第 49 卷 第 7 期：2697-2711 高电压技术 Vol.49, No.7: 2697-2711
2023 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2023
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230601

# 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

侯 恺[1]，刘泽宇[1]，贾宏杰[1]，穆云飞[1]，朱乐为[2]，曲嘉伟[1]
（1. 天津大学智能电网教育部重点实验室，天津 300072；2. 天津理工大学海运学院，天津 300384）

**摘 要**：随着“双碳”目标的推进，高比例可再生能源广泛接入，电力系统呈现出不确定性因素多、源荷变化快、多重随机性强等特点，给电网的安全稳定运行带来了新的挑战。解析法是最常用的运行可靠性评估方法之一，具有数学模型清晰、计算效率稳定、枚举状态关系明确等优势，有助于保障电力能源的安全可靠供应。从电力系统运行可靠性的概念和评估流程出发，归纳亟待解决的问题。在此基础上，从可靠性评估效率提升、考虑极端灾害的不确定性建模和序贯解析评估 3 个方面归纳了现有研究成果及其存在的不足。最后，展望了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的未来研究方向。

**关键词**：高比例可再生能源；新型电力系统；运行可靠性评估；解析法；模型驱动；数据驱动

## Review of Analytical Methods for Operation Reliability Assessment of Power Systems with High-penetration Renewable Energy

HOU Kai[1], LIU Zeyu[1], JIA Hongjie[1], MU Yunfei[1], ZHU Lewei[2], QU Jiawei[1]
(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Maritime College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract**: With the promotion of the “carbon peak and carbon neutrality” target and the widespread integration of high-proportion renewable energy, power systems exhibit characteristics such as high uncertainty, rapid changes in supply and demand, and significant multiple randomness, which bring new challenges to the safe and stable operation of power grids. Analytical methods are commonly employed for assessing operational reliability and offer advantages such as clear mathematical models, stable computational efficiency, and well-defined relationships between enumerated states. These methods play a crucial role in ensuring the secure and reliable supply of electric power energy. This paper begins by exploring the concept and process of power system operational reliability and highlights the pressing issues that need to be addressed. Moreover, this paper summarizes existing research achievements and their limitations from the three aspects, such as efficiency improvement of reliability assessment, uncertainty modeling of extreme disasters, and sequential analytical evaluation. Finally, this paper discusses the future research of operation reliability assessment methods for power systems with high-penetration renewable energy.

**Key words**: high-penetration renewable energy; new power system; operation reliability assessment; analytical approach; model driven; data driven

## 0 引言

为应对化石能源危机与气候变化问题，大力发展可再生能源已成为全球能源低碳转型的主导方向，截止 2022 年 11 月，全球已有大约 140 个国家明确了或正在制定“净零排放”的相关政策目标[1]，大力发展可再生能源已成为全球能源低碳转型的主导方向。顺应能源变革趋势，我国提出了“3060”双碳目标，实施可再生能源替代行动，推进构建清洁低碳、安全高效能源体系。截止 2022 年底，我国可再生能源装机达到 12.13 亿 kW，占全国发电总装机的 47.3%，2022 全年可再生能源新增装机 1.52 亿 kW，占全国新增发电装机的 76.2%，其中风电、光伏发电新增装机达到 1.25 亿 kW[2]。锚定“碳达峰 碳中和”目标，预计“十四五”期间，我国风电、光伏发电量将实现翻倍，可

**基金资助项目**：国家自然科学基金(52077150)；国家重点研发计划(2019YFE0118000)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077150), National Key R&D Program of China(2019YFE0118000).

