

电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究 及应对综述

郭红霞¹, 陈凌轩¹, 张启², 黄河³, 马骞³, 王建学²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510641;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东省 广州市 510630)

Research and Response to Extreme Scenarios in New Power System: A Review From Perspective of Electricity and Power Balance

GUO Hongxia¹, CHEN Lingxuan¹, ZHANG Qi², HUANG He³, MA Qian³, WANG Jianxue²

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

3. Power Dispatching & Communication Centre of China Southern Power Grid, Guangzhou 510630, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Extreme weather events occur frequently under global climate change intensification. Under the influence of energy transition policies and geopolitics, primary energy supply and load levels are highly uncertain. China is in the construction stage of a new power system with an increasing proportion of renewable energy; the problem of power and energy balance under extreme scenarios is highlighted and shows a tendency to intensify. Based on this, this paper summarizes the research on extreme scenarios in the New Power System from the perspectives of the basic connotation of extreme scenarios, simulation and generation technology, application in the power system, countermeasures, etc. Firstly, the definition and characteristics of extreme scenarios are summarized, and the connection between extreme scenarios, extreme events, worst scenarios, and other concepts is pointed out. In contrast, the method of constructing extreme scenarios is concluded. Subsequently, the direct and indirect generation methods of extreme scenarios are sorted out for the small sample characteristics of extreme scenarios; the application methods of extreme scenarios in the power system and specific application areas are discussed; finally, the countermeasures of extreme scenarios are proposed at four levels by combining the existing research and actual engineering cases, and the follow-up research direction for extreme scenarios is highlighted, providing ideas for the subsequent construction of

a flexible, reliable and supply-demand balanced power system.

KEY WORDS: extreme scenarios; response strategies; renewable energy; new power systems; electricity power balance; scenario generation

摘要: 全球气候变化加剧背景下极端天气事件频发, 受能源转型政策、地缘政治影响一次能源供应与负荷水平均呈现强不确定性。中国正处于可再生能源占比不断提升的新型电力系统建设阶段, 极端场景下电力电量平衡问题凸显并呈现出加剧趋势。基于此, 从极端场景基本内涵、模拟与生成技术、在电力系统中的应用以及应对措施等角度入手, 总结电力电量平衡视角下新型电力系统中的极端场景研究。首先, 归纳了极端场景的定义与特性, 指出了极端场景与极端事件、最恶劣场景等概念之间联系, 归纳了极端场景集的构建方法; 随后, 针对极端场景小样本特性, 梳理了极端场景的直接与间接生成方法; 探讨了极端场景在电力系统中的应用方法与具体应用领域; 最后, 结合现有研究与实际工程案例从 4 个层面提出了极端场景的应对策略, 并指出了极端场景的后续研究方向, 为后续建设灵活可靠、供需平衡的电力系统提供了思路。

关键词: 极端场景; 应对策略; 可再生能源; 新型电力系统; 电力电量平衡; 场景生成

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2268

0 引言

高比例可再生能源接入是中国构建“新型电力系统”的一大典型特征。由于强烈的随机波动性, 新能源在可控性、可预测性方面与传统能源相比存在显著差距^[1]。全球气候变化加剧了极端天气的出

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2403500): “支撑 20% 新能源电量占比场景下的电网智能调度关键技术”。

Project Supported by National Key Research & Development Program of China: “Key Technologies on Intelligent Dispatch of Power Grid Under 20% New Energy Integration Scenario” (2022YFB2403500).

现频次,无论是寒潮、台风、洪涝等灾害性气象事件,还是持续性极热无风、极寒无光天气均会对高比例可再生能源接入的电力系统的电力电量平衡造成影响^[2]。除此之外,各种“黑天鹅”事件下一次能源供给与负荷不确定性也对电力电量平衡造成严峻挑战。

近年来极端天气频发叠加可再生能源占比持续提升,供需时空错配问题显著增加^[3-4],具体表现在大范围的切负荷与停电事故以及居高不下的弃风弃光量。全球各国均不同程度地遭遇电力系统中极端场景的影响,如美国 2020 年 8 月加州大停电事故^[5]以及 2021 年 2 月得州大停电事故^[6],均是由于极端天气下新能源出力骤降,同时火电机组出现故障无法维持电能供给,从而造成了大面积的切负荷,2021 年受极端天气、能源转型政策以及俄乌冲突影响,欧洲爆发能源危机,原油天然气价格上涨带动电价持续攀升^[7]。2021 年 9 月,广东省出现严重的极热无风天气,叠加煤炭价格上涨,火电厂电煤供应紧张,发电意愿下降,被迫采取错峰限电措施,最大错峰电力超过 20000MW;2022 年 7—8 月全国范围内遭遇高温天气,以四川、云南为典型代表的西部水电大省出现来水偏枯情况,汛期前水库水位按低位控制,造成电力长时间供应紧张状况^[8]。传统电力系统中可再生能源占比低下,采用机组组合、预留备用、省间联络线计划调整等手段能够应对绝大多数极端场景^[9];但在高比例可再生能源接入背景下,极端场景的风险被放大^[10],应对极端场景的成本上升,对电力系统供需平衡与可靠运行的影响加剧。为应对各类型极端场景带来的供应与消纳问题,各国乃至各区域电网均采取行之有效的措施,结合气候条件、资源禀赋、电源/电网结构、电力市场机制等实际提出具有适应性的应对方案^[11],为我国应对新型电力系统中的极端场景挑战提供了宝贵经验。

当前针对极端场景及其应对策略的研究已取得一系列成果,但仍然存在缺失,具体表现在:1)研究者对极端场景的定义、特性、分类并未明确统一;2)各区域缺乏足够的历史样本数据,有待进一步深入研究构建有效的极端场景集方法;3)在系统调度、规划等实际过程中没有充分考虑极端场景;4)电力电量平衡分析中对极端场景的预测预警、潜在风险分析以及主动防御均没有形成范式。

因此,本文针对电力电量平衡分析中的极端场景的基本内涵、模拟与生成方法、实际应用以及应对措施 4 方面进行论述,其整体框架与逻辑如附录

图 A1 所示。

首先总结极端场景定义与特性,并从筛选方法与辨识方法 2 个方面归纳了极端场景集构建方法;其次,从直接生成与间接生成 2 个方面总结了极端场景模拟生成技术;紧接着总结了现有的优化方法中考虑极端场景的思路及其优缺点,探讨了极端场景在电力系统运行方式制定、运行调度以及中长期规划层面的应用;围绕极端场景的应对措施,从电力电量平衡预警机制、强不确定性电力系统灵活运行、引入极端场景的电力系统中长期规划和电力市场适应性设计角度进行探讨,最后总结了电力系统极端场景的后续研究思路。

1 电力电量平衡分析中极端场景基本内涵

1.1 极端场景定义与特性

无论在传统电力系统还是新型电力系统中,大多数电力电量平衡问题是在极端气象事件的直接或间接影响下产生的。传统电力系统中电能供应以水电、火电为主,电源可控性、负荷规律性强。极热天气下来水偏枯与极寒天气或政治因素影响下煤炭供应紧张,叠加负荷的剧增是这一阶段电力电量平衡的主要问题,详细内容如表 1 所示。

随着新能源在系统中占比不断提升,其随机性、间歇性、波动性造成的短期系统供应与消纳能力不足^[13]逐渐成为当前电力电量平衡问题的主要内容。以广东为例,2h 最大新能源出力波动可达 20%~35%,单个海上风电场反调峰深度可达 50%。由于常规可控电源仍在电力电量平衡支撑中占主导地位,电力系统以往面临的电力电量平衡问题并未消失,多类型电力电量平衡问题共存,系统平衡风险相较于新能源低渗透率情景进一步增大。

在高比例乃至极高比例可再生能源电力系统中,新能源电量渗透率与利用率之间存在相互制约^[19],极端气象事件对新能源出力的影响进一步凸显。2025 年南方区域某省份在极端高温天气影响下电力缺口将超过 2600 万 kW,占全网最大负荷的 11.6%;远期来看在寒潮影响下南方区域整体将呈现 6000 万 kW 的平均电力缺口,季节性电力电量平衡问题凸显^[20]。同时持续晴朗多风条件下风电、光伏同时大发现象增多,常规电源装机比重下降,使得系统调节能力不足、负荷低于正常水平造成的大规模弃电风险上升。新型电力系统中面临的极端场景如表 2 所示。

现有研究从电力电量平衡问题的来源^[29]、表现形式^[30-32]以及损失程度^[33]等角度给出了极端场景

表 1 传统电力系统典型极端场景及其特点描述

Table 1 Typical extreme scenarios of traditional power system and their characteristics description

极端场景类型	主导因素	时间尺度	典型特性	发生地区	负荷变化
来水偏枯 ^[12-13]	水电	月级	水电持续低出力； 往往与气温过高带来的高负荷关联； 省间送受电计划难以按照运行方式执行。	西南水电丰富地区(云南、四川等)； 水电“大受端”省份	负荷水平高
电煤、燃气紧缺 ^[14-16]	火电	周级或月级	极寒天气下火力发电厂调峰意愿持续低迷； 受地缘政治(如：俄乌冲突下国际能源形势变动)、 能源转型政策(煤炭供给侧结构性改革政策)等影响。	全国各地	负荷水平高
负荷剧增 ^[17-18]	负荷	日级至年级	极端天气影响下短期负荷远高于预测值；经济社会原因 下负荷基准增长率远高于平衡测算中的估计值。	全国各地	负荷水平高

表 2 新型电力系统典型极端场景及其特点描述

Table 2 Typical extreme scenarios of new power systems and their characteristics description

极端场景类型	主导因素	时间尺度	典型特性	发生地区	新能源出力变化	负荷变化
极热无风 ^[21-23]	风电	日级或月级	风电持续多日低出力；一般受 副热带高压影响，负荷水平高。	全国各地	风电低出力 光伏高出力	负荷水平高
寒潮、台风逼近 ^[24]	风电	小时级或日级	风电出力爬坡迅速	寒潮：全国各地 台风：东南沿海省份	风电低迅速爬坡 光伏低出力	负荷水平正常或较高
寒潮、台风或沙尘暴等(Dunkelflaute事件) ^[25-27]	风电、 光伏	小时级	寒潮、台风等影响严重时可能 造成风电停机，出力降为 0； 由于阴天或光伏发电板覆雪造成光伏低出力； 煤电、气电提供的备用不足。	寒潮：全国各地 台风：东南沿海省份 沙尘暴：北方地区	风电出力骤降 光伏低出力	负荷水平高
日食 ^[28]	光伏	小时级	光伏发电功率快速跌落	光伏资源密集 区域	光伏出力骤降 风电出力正常	负荷水平正常

的定义，但并没有综合、全面地体现极端场景与电力电量平衡问题之间的关联。因此，现有电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景的定义可归纳为：受气象、气候、社会经济等多重不确定性因素影响，一次能源供应紧张、新能源剧烈波动或持续高/低出力等小概率事件出现，“源-荷”双侧呈供需错配态势，叠加系统平衡调节资源有限，造成持续性不可接受的电力供应与消纳缺口。

从上述研究中的极端场景定义中，可以总结出极端场景的普遍特征：1) 小概率高风险(high impact low probability, HILP)。虽然其发生概率低，但对系统造成的损失大；2) 双重性。能源供应不足与过剩均是极端场景的表现形式；3) 随机性。极端场景的出现时间不固定，是完全随机事件；4) 区域性。不同电力供应区域的极端场景表现形式不同。

综上，随着新能源占比的提升，极端场景的主导因素从传统电力系统的火电、水电、负荷转移到新能源。未来电力系统中各种极端场景风险均以一定的概率出现。对新型电力系统中的极端场景类型以及特性进行梳理，如表 1 所示。

1.2 极端场景与极端事件、最恶劣场景

当前研究中常出现极端事件、最恶劣场景这 2 个概念。最恶劣场景指场景集中不确定性边界上的边缘小概率场景，包含了场景集中失负荷风险与弃电风险最大场景^[34]。最恶劣场景常用于鲁棒优化中，得到随机变量波动范围内所有约束条件均能得

