008，32(21)：14-17，31.
SUN Xin, XIA Qing. Power grid operation mode based on elaborating management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 14-17, 31.

[58] 张 衡，程浩忠，曾平良，等. 考虑经济性与安全性的发输电联合优化规划[J]. 电力系统自动化，2017，41(21)：62-69.
ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Generation and transmission expansion planning considering economy and safety[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 62-69.

[59] ANWAR M B, QAZI H W, BURKE D J, et al. Harnessing the flexibility of demand-side resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4151-4163.

[60] AGBONAYE O, KEATLEY P, HUANG Y, et al. Mapping demand flexibility: a spatio-temporal assessment of flexibility needs, opportunities and response potential[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117015.

[61] 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.
LYU 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.

[62] 邵振国，张承圣，陈飞雄，等. 生成对抗网络及其在电力系统中的应用综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(3)：987-1003.
SHAO Zhenguo, ZHANG Chengsheng, CHEN Feixiong, et al. A review on generative adversarial networks for power system applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 987-1003.

[63] 孙惠娟，吴　鹏，彭春华，等. 基于源荷协同降碳的综合能源系统分布鲁棒经济调度[J]. 电网技术，2023，47(4)：1589-1600.
SUN Huijuan, WU Peng, PENG Chunhua, et al. Distributionally robust economic scheduling for integrated energy systems based on source-load cooperative carbon reduction[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1589-1600.

[64] SHUAI H, FANG J K, AI X M, et al. Stochastic optimization of economic dispatch for microgrid based on approximate dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2440-2452.

[65] 马燕峰，骆泽榕，赵书强，等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(9)：75-83.
MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.

[66] 石文辉，别朝红，王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报，2008，28(4)：9-15.
SHI Wenhui, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15.

[67] 徐潇源，王　晗，严　正，等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13.

[68] DENHOLM P, ARENT D J, BALDWIN S F, et al. The challenges of achieving a 100% renewable electricity system in the United States[J]. Joule, 2021, 5(6): 1331-1352.

[69] 邓柏荣，陈俊斌，丁巧宜，等. 融合电网运行场景聚类的多任务深度强化学习优化调度[J]. 电网技术，2023，47(3)：978-987.
DENG Borong, CHEN Junbin, DING Qiaoyi, et al. Multi-task deep reinforcement learning optimal dispatching based on grid operation scenario clustering[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 978-987.

[70] 高志远，张　晶，庄卫金，等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J/OL]. 电力自动化设备，2022：1-14[2022-10-27]. https：//doi. org/10.16081/j. epae. 202209007.
GAO Zhiyuan, ZHANG Jing, ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2022: 1-14[2022-10-27]. https://doi.org/10.16081/j. epae. 202209007.

[71] WANG H, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Quantitative evaluations of uncertainties in multivariate operations of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2892-2903.

[72] ZHANG Y C, XU Y, DONG Z Y, et al. Intelligent early warning of power system dynamic insecurity risk: toward optimal accuracy-earliness tradeoff[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2544-2554.

[73] 黎静华，左俊军，汪　赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术，2016，40(11)：3503-3510.
LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3510.

[74] 张忠会，李玉婷，何乐彰，等. 蒙特卡洛方法在电力系统静态安全风险评估中的应用[J]. 电测与仪表，2015，52(19)：106-111.
ZHANG Zhonghui, LI Yuting, HE Lezhang, et al. Application of Monte Carlo methods in power system static security risk assessment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(19): 106-111.

[75] CHEN R L Y, COHN A, FAN N, et al. Contingency-risk informed power system design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2087-2096.

[76] 闫炯程，李常刚，刘玉田. 计及源荷不确定性的交直流大电网动态安全分级滚动预警[J]. 电力系统自动化，2023，47(1)：35-43.
YAN Jiongcheng, LI Changgang, LIU Yutian. Graded rolling early warning of dynamic security for large-scale AC/DC power grid considering uncertainties on source and load sides[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 35-43.

[77] 王一枫，汤　伟，刘路登，等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化，2015，39(8)：141-148.
WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment and rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.

[78] 郭创新，刘祝平，冯　斌，等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.

[79] 丁　一，江艺宝，宋永华，等. 能源互联网风险评估研究综述(一)：物理层面[J]. 中国电机工程学报，2016，36(14)：3806-3816.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3816.

[80] 康忠健，李昌超，于洪国，等. 一种识别电力系统关键输电线路的方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(4)：63-70.
KANG Zhongjian, LI Changchao, YU Hongguo, et al. Identification method of key transmission lines in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 63-70.