再生能源在一次能源消费增量中占比将超过 50%[3]，电力系统格局将发生显著变化。

党的二十大报告[4]指出，积极稳妥推进碳达峰碳中和，加快规划建设新型能源体系，确保能源安全。新型电力系统是新型能源体系的重要组成部分，是推动能源低碳转型，实现“双碳”目标的重要举措。随着新能源占比的持续提升，电力系统在源网荷储[5-6]等方面都呈现出许多新的特征：在源侧，强随机性、波动性的可再生能源电源高比例接入；在网侧，电力电子设备大量接入，电力与燃气、供热、交通等多种能源系统紧密耦合，多能流交互复杂；在荷侧，多种用能形式出现，夏冬负荷“双峰”特征日益凸显，各类分布式能源的接入导致有源性不断增强，能量流动由“单向”变为“多向”；在储侧，以化学电池为代表的电储能与传统热储能相互配合为电力系统提供更加丰富的灵活资源。这些新特征一方面使电力系统的灵活性和清洁性显著提升，另一方面也使得电力系统面临着运行状态变化快、随机影响因素多、故障耦合复杂等问题，电力保供问题日益突出，停电缺电风险大大增加，电力系统的安全可靠运行面临着严峻挑战。例如 2019 年 8 月 9 日，英国大停电事故，起因之一就是霍恩海风机大量脱网使风电出力骤降 900 MW，系统部分负荷切除，停电涉及英格兰与威尔士地区，约有 100 万人受到停电影响。2021 年 2 月，美国德克萨斯州遭遇罕见寒潮，由于风机结冰，太阳能面板覆雪，以及取暖负荷激增等原因，德州出现大面积停电，450 万户家庭断电。德州风力发电占电力供应 40%以上，电网对风能太阳能等间歇性可再生能源的依赖程度越高，在供需发生巨大变化时可靠性就越低。2022 年 8 月，中国川渝地区遭遇极端高温天气，水电出力骤减，引发大范围长时间停电限电。

在这种背景下，保障高比例可再生能源接入下电力系统的安全可靠运行已成为新形势下的一项重要任务，受到国家高度重视。大规模可再生能源接入电网后，电力系统短时间内的运行条件可能会发生显著变化。据统计，单个新能源场站小时级最大功率波动可达装机容量的 15%~25%，2 h 最大波动可高达 40%；考虑整体区域新能源功率波动率，以中国广东省为例，2 h 最大波动仍可达 20%～35%[7]。可再生能源的短时剧烈波动往往会导致系统线路潮流、节点电压等关键电气量发生快速变化，容易产生设备故障、潮流越限等安全问题，甚至导致切负荷切机事故的发生。因此，相较于常规的可靠性评估方法，含高比例可再生能源的电力系统可靠性评估更加侧重于短期的在线运行评估，需要快速准确地计算电力系统未来短时的可靠性水平变化，为运行调度人员提供决策依据。因此，开展面向高比例可再生能源电力系统的运行可靠性评估研究是保障我国能源安全的迫切需求。

本文针对含高比例可再生能源的电力系统可靠性解析评估方法研究进行综述，对相关技术思路和关键问题进行论述。首先，从不确定性建模、状态选取、状态分析和可靠性指标计算等 4 方面介绍了含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估的基本流程，归纳了目前亟待解决的问题。进一步，对基于解析法的高比例可再生能源电力系统运行可靠性评估方法进行研究综述。最后，对未来的研究方向进行展望，以期为后续的研究工作提供参考。

## 1 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的基本理论

### 1.1 电力系统运行可靠性概念

电力系统可靠性是电力系统按照可接受的质量标准和所需数量不间断地向用户供应电力和电能的能力[8]。随着高比例可再生能源接入电力系统，电力系统运行在源荷强不确定的环境中，元件自身的健康状况、外部环境、系统电气参数等运行条件的实时变化给系统可靠性带来了显著的影响，侧重于长期规划的常规电力系统可靠性评估已难以满足运行人员的实际需求。为了更好地反映系统真实的可靠性水平，基于实时状态的运行可靠性受到了广泛关注。

对于电力系统运行可靠性的定义，文献[9-10]定义运行可靠性是在实时运行方式和外界工作环境下，电力系统在短期内能够持续满足系统运行约束和电力用户负荷需求的能力。文献[11]提出运行可靠性是考虑系统运行状态、实时运行环境等因素的影响，在当前状态下系统未来短期内的可靠性水平。文献[12]定义运行可靠性为电力系统在给定时间间隔内根据来自数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition，SCADA)/能源管理系统(energy management system，EMS)的实时运行信息，考虑元件的固有条件、环境条件和操作电气环境，为用户供应充足且安全的电能的能力。尽管目前学术界尚未形成运行可靠性的统一标准定义，但多数