到满足的解^[35]。

极端事件是指对电力系统运行产生重大影响的事件，其来源包括新能源出力、负荷波动、网络拓扑、能源价格以及灾害事件(气象、地质、水文等)等^[36]。因此，针对极端事件的研究通常从事件对电力系统产生的影响量化、受灾状况下的恢复能力、电力系统抵御灾害的能力提升等角度展开，强调电网运行过程中的安全、稳定性，通常在电力系统弹性、韧性分析中使用此概念^[37]。

本文所指极端场景考虑系统电力电量平衡分析中的供需平衡状况，从电力系统的灵活性、充裕性角度开展研究。但广义上最恶劣场景、极端事件均可认为是极端场景。

1.3 极端场景集的构建

基于系统历史新能源、负荷等随机变量时间序列，通过场景的筛选与辨识 2 个步骤实现极端场景集的构建^[38]。其中，筛选方法包括边界法、聚类法、阈值法等。

场景集的本质是一个不确定性集，边界法认为极端场景为不确定性集的边界，通过刻画不确定性集的边界点建立极端场景集。现有文献通过提取全年各小时的风电和负荷数据形成的二维散点图，利用 Pareto 前沿解集确定了外圈包络为极端场景集^[39]；Pareto 前沿的边缘也存在影响电力电量平衡的极端场景，可运用离散化的 Pareto 前沿解集以区间形式进行聚合^[40]。此外，针对多重不确定性因素影响下

的极端场景,可采用基于最小包络椭圆构造外部最小凸多面体的方法进行筛选得到^[41-42]。边界法计算效率高、筛选依据明确,然而得到的极端场景集偏向于最恶劣场景,部分非边界运行场景同样是影响系统电力电量平衡的极端场景,而边界法无法筛选出该类型极端场景。

采用聚类算法对历史运行数据进行重构可以获取极端场景样本^[43]。在部分研究中聚类法也被称为时间序列聚合(time series aggregation, TSA)。由于边界法一般应用于小时级、分钟级极端场景筛选,聚类法可作为其重要补充^[44]。基于距离的聚类算法可提取远离聚类中心的(对所有聚类子集隶属度均较低)的场景;而基于密度的聚类则可获取所有场景集中的离群稀疏场景^[45]。此外, SOM^[46]、CSFDP^[47]等新型聚类算法以及 k-MILP^[48]、组合加权聚类^[49]等改进聚类算法也应用于极端场景的筛选中,通过指定极端日类型、提取极端场景典型特性等方式灵活地筛选。聚类方法种类丰富、类型多样,然而基于距离的聚类与基于密度的聚类均无法反映所有极端场景的全部特性,因此需要研究综合聚类方法以全面地筛选出所有历史极端场景序列。

阈值法的关键在于根据专家知识估计系统可承受能力的边界,设定阈值直接筛选超出边界的极端场景。筛选出新能源出力高于基准同时负荷低于基准的场景^[50],考虑气象要素数值化筛选出天气变量高于(或低于)变量观测值上/下限的场景^[51],或根据极端小样本事件中的关键事件节点和转折条件提取极端场景^[52-53],均是阈值法的具体应用。

极端场景的辨识一般采用电力电量平衡测算方法^[54],根据系统的电源装机结构、网络拓扑以及负荷时变特性等信息进行生产模拟,校核筛选出的场景在现有边界下是否满足电力电量平衡约束^[55-56]或计算其供应与消纳缺口^[57-58]。较大区域的极端场景辨识由于网络拓扑复杂,电源、负荷元件众多,平衡测算过程需要耗费大量时间;而过度的简化则会造成极端场景的不准确辨识,因而需要研究电力电量平衡的加速求解技术以提升现有极端场景辨识方法的求解速度。

2 电力系统极端场景模拟生成方法

极端场景的发生一般为小概率事件,且基于历史样本数据少、缺乏典型性,难以应用于电网的运行、调度与决策,因而需要考虑极端场景的生成方法,以扩充极端场景样本集。

2.1 极端场景的直接生成方法

直接生成法是在具有完备气象数据与气象-设备运行性能映射函数的基础上,通过对已知的系统极端场景序列进行重构,抽取出其中的极值序列并分析极值分布而建立模型并生成更多的极端场景的方法^[59]。直接生成方法的关键步骤包括极端场景建模与抽样(模拟),其中建模可采用基于模型驱动的建模方法或数据驱动建模方法。

2.1.1 模型驱动的建模方法

极端场景建模一般采用概率化模型,基于极大似然估计、贝叶斯推断等统计学方法拟合模型参数。极端场景模型可表示为 $S=[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$, 其中, X_1-X_n 表示极端场景中的 n 项指标; $X_n=[x_{n,1}, x_{n,2}, x_{n,3}, \dots, x_{n,T}]$ 由 T 个连续时间段构成, T 为极端场景的时间尺度。

1) Copula 函数法。

Copula 函数能反映双随机变量之间的联合相关性^[60],根据其分布类型可被划分为椭圆分布族^[61]与阿基米德分布族^[62]。不同类型的 Copula 函数尾部特性存在明显差异。文献[63]基于 Copula 模型分析了欧洲能源枯竭事件的持续时间与严重程度之间的关系;针对能源市场中的价格因素,文献[64]分析了不同 Copula 模型对于极端天然气价格和极端电价联合相关性的适用程度。

在极端场景的描述过程中为引入更多的不确定性因素,生成多源-荷的联合场景,可以采用藤结构的 Copula 函数(Vine Copula),典型的 Vine Copula 函数包括 C-Vine Copula, D-Vine-Copula^[65]以及 R-Vine Copula^[66]。文献[65]及文献[66]均考虑了“多源-荷”之间的极端场景,并将生成场景应用于输电线路扩展规划、电网概率化潮流分析中;此外,鉴于 Vine Copula 函数高维联合概率分布的特性,该方法还应用于极端场景的空间相关性建模,如:极端大风事件下多风电场出力建模^[67]以及极端水位事件中上下游水位的相关性建模^[68],以此为依据生成的极端场景充分考虑了各因素之间的协同^[69],具有较高的可信度。

2) 马尔科夫链。

极端场景下某一不确定性因素 X 的变化可近似认为是马尔科夫过程(Markov process, MP)。采用马尔科夫链(Markov chain, MC)模型基于非参数估计对相邻变量之间的条件概率分布建模,忽略复杂时序关系,认为变量 t 时刻的状态仅取决于 $t-1$ 时刻的状态,从而构建状态转移矩阵。

当前研究中 MC 模型包含了 2 种建立方法:时

序转移建模与模式转移建模。时序过程建模即针对特定类型极端场景下某一不确定性因素的时序曲线建立 MC 模型;近年来在极端场景的研究中由于期望获得完整的极端场景序列(包括进入、持续、结束 3 段),出现了模式转移建模方法,即通过对较长时间尺度的极端场景下各种不确定性因素日时序曲线的聚类分析,得到若干日出力模式,建立模式转移模型用以刻画完整的极端场景^[70-73]。相比之下时序转移适用于短期(日级以下)极端场景的分析建模,模式转移模型则适合更长时间尺度(多日乃至月)的极端场景,同时也解决了高阶 MC 模型的计算复杂度和建模精度问题。

3) 极值理论。

极值理论(extreme value theory, EVT)用于分析时序过程中极端值分布特性,对现有极端场景样本尾部特性具有良好的模拟效果。EVT 包含 2 种概率模型:渐进模型与阈值模型,分别对应广义极值分布(generalized extreme value distribution, GEVD)与广义帕累托分布(generalized Pareto distribution, GPD),其表达式分别如附录式(A1)(A2)所示。

EVT 既可以描述新能源出力序列与负荷序列中的极端值,也可以对新能源出力的极端波动进行建模。同时,部分文献也采用极值理论对极端降水^[74]、极端气温^[75]建模,从而推演出电力系统面临的极端风险。当前多数研究中应用 EVT 建立一维模型,而出于极端场景考虑多重不确定性因素的需要,可进一步研究高维 EVT 应用于复杂系统的时序极端场景建模。

综上,模型驱动的建模方法复杂程度低,可解释性强,与抽样方法相结合即可直接生成系统极端场景。但该方法需要大量历史样本数据,而电力系统的极端场景往往类型多且次数少,因而存在因样本数量不足而造成生成场景可靠性低下的问题;同时,模型驱动的场景生成方法一般只对 1 种或 2 种

源侧因素进行分析,缺乏对多种源侧因素联合出力相关性的考虑及“源-荷”相关性的考虑,仅将生成的场景按照排列组合的方式进行组合,与现实场景具有较大的差距。

2.1.2 基于数据驱动的极端场景生成方法

基于数据驱动的极端场景生成方法通过构建生成式网络,对极端场景集样本进行训练从而实现样本集的扩充,本质上是一种数据增强方法。现阶段采用较多的方法为核密度估计(kernel density estimation, KDE)、生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)、变分自动编码器(variational auto-encoders, VAE)、扩散模型(diffusion models, DM)等。数据驱动的极端场景生成模型对比分析见表 3。

极端场景样本难以用标准概率分布刻画。KDE 基于随机变量的历史场景样本生成平滑的 PDF 曲线,有清晰的概率表达式。文献[76]使用 KDE 对所选洪水变量的边际分布进行建模;文献[77]采用 KDE 拟合不同分布式可再生能源和负荷的概率分布以评估系统在给定风险约束下的弹性;文献[78]则将 KDE 方法应用于极端水文事件的预测分析中。在运用 KDE 建立极端场景模型时选择合适的核函数与带宽对刻画结果的准确性起决定性作用,针对不同不确定性因素须通过比较多类型核函数与带宽以确保模拟生成的极端场景后验分布最大程度服从先验分布。

GAN 整体由生成器 G 和判别器 D 构成,二者之间构成纳什均衡。由于极端场景的表现形式多样,GAN 模型的高维特征捕获能力未必能满足极端场景模拟生成的需求^[79]。一方面,通过对模型网络拓扑改进^[80],或采用其衍生模型(如: time GAN)^[81-82]提升极端气象条件下“源-荷”双侧波动的感知能力;另一方面,设置条件标签,基于极端场景下的不确定性因素变化模式^[83]、昼夜信息以及季节信

表 3 数据驱动的极端场景生成模型对比分析

Table 3 Comparative analysis of data-driven extreme scenario generation models

模型	训练时长	收敛效果	优势	劣势	变体
KDE	较长	基本不存在收敛问题	输出具体的表征极端场景概率化特性的 PDF	计算负担较大 难以表示高维复杂随机特性 不适用于大规模电力系统	Gaussian-KDE, β -KDE, γ -KDE
VAE	较短	可能因后验崩塌而不收敛	模型结构简单 生成能力较强	模型假设引入偏差 难以建模高维底层结构 难以还原细节特征	CVAE, β -VAE, VQ-VAE 等
GAN	较长	纳什均衡训练较难	模型原理简单 生成能力较强 生成场景细节更丰富	模式塌缩问题	CGAN, DCGAN, WGAN, Style GAN 等
扩散模型	中等	模型收敛过程中波动较大	细节特征模拟能力强 先验假设少,拟合能力更强大	依赖于长 MC 生成 极端场景,采样速度慢	去噪扩散隐式模型(denoising diffusion implicit models, DDIM), 基于分数的扩散模型,集中扩散模型等

息^[84]等, 模拟生成带标签信息的极端场景。GAN 模型简洁、学习能力强, 能够从无监督样本中迅速学习极端场景模型概率特性, 生成符合先验分布的高保真样本; 但目前无法保证模型收敛到纳什均衡状态, 模型训练过程稳定性较差; 同时模型经常受到模式坍塌的影响, 生成器学习到仅根据少数几种数据分布模式生成样本, 甚至仅生成单个样本。