[81] 徐遐龄，胡　伟，王春明，等. 考虑特征组合效应的电网关键稳定特征筛选方法研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(8)：2232-2238.
XU Xialing, HU Wei, WANG Chunming, et al. Research on power systems key feature selection based on combination effect considering the stability rule[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2232-2238.

[82] 黎静华，骆怡辰，杨舒惠，等. 可再生能源电力不确定性预测方法综述[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1144-1155.
LI Jinghua, LUO Yichen, YANG Shuhui, et al. Review of uncertainty forecasting methods for renewable energy power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1144-1155.

[83] 刘五星，庄婧媛，巫成方，等. 区间调控机制对我国煤炭市场价格的影响研究——兼析政府对煤炭价格调控政策的发展与创新[J]. 价格理论与实践，2022(5)：10-14，117.
LIU Wuxing, ZHUANG Jingyuan, WU Chengfang, et al. Research on the influence of interval regulation mechanism on China's coal market price——the development and innovation of the government's regulation and control policy on coal price[J]. Price: Theory & Practice, 2022(5): 10-14, 117.

[84] 任大伟，侯金鸣，肖晋宇，等. 能源电力清洁化转型中的储能关键

技术探讨[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2751-2759.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.
[85] 李宏仲，魏静怡，吕勇荡. 考虑储能与新能源双边交易的日前市场报价策略[J]. 电网技术，2022，46(12)：4843-4851.
LI Hongzhong, WEI Jingyi, LÜ Yongdang. Day-ahead market quotation strategy considering bilateral transaction between energy storage and new energy[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4843-4851.
[86] CADINI F, AGLIARDI G L, ZIO E. A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power transmission grid subject to cascading failures under extreme weather conditions[J]. Applied Energy, 2017, 185: 267-279.
[87] TONG D, FARNHAM D J, DUAN L, et al. Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6146.
[88] ULBIG A, ANDERSSON G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72: 155-164.
[89] 汲国强，吴文传，张伯明. 考虑风电不确定性的机组检修鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报，2015，35(12)：2919-2926.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust optimization method of generator maintenance schedule considering wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2919-2926.
[90] MORALES-ESPAÑA G, MARTÍNEZ-GORDÓN R, SIJM J. Classifying and modelling demand response in power systems[J]. Energy, 2022, 242: 122544.
[91] LU R Z, HONG S H. Incentive-based demand response for smart grid with reinforcement learning and deep neural network[J]. Applied Energy, 2019, 236: 937-949.
[92] CUI H B, ZHOU K L. Industrial power load scheduling considering demand response[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204: 447-460.
[93] 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.
[94] GUO M H, WANG W, CHEN R H, et al. Research on bi-level model power dispatch considering the uncertainty of source and load[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102689.
[95] QIU H F, GU W, XU X C, et al. A historical-correlation-driven robust optimization approach for microgrid dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1135-1148.
[96] 税　月，刘俊勇，高红均，等. 考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(24)：7235-7247.
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. A distributionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7235-7247.
[97] DING T, ZHANG X S, LU R Z, et al. Multi-stage distributionally robust stochastic dual dynamic programming to multi-period economic dispatch with virtual energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 146-158.
[98] DING T, HU Y, BIE Z H. Multi-stage stochastic programming with nonanticipativity constraints for expansion of combined power and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 317-328.
[99] LU R Z, DING T, QIN B Y, et al. Multi-stage stochastic programming to joint economic dispatch for energy and reserve with uncertain renewable energy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1140-1151.
[100] SCOLARI E, REYES-CHAMORRO L, SOSSAN F, et al. A comprehensive assessment of the short-term uncertainty of grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1458-1467.
[101] 张智晟，于道林. 考虑需求响应综合影响因素的 RBF-NN 短期负荷预测模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(6)：1631-1638.
ZHANG Zhisheng, YU Daolin. RBF-NN based short-term load forecasting model considering comprehensive factors affecting demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1631-1638.
[102] 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.
[103] 江秀臣，许永鹏，李曜丞，等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术，2022，48(1)：1-10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.
[104] 江秀臣，盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1041-1050.
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1041-1050.
[105] WANG X T, WANG X Z, SHENG H, et al. A data-driven sparse polynomial chaos expansion method to assess probabilistic total transfer capability for power systems with renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2573-2583.



高红均
1989—，男，博士，副教授，博导
研究方向为高比例可再生能源电力系统与配电网规划运行、综合能源系统优化与市场交易等
E-mail: gaohongjun@scu.edu.cn

GAO Hongjun
Ph.D.
Associate professor



郭明浩(通信作者)
1997—，男，博士生
研究方向为高比例可再生能源电力系统调度优化
E-mail: guo_minghao@outlook.com

GUO Minghao
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2022-11-15　修回日期　2023-03-13　　编辑　程子丰