文献已就运行可靠性的 2 个关键要素“短期”和“运行条件变化”达成共识。

运行可靠性倾向于较短的时间尺度，可以给出系统在未来数小时或数分钟内的短期可靠性，以便针对未来运行条件变化可能导致的运行风险来制定应对措施。对于含高比例可再生能源的电力系统，运行条件的变化通常来源于元件停运、新能源及负荷波动、气象条件、系统运行策略等。考虑多种气象条件，文献[13]分析了可再生能源、负荷、线路动态热容量和设备故障概率等运行状态变化对系统运行可靠性的影响。文献[14]基于决策依赖不确定性，构建了设备可靠性指标和系统运行决策变量的关系。文献[15]通过短期运行可靠性指标为系统的频率控制提供决策参考。此外，运行可靠性也用于评估分析交易策略[16]、需求侧响应策略[17]和储能调度策略[18]，保障不同策略下系统的安全可靠运行。

现有运行可靠性评估方法主要可以分为解析法和模拟法[19]，两者都有各自的适用场合。解析法枚举可能出现的系统状态，并根据所得状态影响计算可靠性指标。该方法的数学模型较为准确，计算精度高，但其计算量会随着系统规模呈指数增加，对于大规模电力系统，对海量的系统状态进行计算分析是不现实的。因此，解析法在规模较小或元件不可用率较低的系统中计算效率较高。模拟法通过抽样可能出现的系统状态，模拟电力系统未来的运行情况，进而给出相应的可靠性指标。不同于解析法，模拟法的抽样次数与系统规模复杂度无关，因而更适合在大规模或高设备故障率系统中应用。然而对于高可靠性系统，模拟法的抽样次数会急剧增加，计算效率显著下降。目前已有大量文献[20-23]对蒙特卡洛模拟法开展了研究和综述，因此，本文主要总结分析电力系统运行可靠性解析评估方法的相关研究。

### 1.2　基于解析法的运行可靠性评估方法流程

对于含高比例可再生能源的电力系统，受可再生能源强随机性的影响，其运行过程中可能出现的系统状态数量非常庞大，所以其可靠性评估问题往往较为复杂。电力系统运行可靠性评估通常会反复选择可能出现的系统状态并分析其发生概率和影响，进而计算系统的运行可靠性指标[24]。基于解析法的电力系统运行可靠性评估方法主要由 4 部分构成，即不确定性建模、系统状态选择、系统状态分析和可靠性指标计算，如图 1 所示。