VAE 在结构上首先通过编码器 Q 将样本数据映射为独立标准正态分布数据 Z , 随后通过解码器 P 将标准正态分布数据映射为样本。文献[85]比较了包含 VAE 在内的多种深度生成式网络在风电、光伏以及日内电价序列模拟方面的有效性, 指出 VAE 在极端场景模拟方面具有一定的效果; 文献[86]提出采用 VAE 算法生成风电与光伏场景, 在无先验假设的条件下较好地建模实际发电单元的时空特性; 对于特定气象条件下多源-荷分布特性的不足, 文献[87]采用模块化去噪变分自编码器(modular denoising variational auto-encoder, MDVAE)生成“源-荷”联合场景, 充分将气象因素考虑在内模拟高可信度场景。VAE 网络结构简单, 模拟与生成极端场景能力强; 但由于假设极端样本的条件分布 $p(X|Z)$ 为正态分布, 无法最优化其真实概率分布, 对极端场景下时序变化的细节还原能力较差; 同时, VAE 的训练过程存在后验崩溃问题, 在稳定性方面具有一定隐患。

DM^[55]是一种新兴的生成式模型, 由扩散过程(正向过程)与反向过程构成, 基于多步扩散将极端场景样本信息映射为多元正态分布, 并通过学习逆扩散过程的映射关系, 实现从多元正态分布样本模拟生成极端场景。由扩散模型衍生出的条件扩散模型也同样适用于极端场景生成, 且适应极端场景的小样本特性^[88]。但扩散模型采样速度相对较慢, 导致场景生成的时间代价更高。

综上, 数据驱动模型具有极强的适应性和数据整合能力, 适用于大规模极端场景数据增强同时满足隐私保护的需求^[89]。但数据驱动的极端场景生成过程需要大量的极端场景样本或气象数据, 由于极端场景的样本数目较少, 因此该类型方法应用困难, 通常配合数据增强方法生成指定极端场景。但在足量系统历史运行数据情况下, 基于直接生成方法的极端场景生成方法显然更加高效。

2.1.3 极端场景模拟与抽样方法

概率化的极端场景模型需要通过抽样模拟或反变换得到连续的时序场景样本。现阶段常用的单变量随机抽样方法包括分层抽样方法与蒙特卡洛

抽样(Monte Carlo sampling, MCS)方法: 前者以超拉丁方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)法为代表, 将极端场景中各变量的取值范围划分为若干等间距区间, 确保每个区间内都有代表性的样本, 从而实现极端场景的生成^[90-91]; 后者依据历史运行数据信息总结出新能源、负荷的极端场景集概率化模型, 从而抽样生成大量的场景。而对于多变量概率化极端场景模型, 可采用交替抽样(吉布斯抽样)或 Rosenblatt 变换实现对 Copula 函数模型的抽样模拟^[10]。由于已经建立概率分布与极端场景之间的映射关系, 深度生成式网络自然具备模拟与生成极端场景的能力^[92]。

2.2 极端场景的间接生成方法

在大多数研究区域内, 往往没有足够的极端场景样本支撑直接极端场景生成方法的应用。借鉴概率论、机器学习乃至气象学等中的领域知识, 丰富极端场景样本的来源, 为极端场景的模拟提供了间接的思路。

2.2.1 小样本模拟方法

根据系统多年历史运行样本中不确定性因素的概率分布特性, 基于抽样方法扩充场景集, 融合极端场景集构建方法扩充极端场景样本^[47]。然而抽样过程中会产生大量冗余场景, 在保证极端场景样本数量与质量的前提下需要耗费大量计算资源和计算时间; 且无法生成特定类型的极端场景, 如: 不同的风险等级、时间尺度、时序特性等, 可控性较差。

小样本模拟方法可有效解决上述问题, 通过对概率化模型的重构提高极端场景在抽样中出现的概率。常见的方法包括: 重要性采样(important sampling, IS)、子集模拟(subset simulation, SS)法以及拆分法。文献[93]将重要性采样应用于配电网的超负荷运行事件分析, 研究了配电网的超负荷运行事件发生的概率; 文献[94]利用拆分方法研究了电力系统停电事件的概率, 并证明了其能够检测导致停电事件概率较高的因素。当前小样本模拟方法在极端场景生成中的应用研究较少, 在生成时序场景的可信度方面还需进行探讨。

2.2.2 迁移学习法

迁移学习技术核心在于寻找到源域与目标域之间的共同特征, 从而实现知识迁移^[95-96]。基于迁移学习的极端场景生成方法充分利用时空相关性, 实现高可信度的场景生成^[97]。现有研究多运用迁移学习实现风电场出力场景生成, 结合相邻风电场的数据训练模型并迁移到目标域, 能够对目标域中的

风速进行较好的模拟^[98]。

基于迁移学习的极端场景的生成方法要求“源域”与目标域在新能源资源、气象条件等方面应当具有较强的相似性^[99-100]。因此,当前基于迁移学习的极端场景生成技术适用范围仅为新能源场站,适用于更大范围内的迁移学习技术还有待进一步研究。此外,现有的应用于场景生成的迁移学习方法以样本迁移^[101]为主,而在极端场景集样本不充裕的前提下样本迁移难以达到良好的效果,因此可研究融合 EVT 并通过特征迁移、参数迁移等方法生成极端场景的技术。

2.2.3 气候模型模拟法

新能源、水电等一次能源及负荷均与气象因素紧密耦合。基于气候模型可对区域内的长期气象变化进行模拟从而推算得到较为精准的负荷序列以及新能源出力序列^[102]。因此基于气候模型模拟从而生成极端场景,在持续高/低温、极热无风、极寒无光等极端场景的模拟中均具有良好的模拟效果。

气候模型的三大核心要素为:气候再分析数据集、气候变化模型以及气候变化场景。气候再分析数据集包含全球多年气象信息,为气候变化模型模拟出未来多年的气象变化提供了基础数据支撑,现有的研究中广泛采用欧洲中期天气预报中心发布的 ERA5 数据集^[103]与 NASA 推出的 MERRA-2^[104];气候变化模型可分为全球气候模型(global climate model, GCM)与区域气候模型(regional climate model, RCM)模型,前者代表性模型包括 CanESM2(加拿大)、MIROC5(日本)、EC-EARTH(欧洲)、HadGEM2-ES(英国)等^[105],均可提供全球范围内的气候信息;但具体到某一研究地区,GCM 仅能提供 10²km 级别的分辨率,对于区域级极端场景

模拟而言难以满足微观尺度上的模拟需求,因此可通过 RCMs 进行动态降维,提升极端场景模拟的可靠性^[106],当前应用的代表性 RCM 模型主要为 RCA4 与 CCLM4-8-17;在气候模型应用过程中往往考虑中长时间尺度的气候变化,因此在对未来气候的模拟中引入不同的气候变化场景,从而更全面地分析未来极端天气事件,当前广泛使用的气候变化场景由 CMIP 发布,其中 CMIP5 提出的代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCP)^[107]以及 CMIP6 提出的共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSP)^[108]已经应用于极端气象事件的模拟当中。

气候模型模拟法是一种极具潜力的极端场景生成方法,具有解释性强、模拟场景丰富以及不受系统历史极端场景样本限制的优势,未来有望与电力系统融合提供气象数据支撑。但气候模型模拟方法仅适用于分析气象因素引起的极端场景,对于燃煤价格上涨、市场波动以及政策因素等社会因素造成的极端场景难以做出模拟;同时,由于气候再分析数据集提供的分辨率以及时间尺度有限,对于研究区域、时间尺度更小的极端场景难以发挥作用。

综上,总结了小样本模拟方法、迁移学习以及气候模型模拟法 3 种间接的极端场景生成思路,均能够在电力系统历史运行数据或电力系统极端场景样本匮乏的前提下发挥一定的作用,3 种方法之间的对比如表 4 所示。

3 极端场景在电力系统中的应用

在电力电量平衡视角下研究极端场景在不同领域的应用,对于增强系统应对极端场景的能力具有十分重要的意义。

表 4 极端场景间接模拟生成方法对比

Table 1 Comparison of methods for indirect simulation generation of extreme scenarios

生成方法	实现流程	适用场景	优势	不足
小样本模拟方法	基于现有场景集建立概率化场景模型; 重要性采样:使用新概率分布代替原始分布提升极端场景出现概率; 子集模拟法:将极端场景分解为一些列条件概率提升条件概率数值; 拆分方法:通过设置子集,分支、筛选、逼近小概率极端场景。	单一不确定性因素下的 极端场景模拟; 无需标签信息的 极端场景模拟。	降低了获取极端场景样本所 耗费的采样时间与计算成本; 模拟极端场景类型丰富, 不受标签信息限制; 可近似地对极端场景出现 概率(重现期)进行估计。	无法模拟生成多重 不确定性 因素联合极端场景; 具有统计学意义上的 完备性,对于 系统实际运行场景的 考虑有所欠缺。
迁移学习	获取“源域”极端场景样本或 概率化模型; 确定从“源域”到目标域之间的 映射方法。	“源域”极端场景样本充足; “源域”与“目标域”在待迁 移场景指标上具有相关性。	可信度高; 不受时间尺度限制。	要求“源域”与“目标域” 具有高相关性; 对“源域”数据质量的 依赖性强。
气候模型 模拟	获取全球气候再分析数据集; 确定调用的 GCM 以及对应的 RCM; 选择气候变化场景(RCP/SSP)并进行气象模拟; 将气象数据转换为风电、光伏、水电或负荷数据。	长时间尺度极端场景; 气象因素驱动下的极端场景; 范围较大的极端场景。	可解释性强; 可模拟场景丰富; 不受历史极端场景样本 数目限制。	仅限于气象因素驱动的 极端场景;时间尺度 最低为小时级;区域分辨 率无法进一步缩小。

3.1 极端场景在电力系统中的应用方法

电力系统中引入极端场景进行优化分析计算本质上为不确定性优化。其中对于极端运行场景的考虑可分为以下 3 种模式: 1) 时序场景方法。优化过程中通过多次抽样模拟得到海量包含极端场景与典型场景的离散概率场景集合, 将不确定性优化模型转换为多个确定性优化; 2) 连续概率分布方法。基于某一时间断面的精确概率分布, 采用机会约束模型充分考虑部分出现概率较小的极端场景; 3) 不确定性区间方法。取场景集边界形成不确定性区间, 构建不确定性集合, 考虑最恶劣场景。上述 3 种极端场景应用方法及基本模型见图 2。

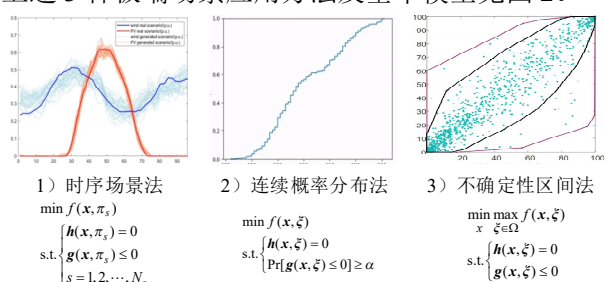


图 2 极端场景在电力系统中的应用方法
Fig. 2 Extreme scenario application methods in power systems

在实际工程应用中, 时序场景方法具有足够的鲁棒性, 求解效率高又不至于太过保守^[109], 但需要避免场景缩减极端场景信息丢失; 连续概率分布方法充分考虑了极端场景的小概率特性使得优化结果更经济, 但在考虑多重不确定性因素的前提下机会约束难以转化为确定性约束, 因而求解困难^[35]; 不确定性区间方法给出的决策结果具有强鲁棒性, 能够适应极端场景强不确定性带来的平衡风险, 然而相较于前 2 种考虑极端场景的优化方法而言决策过于保守, 可考虑引入保守性降低策略压缩不确定性区间, 提升极端场景应对的经济性^[110]。

3.2 极端场景的理论与实际应用

综合当前对电力系统极端场景的研究进展, 总结了电力电量平衡视角下极端场景在不同领域中的应用, 对于增强系统应对极端场景的能力具有十分重要的意义。

1) 电力系统运行方式安排。

根据极端场景的时间尺度不同, 在制定“多年-年-月-日”不同运行方式时需要引入不同类型极端场景^[111]。在多年/年运行方式安排过程中需要兼顾长期极端场景(一次能源供应量、新能源出力、来水丰枯、负荷增长等)与短期极端场景(基于一定概率体现在部分时段); 在年运行方式与月运行方式之间

开展针对潜在极端场景的专题分析^[112](如: 迎峰度夏、迎峰度冬、大负荷方案等); 周/日运行方式中则突出转折性事件带来的影响考虑新能源与负荷预测偏差。

引入极端场景制定运行方式时, 对可调整边界在极端场景下做出调整有两种方法^[102]: 设定可接受的电力电量平衡缺口, 以此为基础寻求可调整边界的最小化调整, 并作为系统基本运行方式; 电力电量平衡裕度最大化, 对可调整边界做大幅度调整以确保极端场景下系统可靠运行, 并作为应急运行方式。

2) 电力系统调度运行。

实际调度过程中极端场景需要纳入日前机组组合(unit commitment, UC)与日内经济调度(economic dispatch, ED)中, 保证电力电量实时平衡。

UC 问题上, 文献[47, 113-114]聚焦于风电的强随机性与波动性, 引入极端场景建立不确定性 UC 模型, 采用多场景随机优化方法求解; 文献[55]提出以削减后的典型场景和极端边界场景为输入的 UC 两阶段优化模型以降低模型计算量; 文献[115]提出了在不同区域、不同季节的极端场景下采用花费-损失比进行不确定性机组组合决策的方法, 优化了 UC 问题应对极端场景的决策方法。ED 问题方面, 文献[116-117]研究了极端风电场景下的随机经济调度问题, 分别提出了场景的精细化分类与增量近端松弛法的拉格朗日松弛法实现了模型求解, 均有效提升了系统对多类型风电极端事件的应对能力。电动汽车、储能装置、需求响应等可调节资源接入带来了更大的不确定性, 文献[118]提出考虑风电极端场景和需求响应的经济调度模型, 基于机会约束描述日内风电预测误差优化系统日内备用容量; 文献[119]则基于分布式鲁棒优化策略优化了极端场景下系统发电成本、电动汽车运营成本和预期发电机组可调成本。

UC 与 ED 问题时间尺度较短, 在极端场景的考虑上重点关注新能源预测误差大引起的供应与消纳可靠性不足。因此在考虑极端场景的过程中可结合数值天气预报、灾害预警等信息预先评估极端场景出现的可能性, 无需盲目地选择最极端的情况制定 UC、ED 策略。同时, 可将引入极端场景的 UC、ED 策略制定为预案, 在触发平衡预警后启用调度预案, 尽可能减小极端场景强不确定性对电力电量平衡的影响。

面对可再生能源渗透率的持续提升, 极端场景下系统运行安全风险加剧。采用安全约束的机组组

合(security constraint unit commitment, SCUC)与安全约束经济调度(security constraint economic dispatch, SCED)得到机组开组合及分时发电出力曲线,同时通过电力平衡校核与安全稳定校核可避免极端场景下电力供应、调峰安全、断面越限、功率缺额等多重风险。文献[120]考虑了水电极低出力场景下的系统 OPF 模型,降低了系统的损失以及燃料成本;文献[121-122]针对风电的不确定性建立风电极端场景集,分别考虑通过网络重构的方式消除线路过载以及在 AC/DC 混合电网中也通过直流线路的调节能力应对风电的不确定性;文献[123]则研究了极端降水场景下最优切负荷策略以保证线路潮流约束。电力系统极端场景下新的运行风险亟待开展前瞻研究,例如:当前调度策略中直流潮流作网络约束情形下忽略无功功率与电压约束现象较为普遍,研究有功-无功协同优化调度模型及其高效求解算法可减小极端场景下的母线电压越限风险^[124]。

3) 电力系统规划设计。

传统电网规划方法由于未考虑电力系统运行中的各种极端场景,因此当出现超出传统规划假设的约束方式边界时会造成较大的供应与消纳缺口,难以适应新型电力系统“源-荷”双侧强不确定性^[125]。

文献[33]在发电机组容量规划中引入 X 个极端日,验证多个极端场景的引入会加大系统容量投资的成本,但同时也提升了系统规划鲁棒性;文献[126-127]在输电线路扩展规划中引入“风电-负荷”联合极端场景,基于潮流约束以及 $N-1$ 安全约束下求解出最优的规划策略,保证规划结果在最小投资成本下适应风电波动;文献[128]基于系统历史 10 年中的极端场景,研究了电力电量平衡约束下储能与光伏发电协同优化配置策略;此外,在配电网规划^[129-130]、信息物理系统规划^[131]中均可引入极端场景改进基于典型场景下的系统规划配置结果。同时,重点关注极端场景下系统的灵活性与充裕性问题,基于随机生产模拟或时序生产模拟分析规划结果在多类型极端场景下的灵活性与充裕性缺口。文献[1]通过时序生产模拟技术对 2060 年南方区域枯水期高负荷、风光持续低出力极端场景进行模拟,量化评估了系统整体电源装机容量充裕性缺口;文献[132-134]分别通过精细刻画备用储备、调峰储备以及分钟级响应资源等途径,引入极端场景评估系统灵活性。随着可再生能源渗透率的提升,系统面临的极端场景变得复杂多样,系统规划转向“源网荷储”多环节协同规划^[135],提升对电力系统规划灵活性与充裕性的关注,以更好地统筹功率调节与

能量调节的需求。

鉴于极端场景 HILP 特性,如何在规划过程中引入极端场景仍然没有合理的解决方案;综合风险等级、发生频率(重现期)、持续时间等指标引入多类型极端场景,使规划区域内的电力系统在应对风险较小的极端场景时具备充足灵活性与充裕性,风险较大的极端场景下系统不至于遭受重大损失,是未来将极端场景引入规划模型的一种思路。

4 极端场景的应对策略

4.1 电力电量平衡预警及其共性关键技术

新型电力系统建设背景下,电力电量平衡过程由确定性转向概率性^[136]，“源网荷储”各侧不确定性因素增多,基于概率化平衡理论构建多重不确定性因素下的系统电力电量平衡预警与决策平台,面向时间、空间和多层次等维度需求实现对极端场景的提前感知和充分应对,具体构建策略及共性关键技术研究框架见附录 A 图 A1。

时间维度上,需要从建立年-月-周-日级多时间尺度电力电量平衡预警机制,多时间尺度滚动平衡分析、逐级测算平衡能力等方面,为调度部门对于极端场景决策部署提供依据。空间维度上,研究“网-省-地”三级协同的电力电量平衡预警机制^[111]。网级系统部署区域协同电量分析预警平台,应对全网级别的极端场景由网级系统直接做出平衡安排,各省级调度中心负责执行;省级系统部署省内协同电量平衡分析预警平台,针对省级极端场景时下属地调度中心采取平衡裕度管控与平衡能力提升措施,同时可向网级系统申请跨省区支援。构建多层次分级电力电量平衡预警机制^[2, 12],建立反映电力电量供应失衡风险状况的监测指标体系以及系统运行风险评价模型,根据历史运行数据及当下系统运行特征、参数,合理确定各项预警指标阈值,主动评估电网面临极端场景的风险等级^[17],在保证经济性的前提下将极端场景对电力电量平衡的影响降至最小。

同时,电力系统电力电量平衡预警与决策平台的构建以下列技术为支撑:

1) 研究新能源、传统一次能源以及负荷等不确定性因素多时间尺度高精度预测技术。重点提升爬坡事件等转折性事件、转折点预判以及长时间尺度新能源预测精度,降低极端天气下新能源预测误差,为系统运行方式的安排提供充足的应对能力。

2) 研究多时间尺度电力电量平衡分析与预警技术。应用大数据、人工智能等技术对极端场景生

成、模型高精度约束下加速求解、应急决策提供技术支持^[11]; 量化系统运行的安全运行区间及边界, 并依靠多维度运行风险评估体系针对极端场景下的保供与保消纳风险及时做出快速预警和决策^[136]。

3) 研究概率化平衡视角下的电力系统优化理论与决策技术。确定性、集中式的优化求解策略须向多场景、高维不确定性、分布式优化策略转变^[137], 将概率化模型应用于调度、规划等实际情境中, 在确保供应与消纳的同时兼顾低碳、经济, 形成适用于应对极端场景的优化分析理论体系。

4.2 运行调度层面

电力系统运行调度环节应对极端场景的关键在于提升系统灵活运行能力^[37, 138], 具体应对策略框架见附录图 A2。

1) 在应对不同类型极端场景时, 可充分挖掘新兴灵活性调节资源潜力, 发挥需求侧响应、虚拟电厂、电动汽车和各种新型储能等灵活性资源快速调节潜力^[1], 并进一步挖掘响应时间较长的可调节负荷资源^[19]。根据灵活性资源的动态响应特性, 研究多元灵活性资源聚合调控机制与分层聚合的灵活性资源调用框架, 构建可调节负荷资源聚合应用技术体系^[136]。建立多区域灵活性互济机制, 发挥电网侧灵活性的优势, 从传统的单向输电转向灵活性互济, 推广跨区电能量互济、跨省跨区协同消纳等新模式。

2) 研究灵活备用机制。我国电力系统新兴灵活调节资源缺口大, 短期内应对极端场景的手段仍然以预留足够的备用容量为主。西北电网采用基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法^[139], 兼顾电网安全与新能源消纳有效降低常规机组开机, 在风险约束下降低了系统运行成本。而对于寒潮、台风等会造成新能源机组切机风险的极端风险, 可制定详细的备用预案, 通过主动降低新能源机组出力、启动部分火电机组作为备用应对新能源出力骤降带来的保供风险^[140], 这一做法在爱尔兰电网中已有成熟的应用。

3) 研究数据驱动的电网前瞻经济调度(data-driven look-ahead economic dispatch, DDLAED)技术^[141]。数据驱动的优化调度方法可利用深度强化学习实现具有高效自适应能力的电网调度, 以增强调度决策对电网极端运行场景的适应性。目前基于数据驱动的电网前瞻调度有功巡航路径自适应优化软件已部署于多个省级电网, 该系统具有滚动推演电网不确定运行场景、制订适应所有潜在运行场景的发电计划和负荷调整方案的功能^[142], 在极端

场景下的日内调度阶段相较于传统调度员决策更具高效性、鲁棒性。然而应对训练样本中从未出现过的极端场景时, DDLEAD 决策的泛化性能还需要进一步提升。

4.3 规划设计层面

传统规划方法难以适应新型电力系统“源荷”双侧的高度不确定性。因此在未来建设能应对极端场景的电力系统时, 通过“源网荷储”规划确保容量充裕, 同时保证极端场景下灵活调节能力的可用性, 具体应对策略框架见附录图 A3。

1) 从源侧规划来看, 应对极端场景的规划应确保灵活性电源配置与爬坡需求相适应, 同时注重多元化能源供应, 依靠“多能互补”减少对单一能源的依赖, 研究风光水储耦合互补系统、用户侧综合能源供应等技术^[24, 143], 提高电力系统的电源规划灵活性。

2) 引入极端场景进行输电线路扩展规划, 提升极端场景下输电通道利用率; 借鉴欧洲电网(德国通过 65 条交直流线路与欧洲 12 国互联^[144], 爱尔兰与英国电网跨境互联^[145]并计划接入欧洲大陆电网)与乌拉圭电网(3 条与阿根廷之间的联络线以及 2 条与巴西之间的联络线)等新能源高占比电力系统转型经验, 打通电网侧互联互通渠道, 利用不同联络线区域之间的资源禀赋优势保障系统实时平衡与稳定运行, 同时基于大电网支撑实现极端场景下的跨省跨区支援与协同消纳。

3) 考虑可调节负荷与多类型储能在应对极端场景时的支撑作用^[19], 在规划过程中充分计及电动汽车、温控负荷、工业高载能负荷等在极端场景下对电力电量平衡的影响, 合理配置跨季节储能、制氢等长时间储能^[1, 146]以应对持续性极端场景, 并利用好 DR 这一手段实现极端场景下“源荷互动”, 完善需求响应资源库、时序响应资源清单以及相应补偿机制^[112]。

4) 引入极端场景进行电力系统规划过程中, 避免“围绕”极端场景来进行规划, 而应当“放大”极端场景对系统电力电量平衡的影响以兼顾系统整体规划结果的经济性与充裕性^[57]。统筹预防“容量不足”场景与“能量不足”场景^[24], 考虑电力峰值需求、可再生能源连续多日低出力或瞬时剧烈波动等极端场景, 将其额外添加到规划场景集中, 确保规划方案满足极端场景下的运行约束^[56]。