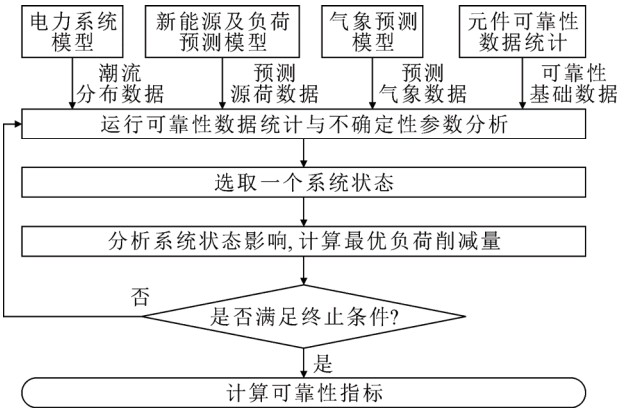



图 1　电力系统运行可靠性评估流程示意图

Fig.1　Operation reliability assessment for power systems

#### 1.2.1　不确定性建模

电力系统运行可靠性评估首先需要建立系统各类不确定性因素的概率分布模型，进而得到系统状态及相应的状态概率。

对于元件失效的不确定性，小容量发电机组、架空线路、电缆、变压器和电容器等元件通常采用两状态可修复模型[25]，以强迫停运率来表示元件的失效概率。大容量发电机组、高压直流输电[26]、分布式光伏发电系统[27]、风电机组[28]可采用多状态模型来表示全额运行、减额运行和停运等多个状态。文献[29]总结了光伏组件和逆变器的可靠性模型，分析了晶体管、电容器和拓扑结构对逆变器失效概率的影响。文献[30]提出一种计及集中式和分布式新能源的连锁故障动态模型。此外，天气因素会对电力系统元件的状态产生显著影响，尤其是光伏、风机等可再生能源，例如风速较高时风电机组的故障率也往往较高[31]。文献[32]建立了考虑天气变化的元件可靠性模型，文献[33]提出了一种考虑极端天气的光伏发电系统的三状态可靠性模型。文献[34]构建了考虑风速与风机故障率负相关性的风机出力可靠性模型。同时，随着电力系统自动化程度的日益提高，能源系统与信息系统深度耦合，信息系统元件失效已成为威胁电力系统可靠运行的重要影响因素之一。文献[35]建立了一种考虑网络失效的物理元件停运模型。文献[36]分析了同步相量测量单元(phasor measurement unit，PMU)故障对电力系统可靠性的影响。

随着可再生能源的大规模接入和电力需求的快速增长，电力系统源荷两侧的不确定性波动更加剧烈，对电力系统的可靠性水平产生明显影响。可

靠性评估中的负荷模型包括单一负荷模型、多级负荷模型、聚类负荷模型和时序负荷模型[37]。另外，对于不同季节、地区的负荷曲线变化应根据实际情况考虑其相关性及预测不确定性[38]。

可再生能源的不确定性主要来源于气象环境的不确定性。光伏出力主要由太阳辐射强度决定，此外还受到云量、温度、大气气溶胶浓度等因素的影响[39]。风机出力主要由风速决定，风速与功率曲线通常是一条近似的“S”曲线[40]，但由于受到风向、气压、气温等因素的影响，风机发电功率与风速风向之间存在复杂的非线性关系[41]。因此，可再生能源出力的不确定性建模方法通常包括间接法和直接法 2 类。间接法首先建立太阳辐射强度、风速等气象因素的不确定性模型，然后通过光–电或风–电转换方程得到光伏、风电的不确定性模型[42]，而直接法是直接对可再生能源出力进行不确定建模，例如文献[43]使用非参数核密度估计理论直接得到光伏出力概率模型。一般地，光伏风电出力的不确定性模型可分为概率分布模型和时间序列模型[44]。概率分布模型中，正态分布[45]、Boltzmann 分布[46]和伽玛分布[47]等可用于拟合太阳辐射量；威布尔分布[48]、瑞利分布[49]和 Log-normal[50]分布等多用于拟合风速的概率分布。文献[51]对光伏出力历史数据进行聚类分析，基于自回归滑动平均(autoregressive moving average，ARMA)模型建立光伏出力时间序列。文献[52]统计各个时段的风速历史数据，基于风机功率曲线抽样得到风电时序功率模型。由于相近的风电光伏的出力具有较强的相关性，文献[53-54]基于 Copula 函数构造了风光出力的联合概率分布。

1.2.2 系统状态选取

电力系统运行可靠性评估中，最常用的解析法是状态枚举法，该方法通过依次枚举各类不确定性因素的状态，进而组合形成系统状态。对于含高比例可再生能源的电力系统，其系统状态通常由元件状态和源荷状态组成，元件状态即系统内各类元件的运行状态，源荷状态包括系统内各个节点的负荷水平、各个发电机组的发电容量和光伏、风机等可再生能源机组的出力水平。

状态枚举解析法的精度高且数学模型概念清晰，普遍适用于规模较小或元件故障概率低的系统。然而，随着强随机的可再生能源大规模接入电力系统，电力系统的状态空间呈几何式扩张，状态枚举法产生的系统状态数会随着系统不确定因素的增加呈指级增长，出现“组合爆炸”的问题，对所有可能出现的系统状态进行枚举和计算分析是不现实的。由于大部分可能出现的系统状态对整体可靠性指标影响很小，因此在实际应用中可以设置枚举截止规则，忽略超过阈值的系统状态，在保证足够精度的前提下，尽可能枚举更少的系统状态，从而提高计算效率。

目前枚举截止规则通常有 3 种[55-57]：

1）最大故障阶数：对枚举状态的故障阶数进行限制，忽略阶数高于预设阈值的系统状态。

2）最小状态概率：对枚举状态的概率进行限制，忽略状态概率低于阈值的所有系统状态。

3）最小状态严重程度：综合概率和故障影响，设置系统状态的严重程度指标，如越限程度、潮流变化灵敏度[58]等，衡量系统状态所造成的故障影响，忽略低于该指标阈值的所有系统状态。

为了进一步减少计算负担，现有文献还提出了许多状态筛选技术，例如状态空间截断法[59]、最小割集状态法[60]等，将在下一章详细介绍。但是，所忽略系统状态的影响很可能会造成对可靠性指标的低估，因此解析法的可靠性评估结果通常会小于实际值，是实际值的有偏估计。

1.2.3 系统状态分析

系统状态分析是考虑功率平衡，线路潮流容量、发电机容量和母线电压等安全约束，通过最优潮流(optimal power flow，OPF)模拟不同状态下系统的再调度过程，消除系统约束违限并计算其最优负荷削减量(optimal load curtailment，OLC)[61]。该最优潮流模型以全系统负荷削减量最少为目标函数，可以采用交流潮流或直流潮流模型。

电力系统运行可靠性评估中，基于交流潮流的 OPF(alternating current OPF，ACOPF)模型为

$$\begin{cases}\min \boldsymbol{f}_{\mathrm{LC}}=\sum \boldsymbol{P}_{\mathrm{LC}} \\ \text{s.t.}\begin{cases}[\boldsymbol{U}]\boldsymbol{Y}_{\mathrm{bus}}\boldsymbol{U}^{*}+\boldsymbol{S}_{\mathrm{LC}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{d}} \\ \boldsymbol{F}_{\min}\le\left|\boldsymbol{Y}_{\mathrm{ft}}\boldsymbol{U}\right|\le\boldsymbol{F}_{\max} \\ \boldsymbol{U}_{\min}\le\boldsymbol{U}\le\boldsymbol{U}_{\max} \\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{g}\min}\le\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}}\le\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}\max} \\ \boldsymbol{0}\le\boldsymbol{S}_{\mathrm{LC}}\le\boldsymbol{S}_{\mathrm{d}}\end{cases}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{f}_{\mathrm{LC}}$ 为目标函数；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{LC}}$ 和 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{LC}}$ 分别为负荷削减的复功率和有功功率；$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}}$ 和 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{d}}$ 分别为节点电压、节点负荷和发电机出力；$[\boldsymbol{U}]$表示 $\boldsymbol{U}$ 所形成的方阵；

$\boldsymbol{U}^*$表示 $\boldsymbol{U}$ 的共轭；$\boldsymbol{Y}_{\text{bus}}$是节点导纳矩阵；$\boldsymbol{C}_{\text{g}}$是发电机连接矩阵；$\boldsymbol{Y}_{\text{ft}}$是支路导纳矩阵；$\boldsymbol{F}_{\min}$和$\boldsymbol{F}_{\max}$分别为支路潮流下限和上限；$\boldsymbol{U}_{\min}$和$\boldsymbol{U}_{\max}$分别为电压的下限和上限；$\boldsymbol{S}_{\text{gmin}}$和$\boldsymbol{S}_{\text{gmax}}$分别为发电机出力的下限和上限。