4.4 市场交易层面

电力市场具有优化资源配置的作用。当前各省均已较为成熟的电力市场交易机制, 但由于各省

电源结构、负荷特性以及面临的系统极端场景各异,还需要在应对极端场景时做出针对性设计,避免极端场景发生时的“市场失灵”问题,具体应对策略框架见附录图 A4。

1) 在市场框架的架构方面,鼓励多元化主体进入市场以增加市场的竞争性,包括分布式新能源、新型储能、负荷聚合商及虚拟电厂等,扩大交易规模,增加市场的竞争性和灵活性^[138];针对系统极端场景下多样化的调节需求,建立完善的辅助服务市场,提供调频、备用、黑启动等辅助服务,尤其在新能源占比高的地区探索建立快速频率响应、快速爬坡等辅助服务产品^[147],丰富市场化的短期灵活性交易品种^[148]。

2) 在市场交易方面,统筹建立容量成本回收机制、跨省区市场交易机制以及灵活调节资源的市场化参与机制。现有市场机制无法有效引导各主体积极调整用电行为,造成电力资源无法实现合理配置^[149],因此,须在新能源占比持续提升、煤电利用小时数下降的情形下,落实煤电机组容量补偿机制^[150-151],保障煤电主体收益稳定以及在应对极端场景时发电容量充裕,逐步探索市场化容量成本回收方案。借鉴美国西部能量不平衡市场(west energy imbalance market, WEIM)与欧洲统一电力市场建设经验推进全国统一电力市场建设,优化省内市场与省间市场衔接过程^[152],提升区域间的灵活性互济能力,建立跨区备用、调峰、爬坡互济机制,以提升区域电网对极端场景的承受能力^[153]。根据各种灵活性资源的动态响应特性与调节特性设计合理的市场交易机制以及价格补偿机制^[2],落实需求响应的分级响应价格补偿标准形成长效激励^[14],激发灵活性资源主体发挥调节潜力并主动参与调节;同时尝试进一步挖掘非规模化主体的响应潜力,在供需紧张时段提供灵活性支撑(如:英国 ESO 推出的 DFS)。

3) 在市场运行层面,在电力现货市场仿真模拟时设置多类型极端场景^[154],包括新能源及负荷预测偏差、母线负荷快速爬坡、新能源大幅度波动等电力电量平衡极端事件,分析各市场主体的行为,从短期/长期安全性指标、发电/输电容量充裕度指标以及市场风险等级等多维度评估市场环境系统能否安全稳定运行,避免市场在极端场景下“失灵”。引入可靠性机组组合环节修正 SCUC 结果,通过市场化 UC 出清前基于最新边界条件设置必开必停约束^[155]或新增开机(非市场化机组)、停机机组^[156],保证极端运行场景下电网安全稳定运行、电力有序供应与清洁能源消纳^[157]。对电力供

需风险、市场价格异常风险以及安全运行风险加强监控预警,制定各类市场风险处置预案^[16],结合市场运行实际采取临时终止市场运行、终止规则执行以及价格管制等措施维持市场在极端场景下平稳运行^[158]。在市场化手段均已用尽仍未完全解决问题时,在日前-日内阶段按照“网-网”方式开展兜底保障措施,执行应急调度计划,保障供应促进新能源消纳^[159]。

5 结论与展望

本文从高比例可再生能源接入电力系统运行极端场景视角下,首先归纳了电力系统极端场景的定义,梳理了极端场景与极端事件、最恶劣场景之间的关系,总结了极端场景集的构建方法;针对极端场景小概率的特性,从直接生成与间接生成方法上总结了极端场景的生成策略;应用层面上,归纳了极端场景在电力系统中的应用方法以及在运行方式制定、运行调度与中长期规划中的具体应用;从系统设计、调度运行、规划设计以及市场交易等层面展望了未来电力系统在应对极端场景时可以进一步采取的措施。对电力系统极端场景的后续研究可从以下方面着手:

1) 在引入极端场景进行优化或运行模拟时,需兼顾系统运行规划经济性与灵活、充裕性需求,引入“成本-效益”分析进行辅助决策。

2 “源-荷”多重不确定性,研究“模型-数据”联合驱动方法并建立面向多重随机因素的基于电力系统实际运行情况的极端场景模型。

3) 研究小样本下的极端场景生成策略,应用数据增强技术基于有限的极端场景样本扩充极端场景集,融合地理、气象、市场、政策等多维度知识提升生成场景的可信度。

4) 综合生成场景多维度评价指标(相关性度量、统计指标度量等)、时序生产模拟、随机生产模拟等方法验证场景的极端性,避免模拟生成的极端场景呈现冗余特性。

5) 将中长时间尺度的极端场景引入电力电量平衡分析中,满足日级以上电力系统供需平衡和安全充裕的需求,同时弥补当前平衡分析中仅考虑日内调峰问题的不足,对极端场景下深度调峰、跨日乃至多日调峰难题开展前瞻研究。

6) 关注可再生能源渗透率提升极端场景带来新的平衡问题,如:网络受限与机组非停限出力等。进一步研究极端场景下传统一次能源与电网侧不确定性的建模方法提升平衡计算的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 饶宏, 卢斯煜, 卓映君, 等. “双碳”目标下南方区域新型电力系统重点问题研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 74-83.
RAO Hong, LU Siyu, ZHUO Yingjun, et al. Key problems of new power systems in the southern region towards carbon peak and carbon neutrality[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 74-83(in Chinese).
- [2] 任景, 高敏, 程松, 等. 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 66-78.
REN Jing, GAO Min, CHENG Song, et al. A balance method for power supply-demand adapting to high uncertainties of renewable energy in northwest power grid[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 66-78(in Chinese).
- [3] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32-43.
GUO Jianbo, WANG Tiezhu, LUO Kui, et al. Development of new power systems: challenges and solutions[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32-43(in Chinese).
- [4] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515-523.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-523(in Chinese).
- [5] 倪宇凡, 郑漳华, 冯利民, 等. 近年来国外严重停电事故对我国构建新型电力系统的启示[J]. 电器与能效管理技术, 2023(5): 1-8.
NI Yufan, ZHENG Zhonghua, FENG Limin, et al. Power outages abroad in recent years and lessons to build new power system in China [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(5): 1-8(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 邹洋, 王剑晓, 戴璟, 等. 欧洲能源危机成因、影响与应对措施[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 1-13.
ZOU Yang, WANG Jianxiao, DAI Jing, et al. Causes, impacts and mitigation measures of european energy crisis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 1-13(in Chinese).
- [8] 赵紫原. “西电东送”面临新形势云南加快新型电力系统建设[J]. 中国电力企业管理, 2023(28): 53-55.
ZHAO Ziyuan. “Western Electricity Sent East” faces a new situation, Yunnan to speed up the construction of a new type of power system[J]. China Power Enterprise Management, 2023(28): 53-55(in Chinese).
- [9] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15.
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15(in Chinese).
- [10] LI Hui, REN Zhouyang, FAN Miao, et al. A review of scenario analysis methods in planning and operation of modern power systems: methodologies, applications, and challenges[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 205: 107722.
- [11] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网报告 2023[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [12] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4517-4537.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4537(in Chinese).
- [13] 侯恺, 刘泽宇, 贾宏杰, 等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710(in Chinese).
- [14] 朱瑞, 刘卓然, 靳晓凌, 等. 欧洲能源危机下英国电网电力保供措施对中国的借鉴启示[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 177-184.
ZHU Rui, LIU Zhuoran, JIN Xiaoling, et al. Inspiration of the UK ESO power supply sustainability measures under european energy crisis to China power system operator[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 177-184(in Chinese).
- [15] 陈皓勇. 破解“能源不可能三角”: 欧洲能源危机应对及其启示[J]. 风能, 2023(10): 8-12.
CHEN Haoyong. Cracking the “impossible energy triangle”: Europe's energy crisis response and its implications[J]. Wind Energy, 2023(10): 8-12(in Chinese).
- [16] 陈启鑫, 吕睿可, 唐庆虎, 等. 从澳大利亚现货市场暂停事件看电力市场紧急状态应对[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 214-223.
CHEN Qixin, LYU Ruikuo, TANG Qinghu, et al. Emergency response of electricity market from perspectives of suspension of spot market in Australia[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(16): 214-223(in Chinese).
- [17] 闫景皓, 黄越辉, 卢慧, 等. 爱尔兰岛高比例新能源电力系统运行经验与启示[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 498-508.
YAN Jinghao, HUANG Yuehui, LU Hui, et al. Operating experience and insights from high penetration renewable energy power systems in the irish island[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 498-508(in Chinese).
- [18] AESO. AESO 2023 Reliability requirements roadmap[EB/OL]. (2023-03-10) [2023-12-26]. <https://www.aeso.ca/future-of-electricity/reliability-requirements-roadmap/>.
- [19] 韩凝晖, 周颖, 石坤, 等. 面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 70-76.
HAN Ninghui, ZHOU Ying, SHI Kun, et al. Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power system [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 70-76(in Chinese).
- [20] 电力规划设计总院, 国际能源署. 中国电力系统转型报告[R]. 北京: 电力规划设计总院, 2019.
- [21] 戴小河, 朱涵, 吴涛, 等. 多地为何“拉闸限电”? 后续电力供应能否保障?[N]. 新华每日电讯, 2021-09-29(05).
- [22] 马晨晨, 吴斯旻. 火电缺煤, 风电“看天吃饭” 东北巨大电力缺口待填补[N]. 第一财经日报, 2021-09-29(A06).
- [23] 陈靖斌. 限电潮下广东错峰用电保供[N]. 中国经营报, 2021-10-18(B17).
- [24] 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(in Chinese).
- [25] 苏伟. 透视山西实时现货市场熔断[J]. 中国电力企业管理, 2021(10): 9.
SU Wei. Perspective on the Shanxi real-time spot market meltdown[J]. China Power Enterprise Management, 2021(10): 9(in Chinese).
- [26] BOSTON A, BONGERS G D, BONGERS N. Characterisation and mitigation of renewable droughts in the Australian National Electricity Market[J]. Environmental Research Communications, 2022, 4(3): 031001.