ACOPF 模型能够精确计算系统潮流分布，但该模型是一个非凸非线性规划问题，求解效率低且在高阶故障状态下不容易收敛[62]。相较于 ACOPF 模型，基于直流潮流的 OPF(direct current OPF，DCOPF)模型是一种典型的线性规划问题，算法成熟，计算速度快，已被广泛应用于电力系统可靠性评估[63-64]，如式(2)所示。但 DCOPF 模型忽略了节点电压和无功潮流约束，其负荷削减的评估结果偏低，存在一定的误差。

$$\begin{cases}\min \boldsymbol{f}_{\text{LC}}=\sum \boldsymbol{P}_{\text{LC}} \\ \text{s.t.}\begin{cases}\boldsymbol{Y}_{\text{bus}}\boldsymbol{\theta}+\boldsymbol{C}_{\text{g}}\boldsymbol{P}_{\text{g}}+\boldsymbol{P}_{\text{LC}}=\boldsymbol{P}_{\text{d}} \\ \boldsymbol{F}_{\min}\le\left|\boldsymbol{Y}_{\text{ft}}\boldsymbol{\theta}\right|\le\boldsymbol{F}_{\max} \\ \boldsymbol{P}_{\text{g}\min}\le\boldsymbol{P}_{\text{g}}\le\boldsymbol{P}_{\text{g}\max} \\ \boldsymbol{0}\le\boldsymbol{P}_{\text{LC}}\le\boldsymbol{P}_{\text{d}}\end{cases}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\theta}$、$\boldsymbol{P}_{\text{g}}$和$\boldsymbol{P}_{\text{d}}$分别为节点电压相角、发电机有功出力和节点有功负荷；$\boldsymbol{P}_{\text{gmax}}$和$\boldsymbol{P}_{\text{gmin}}$分别为发电机有功出力的上、下限。

在含高比例可再生能源的电力系统中，可再生能源的不确定性主要体现在发电机的出力变量，随着可再生能源的不断发展，电力系统面临着海量的不确定性，相应带来了大量的系统状态，对每个系统状态进行 OPF 优化计算将消耗大量计算时间，因此，电力系统的运行可靠性评估效率亟待提升。

1.2.4　可靠性指标计算

电力系统运行可靠性指标一般包括概率、频率、持续时间和期望值 4 类，这些指标可以从不同的角度评价系统可靠性，反映系统的停电损失情况和安全裕度，刻画重要负荷节点与关键元件的可靠性等。

基于解析法的可靠性指标计算式为

$$R=\sum_{s\in\Omega}P(s)I(s) \tag{3}$$

式中：$R$ 为电力系统运行可靠性指标；$s$ 为系统状态；$P(s)$为系统状态 $s$ 的概率；$\Omega$ 为系统状态集合；$I(s)$为系统状态 $s$ 的故障影响。

影响函数 $I(s)$有多种类型，分别对应不同的可靠性指标，常用的指标[65]包括：负荷削减概率指标(probability of load curtailments，PLC)，负荷削减频率指标(expected frequency of load curtailments，EFLC，次/期间)，负荷削减平均持续时间(average duration of load curtailments，ADLC，h/次)和期望缺供电量指标(expected energy not supplied，EENS，MWh/期间)等[66-68]。

### 1.3　亟待解决的问题

随着可再生能源发电的快速发展与应用，电力系统面临着源荷两侧的强随机性和快变性，对运行可靠性评估技术的实时性提出了更高要求。此外，进入 21 世纪以来，全球气候变化越来越剧烈，各种极端灾害频繁发生，而可再生能源技术容易受自然条件影响，且相关电力基础设施尚未表现出足够的气候适应性，给电力系统的安全运行带来了严峻考验。因此，传统的可靠性评估方法将难以适用于含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估，其亟需解决的问题如下文所示。

1）如何在调度运行的时间尺度下快速计算可靠性指标，是含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估研究需解决的核心问题。