- [27] LI Haibo, LIN Yisha, LU Zongxiang, et al. Long duration flexibility planning challenges and solutions for power system with ultra high share of renewable energy[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2022, 9: 412-424.
- [28] 梁志峰, 秦放, 崔方. “6·21”日环食对光伏发电及电网运行影响分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 1-7.
LIANG Zhifeng, QIN Fang, CUI Fang. Impact analysis of annular solar eclipse on June 21, 2020 in China on photovoltaic power generation and power grid operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 1-7(in Chinese).
- [29] XU Zhicheng, LU Gang, ZHAO Jiujin, et al. Multi-scenario generation technology considering extreme scenarios in energy system modeling[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546: 022057.
- [30] 吴文传, 许书伟, 杨越, 等. 风险量化的高比例新能源电力系统概率调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 3-11.
WU Wenchuan, XU Shuwei, YANG Yue, et al. Risk-quantified probabilistic dispatch for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 3-11(in Chinese).
- [31] TEICHGRAEBER H, KÜPPER L E, BRANDT A R. Designing reliable future energy systems by iteratively including extreme periods in time-series aggregation[J]. Applied Energy, 2021, 304: 117696.
- [32] TEICHGRAEBER H, LINDENMEYER C P, BAUMGÄRTNER N, et al. Extreme events in time series aggregation: a case study for optimal residential energy supply systems[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115223.
- [33] LI Can, CONEJO A J, SIROLA J D, et al. On representative day selection for capacity expansion planning of power systems under extreme operating conditions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137: 107697.
- [34] ZHOU Bo, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Partial-dimensional correlation-aided convex-hull uncertainty set for robust unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2434-2446.
- [35] 林舜江, 冯祥勇, 梁炜焜, 等. 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J/OL]. 电力系统自动化, 2023: 1-22[2024-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231127.1458.002.html>.
LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, LIANG Weikun, et al. Research and prospect of the uncertain optimal dispatch methods for renewable energy power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-22[2024-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231127.1458.002.html>(in Chinese).
- [36] WANG Yi, ROUSIS A O, STRBAC G. On microgrids and resilience: a comprehensive review on modeling and operational strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110313.
- [37] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6783.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6783(in Chinese).
- [38] TEICHGRAEBER H, BRANDT A R. Time-series aggregation for the optimization of energy systems: goals, challenges, approaches, and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 111984.
- [39] 周金辉, 余贻鑫, 曾沅. 大规模风电接入下输电网扩展规划的启发式优化算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 66-70.
ZHOU Jinhui, YU Yixin, ZENG Yuan. Heuristic optimization algorithm for transmission network expansion planning with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 66-70(in Chinese).
- [40] DU Nianchun, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Hosting capacity assessment in distribution networks considering wind-photovoltaic-load temporal characteristics[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 767610.
- [41] ZHANG Yachao, AN Xueli, WANG Chao. Data-driven two-stage stochastic optimization model for short-term hydro-thermal-wind coordination scheduling based on the dynamic extreme scenario set[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 27: 100489.
- [42] 许彦平, 白婕, 施浩波, 等. 基于凸包算法的极端运行方式提取方法[J/OL]. 中国电力, 2023: 1-9[2024-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231222.1743.014.html>.
XU Yanping, BAI Jie, SHI Haobo, et al. Extreme operation mode extraction method based on convex hull algorithm[J/OL]. Electric Power, 2023: 1-9[2024-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231222.1743.014.html>(in Chinese).
- [43] 刘俊磊, 刘新苗, 卢洵, 等. 高比例新能源系统供需平衡分析方法和对策[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2711-2724.
LIU Junlei, LIU Xinmiao, LU Xun, et al. Analysis methods and countermeasures of supply and demand balance of high proportion of new energy system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2711-2724(in Chinese).
- [44] 宋福龙, 吴洲洋, 张艳, 等. 大规模风电下基于模糊场景聚类的网-储协调规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 74-80.
SONG Fulong, WU Zhouyang, ZHANG Yan, et al. Fuzzy scene clustering based grid-energy storage coordinated planning method with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 74-80(in Chinese).
- [45] 李春燕, 赵晨宇, 胡博, 等. 面向可靠性评估的两阶段聚类风-光-荷典型场景生成方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(5): 1-9.
LI Chunyan, ZHAO Chenyu, HU Bo, et al. Two-stage clustering algorithm of typical wind-PV-load scenario generation for reliability evaluation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(5): 1-9(in Chinese).
- [46] 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.
- [47] ZHU Xin, YU Zongchao, LIU Xuan. Security constrained unit commitment with extreme wind scenarios[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(3): 464-472.
- [48] ZATTI M, GABBA M, FRESCHINI M, et al. k-MILP: a novel clustering approach to select typical and extreme days for multi-energy systems design optimization[J]. Energy, 2019, 181: 1051-1063.
- [49] LUO Kui, SHI Wenhui, WANG Weisheng. Extreme scenario extraction of a grid with large scale wind power integration by combined entropy-weighted clustering method[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 140-148.
- [50] 代江, 田年杰, 单克, 等. 基于极端场景分析的中长期交易校核方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 65-71.
DAI Jiang, TIAN Nianjie, SHAN Ke, et al. Long and medium-term power market security check based on extreme scenario analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 65-71(in Chinese).
- [51] 张帅, 刘文霞, 万海洋, 等. 基于改进条件生成对抗网络的可控场景生成方法[J/OL]. 电力自动化设备, 2024: 1-11[2024-04-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312038>.
ZHANG Shuai, LIU Wenxia, WAN Haiyang, et al. Controllable scenario generation approach based on improved conditional generative adversarial network[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2024: 1-11[2024-04-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312038>(in Chinese).
- [52] 高红均, 郭明浩, 刘挺坚, 等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2683-2696.

- GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, et al. Review on electric power and energy balance analysis of new-generation power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2683-2696(in Chinese).
- [53] 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.
- [54] 汪际锋, 陈贺, 张勇, 等. 电网运行风险管理的基础研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 1-8.
- WANG Jifeng, CHEN He, ZHANG Yong, et al. Basic studies on risk management of power grid operation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 1-8(in Chinese).
- [55] 孟安波, 马留洋, 殷豪. 考虑风电的电力系统机组组合两阶段优化方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(7): 8-15, 35.
- MENG Anbo, MA Liuyang, YIN Hao. Two-stage optimization method for unit commitment of power system considering wind power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(7): 8-15, 35(in Chinese).
- [56] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580.
- LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580(in Chinese).
- [57] ZHAO Pengfei, XU Xinzhi, DONG Xiaochong, et al. An adaptive decision-making approach for transmission expansion planning considering risk assessment of renewable energy extreme scenarios[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(18): 4107-4118.
- [58] 吴俊, 薛禹胜, 舒印彪, 等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化(三)多场景的备用优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 1-7, 76.
- WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part three reserve optimization in multiple scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 1-7, 76(in Chinese).
- [59] 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(in Chinese).
- [60] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133-141.
- BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 133-141(in Chinese).
- [61] DE MARILLAC CARVALHO M, SÁFADI T. Risk analysis in the brazilian stock market: copula-APARCH modeling for value-at-risk[J]. Journal of Applied Statistics, 2022, 49(6): 1598-1610.
- [62] 林顺富, 刘持涛, 李东东, 等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1409-1420.
- LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1409-1420(in Chinese).
- [63] OTERO N, MARTIUS O, ALLEN S, et al. A copula-based assessment of renewable energy droughts across Europe[J]. Renewable Energy, 2022, 201: 667-677.
- [64] MU Yunfei, WANG Congshan, CAO Yan, et al. A CVaR-based risk assessment method for park-level integrated energy system considering the uncertainties and correlation of energy prices[J]. Energy, 2022, 247: 123549.
- [65] SUN Mingyang, CREMER J, STRBAC G. A novel data-driven scenario generation framework for transmission expansion planning with high renewable energy penetration[J]. Applied Energy, 2018, 228: 546-555.
- [66] KLOUBERT M L. Probabilistic load flow approach considering dependencies of wind speed, solar irradiance, electrical load and energy exchange with a joint probability distribution model[J]. Energies, 2020, 13(7): 1727.
- [67] WU Han, YUAN Yue, ZHU Junpeng, et al. Assessment model for distributed wind generation hosting capacity considering complex spatial correlations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1194-1206.
- [68] SHE Zhenyan, HUANG Liyan, CAI Huayang, et al. Detecting human interventions by spatial dependence of extreme water levels using a high dimensional conditional probability approach over the Pearl River Delta[J]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129681.
- [69] CAMAL S, TENG F, MICHIORRI A, et al. Scenario generation of aggregated Wind, Photovoltaics and small Hydro production for power systems applications[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1396-1406.
- [70] 辛阔, 马骞, 许琴, 等. 基于月份划分与指定日类型的风电出力序列场景生成方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 151-161.
- XIN Kuo, MA Qian, XU Qin, et al. Wind power output sequence scenario generation method based on monthly division and specified day type[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 151-161(in Chinese).
- [71] JIN Jingxin, YE Lin, LI Jiachen, et al. Wind and photovoltaic power time series data aggregation method based on an ensemble clustering and markov chain[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 757-768.
- [72] LI Huarui, LI Changgang, LIU Yutian. Machine learning-based frequency security early warning considering uncertainty of renewable generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107403.
- [73] 马骞, 辛阔, 王子强, 等. 光伏出力序列场景生成新方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2023: 1-9[2024-04-20]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001370>.
- MA Qian, XIN Kuo, WANG Ziqiang, et al. A new method for scenario generation of daily photovoltaic output sequence[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023: 1-9[2024-04-20]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001370>(in Chinese).
- [74] ONWUEGBUCHE F C, KENYATTA A B, AFFOGNON S B, et al. Application of extreme value theory in predicting climate change induced extreme rainfall in kenya[J]. International Journal of Statistics and Probability, 2019, 8(4): 85-94.
- [75] SIGAUKE C, BERE A. Modelling non-stationary time series using a peaks over threshold distribution with time varying covariates and threshold: an application to peak electricity demand[J]. Energy, 2017, 119: 152-166.
- [76] LATIF S, SIMONOVIC S P. Nonparametric approach to copula estimation in compounding the joint impact of storm surge and rainfall events in coastal flood analysis[J]. Water Resources Management, 2022, 36(14): 5599-5632.
- [77] ZHAGN S, YANG Y, PEI W, et al. Resilience assessment of distribution network considering operation duration and operational risk[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. IET, 2020: 6.
- [78] BENTO A M, GOMES A, PÊGO J P, et al. Improved assessment of maximum streamflow for risk management of hydraulic infrastructures. A case study[J]. International Journal of River Basin Management, 2023, 21(3): 489-499.
- [79] XIA Bingbing, HUANG Qiyue, WANG Hao, et al. Wind power

- prediction in view of ramping events based on classified spatiotemporal network[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9: 754274.
- [80] WEI Hu, ZHANG Hongxuan, YU Dong, et al. Short-term optimal operation of hydro-wind-solar hybrid system with improved generative adversarial networks[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 389-403.
- [81] LIANG Junkai, TANG Wenyuan. Sequence generative adversarial networks for wind power scenario generation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(1): 110-118.
- [82] 刘雅婷, 杨明, 于一潇, 等. 基于多场景敏感气象因子优选及小样本学习与扩充的转折性天气日前风电功率预测[J]. *高电压技术*, 2023, 49(7): 2972-2982.
- LIU Yating, YANG Ming, YU Yixiao, et al. Transitional-weather-considered day-ahead wind power forecasting based on multi-scene sensitive meteorological factor optimization and few-shot learning[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7): 2972-2982(in Chinese).
- [83] 米阳, 卢长坤, 申杰, 等. 基于条件生成对抗网络的风电功率极端场景生成[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2253-2263.
- MI Yang, LU Changkun, SHEN Jie, et al. Wind power extreme scenario generation based on conditional generative adversarial network[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2253-2263(in Chinese).
- [84] YUAN Ran, WANG Bo, SUN Yeqi, et al. Conditional style-based generative adversarial networks for renewable scenario generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1281-1296.
- [85] CRAMER E, GORJÃO L R, MITSOS A, et al. Validation methods for energy time series scenarios from deep generative models[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 8194-8207.
- [86] 王守相, 陈海文, 李小平, 等. 风电和光伏随机场景生成的条件变分自动编码器方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1860-1867.
- WANG Shouxiang, CHEN Haiwen, LI Xiaoping, et al. Conditional variational automatic encoder method for stochastic scenario generation of wind power and photovoltaic system[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1860-1867(in Chinese).
- [87] 黄南天, 王文婷, 蔡国伟, 等. 计及复杂气象耦合特性的模块化去噪变分自编码器多源-荷联合场景生成[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(10): 2924-2933.
- HUANG Nantian, WANG Wenting, CAI Guowei, et al. The joint scenario generation of multi source-load by modular denoising variational autoencoder considering the complex coupling characteristics of meteorology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(10): 2924-2933(in Chinese).
- [88] ZHU Yuhong, ZHOU Yongzhi, XIA Yanghong, et al. Resilience-oriented extreme weather conditional renewable scenario generation based on diffusion models and few-shot learning[J]. *TechRxiv*, 2023.
- [89] LI Yang, LI Jiazheng, WANG Yi. Privacy-preserving spatiotemporal scenario generation of renewable energies: a federated deep generative learning approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(4): 2310-2320.
- [90] LI Xin, HE Yuchen, GUO Lunding, et al. Multi-year planning for the integration combining distributed energy system and electric vehicle in neighborhood based on data-driven model[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 140: 108079.
- [91] SHEN Pengyuan, BRAHAM W, YI Y. The feasibility and importance of considering climate change impacts in building retrofit analysis[J]. *Applied Energy*, 2019, 233-234: 254-270.
- [92] 董晓翀, 张姝, 李烨, 等. 电力系统中时序场景生成和约简方法研究综述[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 709-721.
- DONG Xiaochong, ZHANG Shu, LI Ye, et al. Review of power system temporal scenario generation and reduction methods[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 709-721(in Chinese).
- [93] 王亚运. 小概率事件的仿真与预测方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [94] WANG S P, CHEN A, LIU C W, et al. Rare-event splitting simulation for analysis of power system blackouts[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit: IEEE, 2011: 1-7.
- [95] PAN S J, YANG Qiang. A survey on transfer learning[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [96] REN Chao, XU Yan. Transfer learning-based power system online dynamic security assessment: using one model to assess many unlearned faults[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 821-824.
- [97] 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(in Chinese).
- [98] HU Jinxing, LI Hongru. A transfer learning-based scenario generation method for stochastic optimal scheduling of microgrid with newly-built wind farm[J]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 1139-1151.
- [99] 黄越辉, 孙亚南, 李驰, 等. 基于条件生成对抗网络的多区域风电短期出力场景生成方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 63-72.
- HUANG Yuehui, SUN Yanan, LI Chi, et al. Constructing method of short-term output scenarios for multi-regional wind power based on conditional generative adversarial network[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 63-72(in Chinese).
- [100] ZHANG Ning, KANG Chongqing, XU Qian, et al. Modelling and simulating the spatio-temporal correlations of clustered wind power using copula[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2013, 8(6): 1615-1625.
- [101] YU Shuang, VAUTARD R. A transfer method to estimate hub-height wind speed from 10 meters wind speed based on machine learning[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 169: 112897.
- [102] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1694-1705.
- LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1694-1705(in Chinese).
- [103] 刘泽洪, 周原冰, 金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(2): 101-112.
- LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(2): 101-112(in Chinese).
- [104] HÖLTINGER S, MIKOVITS C, SCHMIDT J, et al. The impact of climatic extreme events on the feasibility of fully renewable power systems: a case study for Sweden[J]. *Energy*, 2019, 178: 695-713.
- [105] SUSINI S, MENENDEZ M, EGUÍA P, et al. Climate change impact on the offshore wind energy over the North Sea and the Irish Sea[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 881146.
- [106] LAPRISE R. Regional climate modelling[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(7): 3641-3666.
- [107] ABDELAZIZ S, SPARROW S N, HUA Weiqi, et al. Assessing long-term future climate change impacts on extreme low wind events for offshore wind turbines in the UK exclusive economic zone[J]. *Applied Energy*, 2024, 354: 122218.
- [108] IBRAHIM N A, WAN ALWI S R, ABD MANAN Z, et al. Climate change impact on solar system in Malaysia: techno-economic analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113901.
- [109] 王长浩, 高红均, 周文毅, 等. 考虑准线需求响应的高比例新能源电力系统调度优化[J/OL]. *电网技术*, 2023: 1-10[2024-04-20].