含高比例可再生能源的电力系统不但包括发电机组、输配电线路、变压器等传统电力设备，还大量接入了分布式电源、电力电子变换器、储能、电能替代负荷等新技术设备，涉及元件种类多、数量大，其故障组合数量也十分庞大，此外，海量接入的可再生能源导致电力系统源荷两侧面临着更强的随机性，需要更多的随机参数组合才能完整描述，这进一步加剧了可靠性评估的组合爆炸问题。例如设电力系统由 $n$ 个元件构成，并由 $k$ 条曲线表示按不同规律变化的可再生能源出力或负荷变化情况，则全系统可组合出 $2^n-1$ 个故障拓扑状态和 $k$ 个源荷状态，共计 $(2^n-1)k$ 个系统状态。因此，含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估面临着拓扑和供需 2 方面的组合爆炸问题，所需分析的系统状态集比传统电力系统可靠性评估更加庞大。然而，传统电力系统可靠性评估方法需要对大量系统状态进行逐个分析，才能得到较为精确的评估结果，单次评估通常需要数 10 min 甚至数小时，难以对调度运行工作提供及时有效的指导信息，调度运行人员往往只能根据经验进行决策，含高比例可再生能源的电力系统运行安全时刻面临着威胁。

2）含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估需要准确建立各类极端灾害的不确定性模型，分析极端灾害对可再生能源的影响，并全面分

析其对系统可靠性的影响。

台风、冰灾、地震、山火等不同类型的极端灾害都会对电力系统的正常运行造成严重影响，且可再生能源更容易受到自然环境的影响。然而，极端灾害预测难、类型多样，且不同类型极端灾害的数学模型及其对电力系统的影响机理截然不同。同一类型极端灾害的发生地点、持续时间、影响强度等因素也有很强的不确定性，这给电力系统的运行可靠性评估带来了极大的挑战。因此，在考虑各类灾害的不确定性因素时，应充分计及不同灾害类型、气象要素等之间的相关性及其影响，找出薄弱环节和关键影响因素，才能为含高比例可再生能源的电力系统调度运行提供科学依据，确保其稳定、高效、安全的运行。

3）基于解析法的电力系统可靠性评估亟需解决现有算法难以考虑时序因素，无法准确评估频率和持续时间类可靠性指标的问题。

随着光伏、风电等可再生能源的加入，电力系统在各个时刻的电源出力难以预测，系统运行调度呈现出很强的序贯特征，多个连续时间段内的系统运行状态存在相互关联和影响。因此，为了更准确地指导系统的运行调度决策，需要对系统不同时段的可靠性水平进行序贯评估。然而传统基于解析法的电力系统可靠性评估技术难以模拟时序相关事件，不易获得与频率和持续时间相关的指标，也无法获得可靠性指标的概率分布，例如状态枚举法难以模拟可再生能源灵活性控制对系统可靠性的影响。同时，频率指标通常用于描述在一段时间内发生故障的次数，持续时间指标则用于描述故障事件的持续时间，这 2 个指标有助于运行调度人员更好地理解电力系统的可靠性水平，发现和纠正故障和和缺陷，制定最佳的故障修复策略，从而提高电力系统的可靠性和可恢复性。因此，尽管解析法数学模型准确，可靠性指标计算结果精度高，但上述问题限制了解析法在含高比例可再生能源电力系统中的应用。

## 2 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的研究现状

### 2.1 基于解析法的运行可靠性评估效率提升技术

随着高比例可再生能源的接入，电力系统的状态空间呈几何式扩张，运行可靠性评估需要分析的状态数量大大增加，传统解析法已难以适应高比例可再生能源运行可靠性评估的高时效性需求。为了提高电力系统运行可靠性评估效率，可以从状态缩减和状态快速分析 2 个角度入手，如表 1 所示。状态缩减针对于 1.2.2 节所述的系统状态选取过程，通过筛选掉冗余或不必要的系统状态，缩减状态空间规模，在保证评估结果精度的前提下提高评估效率；状态快速分析针对于 1.2.3 节所述的系统状态分析过程，采用更高效的算法求解系统状态的最优潮流模型，快速评估每个状态的故障损失，在状态数量不变的前提下提高评估效率。

效率提升技术可采取 2 种技术路线，即模型驱动和数据驱动。模型驱动方法主要依靠模式分析、概率分析和优化模型等理论方法来提升评估效率，该方法模型明确，可解释强，但其对于高维非线性问题的计算分析能力有限。数据驱动方法以大量的试验及测试数据为基础，采用统计分析、人工智能等理论方法提高运行可靠性评估效率。尽管数据驱动方法计算速度高，但其缺乏数学理论及具体模型的支持，可解释性弱，普适性不及模型驱动方法。