- <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1598>.
WANG Changhao, GAO Hongjun, ZHOU Wenyi, et al. High proportion new energy power system scheduling optimization considering customer directrix line demand response[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-10[2024-04-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1598>(in Chinese).
- [110] 吴文传, 李志刚, 王中冠. 可再生能源发电集群控制与优化调度[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [111] 杨铃, 王建党, 杨续松, 等. 电力电量平衡分析及其加速求解技术的发展、应用与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 760-777.
YANG Qian, WANG Jianxue, YANG Xusong, et al. Development, application and prospect of power and energy balance analysis and its speedup computation technologies[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 760-777(in Chinese).
- [112] 中国电力圆桌项目课题组. 考虑气候风险的电力系统保供能力提升路径与机制研究报告摘要[EB/OL]. (2023-07-26) [2023-12-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2023-07-26/64c0be50d6865.pdf>.
- [113] 叶荣, 陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 29-33, 65.
YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 29-33, 65(in Chinese).
- [114] 钱峰, 冯昌森, 文福拴, 等. 计及安全约束的机组最优组合鲁棒优化方法[J]. 电力建设, 2017, 38(4): 18-25.
QIAN Feng, FENG Changsen, WEN Fushuan, et al. Robust optimization based security-constrained unit commitment[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 18-25(in Chinese).
- [115] WU Yuankang, WU Y C, CHANG Huiling, et al. Using extreme wind-speed probabilistic forecasts to optimize unit scheduling decision[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 818-829.
- [116] LIN Shunjiang, WU Hui, LIU Jie, et al. A solution method for many-objective security-constrained unit commitment considering flexibility[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 857520.
- [117] XU Jian, WANG Bao, SUN Yuanzhang, et al. A day-ahead economic dispatch method considering extreme scenarios based on wind power uncertainty[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 224-233.
- [118] TANG Chenghui, XU Jian, TAN Yushi, et al. Lagrangian relaxation with incremental proximal method for economic dispatch with large numbers of wind power scenarios[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2685-2695.
- [119] XU Haiyan, CHANG Yuqing, ZHAO Yong, et al. A new multi-timescale optimal scheduling model considering wind power uncertainty and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147: 108832.
- [120] LI Hongwei, LIU Hongpeng, MA Jianwei, et al. Distributionally robust optimal dispatching method of integrated electricity and heating system based on improved Wasserstein metric[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 151: 109120.
- [121] 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.
- [122] LI Shaoyan, WANG Liyuan, GU Xueping, et al. Optimization of loop-network reconfiguration strategies to eliminate transmission line overloads in power system restoration process with wind power integration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107351.
- [123] ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Data-adaptive robust unit commitment in the hybrid AC/DC power system[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113784.
- [124] ZHOU Gang, SHI Jianxun, CHEN Bingjing, et al. Risk assessment of power supply security considering optimal load shedding in extreme precipitation scenarios[J]. Energies, 2023, 16(18): 6660.
- [125] 李启峰, 邓长虹, 徐泰山, 等. 计及电压随机性的风光消纳能力评估方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(1): 71-79.
LI Qifeng, DENG Changhong, XU Taishan, et al. An evaluation method of wind-solar consumption capacity considering voltage randomness[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(1): 71-79(in Chinese).
- [126] 张玮, 白恺, 鲁宗相, 等. 特大型新能源基地面临挑战及未来形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 10-25.
ZHANG Wei, BAI Kai, LU Zongxiang, et al. Analysis of the challenges and future morphological evolution of super large-scale renewable energy base[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 10-25(in Chinese).
- [127] LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, et al. An extreme scenario method for robust transmission expansion planning with wind power uncertainty[J]. Energies, 2018, 11(8): 2116.
- [128] 薛海峰, 武晓云. 基于离散多目标蜻蜓算法和改进 FCM 的风电协调输电扩展规划研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 83-90.
XUE Haifeng, WU Xiaoyun. Extended planning of wind power coordinated transmission network based on discrete multi-objective dragonfly algorithm and improved FCM[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 83-90(in Chinese).
- [129] GUTIERREZ-GARCIA F, ARCOS-VARGAS A, GOMEZ-EXPOSITO A. Robustness of electricity systems with nearly 100% share of renewables: a worst-case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111932.
- [130] WANG Siyuan, BO Rui. A Resilience-oriented multi-stage adaptive distribution system planning considering multiple extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1193-1204.
- [131] 黄家祺, 张宇威, 贺继锋, 等. 一种考虑极限场景的配电网鲁棒扩展规划方法[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 67-74.
HUANG Jiaqi, ZHANG Yuwei, HE Jifeng, et al. A robust expansion planning method for distribution networks considering extreme scenarios[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 67-74(in Chinese).
- [132] ZHANG Yiwei, LI Chengze, WAN Haiyang, et al. Collaborative stochastic expansion planning of cyber-physical system considering extreme scenarios[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(10): 2419-2434.
- [133] 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(in Chinese).
- [134] 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 Jiao Tong University, 2021, 55(7): 802-813(in Chinese).
- [135] 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.
- [136] 郑扬威, 江岳文, 张金辉. 高比例风电渗透下考虑长短期储能的源-储-输联合规划优化[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 63-71.
ZHENG Yangwei, JIANG Yuewen, ZHANG Jinhui. Joint planning optimization of source-storage-transportation considering long- and short-term energy storage under high proportion of wind power

- penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 63-71(in Chinese).
- [137] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5731.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731.
- [138] XU Luo, FENG Kairui, LIN Ning, et al. Resilience of renewable power systems under climate risks[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1(1): 53-66.
- [139] 尹积军, 吴文传. 浙江构建新型电力系统的技术路径与实践[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5404-5414.
YIN Jijun, WU Wenchuan. Technical path and practice for constructing the new type power system in Zhejiang province[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5404-5414(in Chinese).
- [140] 张振宇, 王文倬, 马晓伟, 等. 基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3375-3382.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, MA Xiaowei, et al. Reserve of power system considering renewable energy based on risk control[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3375-3382(in Chinese).
- [141] MOEHRLEN C, WEPROG U V, RYAN J, et al. Probabilistic forecasting tools for high-wind penetration areas: an Irish case study [C]//18th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plant. Dublin, 2019.
- [142] 王珂, 姚建国, 余佩遥, 等. 基于深度强化学习的电网前瞻调度智能决策架构及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5430-5438.
WANG Ke, YAO Jianguo, YU Peiyao, et al. Architecture and key technologies of intelligent decision-making of power grid look-ahead dispatch based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5430-5438(in Chinese).
- [143] 汤必强. 中国电科院一项软件完成部署与功能应用, 增强高占比新能源电网调度决策适应性[N]. 国家电网报, 2023-09-19.
- [144] HOLTINEN H, TUOHYA, 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.
- [145] 刘之琳, 许传龙, 郑海峰, 等. 德国关停核电前后保供促应消纳经验分析[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 145-152.
LIU Zhilin, XU Chuanlong, ZHENG Haifeng, et al. Empirical analysis of ensuring electricity supply and promoting renewable power consumption before and after the shutdown of nuclear power plants: the germany case[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 145-152(in Chinese).
- [146] EGAN J, O'ROURKE P, SELICK R, et al. Overview of the 500MW EirGrid East-West Interconnector, considering System Design and execution-phase issues[C]//Proceedings of 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference. Dublin: IEEE, 2013.
- [147] 胡伟孙, 孙英云, 赵鹏飞, 等. 基于日电量平衡与日内校验的长期随机运行模拟算法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4263-4271.
HU Weiyang, SUN Yingyun, ZHAO Pengfei, et al. Long-term stochastic operation simulation algorithm based on daily electric energy balance and intra-day verification[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4263-4271(in Chinese).
- [148] 吴珊, 边晓燕, 张菁娟, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677(in Chinese).
- [149] 张馨瑜, 陈启鑫, 葛睿, 等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41.
ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41(in Chinese).
- [150] 刘方, 张粒子, 李秀峰, 等. 巴西电力市场研究: 电力市场化改革历程与市场交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2501-2513.
LIU Fang, ZHANG Lizi, LI Xiufeng, et al. Brazil's electricity market research: electricity market reform process and market trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2501-2513(in Chinese).
- [151] 刘硕, 于松泰, 孙田, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的容量补偿机制研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1780-1789.
LIU Shuo, YU Songtai, SUN Tian, et al. Capacity compensation mechanism for highly-proportional renewable energy power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1780-1789(in Chinese).
- [152] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于建立煤电容量电价机制的通知[EB/OL]. (2023-11-08) [2023-12-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914744.htm.
- [153] 陈梓浩, 高硕, 刘雨菁, 等. 西北地区电力系统低碳转型探索——打造零碳电力系统的青海样本[EB/OL]. (2022-11-18) [2023-12-26]. <https://carbon.iesplaza.com/article-2611-1.html>.
- [154] 国家能源局南方监管局. 关于公开征求《南方区域电力市场运营规则(征求意见稿)》意见的通告[EB/OL]. (2022-05-30) [2023-06-02]. https://nfg.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202402/t20240208_240254.html.
- [155] 鲍颜红, 张金龙, 衣立东, 等. 含大规模风电电力系统的安全稳定风险预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 187-194.
BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, YI Lidong, et al. Prevention and control method of security and stability risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 187-194(in Chinese).
- [156] 国家能源局山东能源监管办公室. 山东省电力现货市场交易规则(试行)[EB/OL]. (2020-06-16) [2023-12-26]. <https://sdb.nea.gov.cn/History/main/Doc/2020616154351.pdf>.
- [157] 北极星售电网. 甘肃电力现货市场交易实施细则(结算试运行暂行V2.5)发布[EB/OL]. (2022-08-09) [2023-12-26]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220809/1247066-1.shtml>.
- [158] 国家能源局南方监管局. 广东电力市场现货电能量交易实施细则(2022年试行版)[EB/OL]. (2022-01-07) [2023-12-26] https://nfg.nea.gov.cn/file_upload/20220107/54731641528690168_e76e8223-638a-4112-a797-16171699396d.pdf
- [159] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《电力现货市场基本规则(试行)》的通知[EB/OL]. (2023-09-07) [2023-12-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content_6904881.htm.
- [160] 国家能源局南方监管局. 关于印发《南方区域跨省(区)电力应急调度暂行规则》的通知[EB/OL]. (2023-10-08) [2023-12-26]. https://nfg.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202402/t20240208_240320.html.



郭红霞

在线出版日期: 2024-04-15.

收稿日期: 2023-12-26.

作者简介:

郭红霞(1971), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统随机因素建模, E-mail: guohx@scut.edu.cn;

陈凌轩(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统随机因素建模、极端场景建模等, E-mail: CLX18757676737@163.com;

王建学(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、电力电量平衡, E-mail: jxwang@mail.xjtu.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)

Research and Response to Extreme Scenarios in New Power System: A Review From Perspective of Electricity and Power Balance

GUO Hongxia¹, CHEN Lingxuan¹, ZHANG Qi², HUANG He³, MA Qian³, WANG Jianxue²

- (1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
3. Power Dispatching & Communication Centre of China Southern Power Grid, Guangzhou 510630, Guangdong Province, China)

KEY WORDS: Extreme scenarios; Response strategies; Renewable energy; New power systems; Electricity power balance; Scenario generation

Extreme weather events are becoming more frequent due to the intensification of global climate change. Energy transition policies and geopolitics exacerbate uncertainty in primary energy supply and load level. Under construction, China's New Power System is increasingly reliant on renewable energy, leading to challenges in maintaining electricity and power balance during extreme scenarios.

While existing research has provided insights into coping strategies for extreme scenarios, areas still require further investigation. This paper reviews the current research on extreme scenarios within the context of the New Power System, focusing on the fundamental nature of extreme scenarios, simulation and generation technologies, their application in the power system, and proposed countermeasures, as illustrated in Fig. 1.

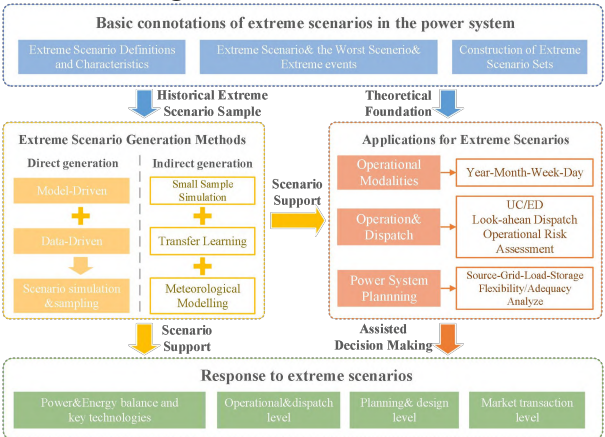


Fig. 1 Theoretical and Applied Framework for Extreme Scenarios in Power Systems

Firstly, the paper comprehensively summarizes extreme scenarios, highlighting their characteristics and connection to concepts such as extreme events and worst scenarios. It also discusses the method of constructing extreme scenario sets, emphasizing both

screening and identification methods.

Subsequently, direct and indirect methods for generating extreme scenarios are outlined, with direct methods further categorized into model-driven and data-driven approaches. The emergence of deep generative networks has opened up new possibilities for research in generative models such as GAN, VAE, and Diffusion. These models hold great potential for simulating extreme scenarios in various fields. Indirect methods such as Small Sample Simulation, Transfer Learning, and Climate Model Simulation are also examined. While direct methods may be limited by sample size, indirect methods help address this limitation, offering potential for future research.

Furthermore, the application methods of extreme scenarios in the power system and specific application areas are discussed, emphasizing their utility in power system operation modality development, power system operation & dispatch, and grid planning. Extreme scenarios are considered part of the uncertainty analysis, and they can be integrated into the optimization process using methods such as time-series scenarios, interval analysis, and probabilistic forms. Considering economic implications and reliability trade-offs when dealing with extreme scenarios is crucial.

Finally, countermeasures to extreme scenarios are proposed at four levels by combining existing research and actual engineering cases. Measures and recommendations to cope with extreme scenarios are summarized at the level of key technologies for power and energy balance, operation and dispatch, planning and design, and market trading.

The follow-up research direction of extreme scenarios is indicated, which provides ideas for the subsequent construction of a flexible, reliable, and supply-demand-balanced power system.

$$f(x|\gamma, \mu, \sigma) = \begin{cases} \exp[-(1 + \gamma \frac{(x - \mu)}{\sigma})^{\frac{1}{\gamma}}], & \gamma \neq 0 \\ \exp[-\exp(\frac{x - \mu}{\sigma})], & \gamma = 0 \end{cases} \quad (A1)$$
$$f(x|\gamma, \beta) = \begin{cases} 1 - (1 + \gamma \frac{x}{\beta})^{\frac{1}{\gamma}}, & \gamma \neq 0 \\ 1 - \exp(-\frac{x}{\beta}), & \gamma = 0 \end{cases} \quad (A2)$$

$\beta > 0$

式中：参数 γ, μ, σ 分别表示分布曲线形态参数、极端值的均值与标准差； β 为规模参数，反映了极值分布的离散程度。

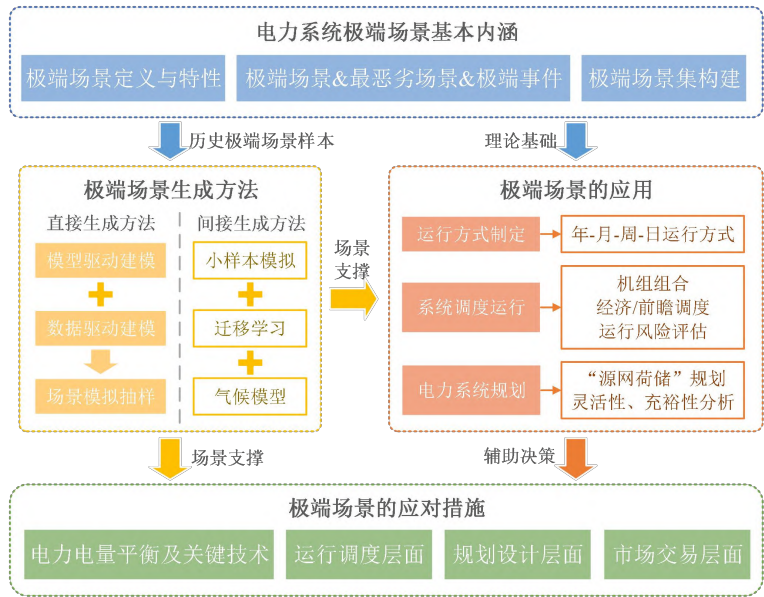


图 A1 电力系统极端场景理论与应用框架

Fig. A1 Theoretical and applied framework for extreme scenarios in power systems

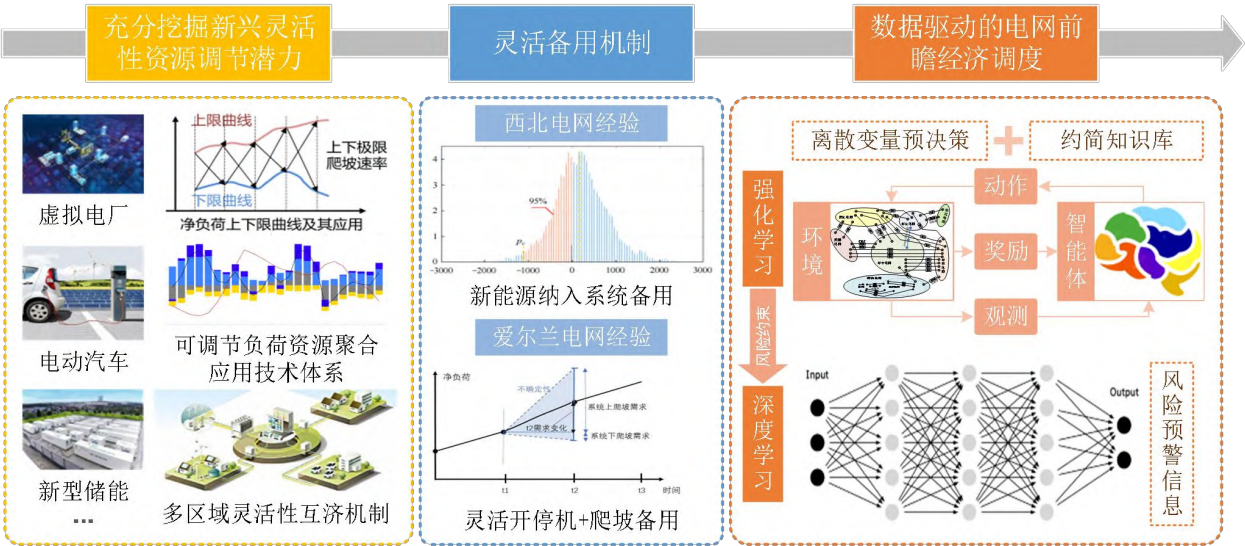


图 A2 运行调度层面具体应对策略框架

Fig. A2 Strategies and applied framework in terms of operation and dispatchment

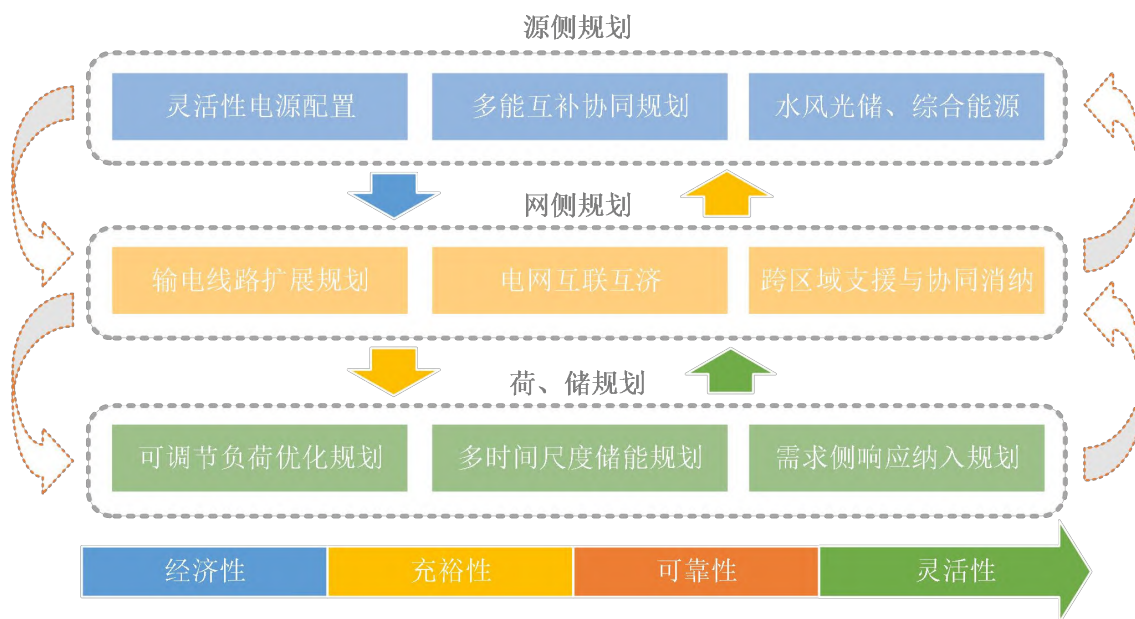


图 A3 规划层面具体应对策略框架
Fig. A3 Strategies and applied framework in terms of planning



图 A4 市场交易层面具体应对策略框架
Fig. A4 Strategies and applied framework in terms of power market