#### 2.1.1 系统状态缩减技术

系统状态缩减技术通过忽略对系统可靠性指标影响较小的系统状态，实现运行可靠性评估效率的提升。

文献[56]提出了一种基于系统状态概率的快速排序算法，通过元件可用率升序排列快速得到高概率的系统状态，从而在状态枚举数量不变的前提下提升评估精度。然而高概率系统状态的负荷损失并不一定很低，可能对可靠性指标有较大影响，为此，文献[69]定义了一种严重度系数指标来同时描述发电机组的故障概率和故障影响，进而快速筛选出对可靠性指标贡献大的系统故障状态，提升了发电系

表 1 可靠性评估效率提升技术

Table 1 Reliability assessment efficiency improvement techniques

| 提升策略 | 技术路线 | 典型改进方法 |
|---|---|---|
| 状态缩减 | 模型驱动 | 状态快速排序法[56] |
| | | 严重度系数排序[69] |
| | | 影响增量法[70] |
| | 数据驱动 | 神经网络[71] |
| | | 学习向量量化模型[72] |
| | | 最小二乘支持向量机[73] |
| 状态快速分析 | 模型驱动 | 优化后分析方法[74] |
| | | 多参数线性规划[75] |
| | | 拉格朗日乘子灵敏度法[76] |
| | 数据驱动 | 深度神经网络[77] |
| | | 堆叠降噪自动编码器[78] |
| | | 拉格朗日深度强化学习算法[79] |

统可靠性评估效率。文献[80]建立了一个以概率与负荷损失乘积最大为上层优化目标的双层优化模型，并通过递归循环调用得到风险最大的前 $k$ 个系统状态。如果低阶状态发生负荷削减，则包含该低阶状态的高阶状态必然也有负荷削减，据此，文献[81]提出了一种系统状态拓展法，基于已分析的低阶状态分析结果推算高阶状态的失负荷概率指标，从而避免了对高阶状态进行分析计算。文献[82]提出了一种基于通用生成函数的含高比例风电的电力系统中短期可靠性评估方法，可以实现风电场，传统发电机组和快速启停机组等元件多状态模型的有效化简。文献[60]提出了一种最小割集方法，该方法通过 DCOPF 算法确定最小割集，然后基于马尔可夫过程给出了计算可靠性指标上下界的计算公式。然而，由于枚举所有的最小割集是不现实的，该方法在实际应用中仍然难以得到有效应用。

在解析法中，高阶故障状态的概率低，数量多，大量高阶状态的负荷损失可能会给系统可靠性指标带来较大影响，但逐个枚举高阶状态的时间成本极高且不现实，为此，文献[70]提出了一种基于影响增量的状态枚举法(impact-increment-based state enumeration method，IISE)，可靠性指标计算式如式(4)、(5)所示，算法原理如图 2 所示。图 2 中 $s_1$、$s_2$、$s_{12}$ 分别代表系统元件 1 单独故障、元件 2 单独故障和元件 1、2 同时故障的影响，$I$ 和 $\Delta I$ 分别表示状态影响和状态影响增量。该方法通过影响增量将数量庞大的高阶故障状态影响分解为 2 部分：组成高阶状态的各低阶故障状态影响与高阶状态本身对应的影响增量，进而将高阶状态影响折算至数量较少的低阶状态，实现了单次故障状态分析覆盖多个故障状态，避免了对高阶系统状态的分析，实现了评估精度和计算效率的提升。同时，文献[70]还证明了含有相互独立故障元件的高阶故障状态的影响增量为 0，进而可以消去该类高阶故障状态，有效减少计算时间，且不影响可靠性指标精度。

$$R=\sum_{k=0}^{N}\sum_{s\in\Omega^k}\left(\prod_{i\in s}u_i\right)\Delta I_s \tag{4}$$

式中：$N$ 是故障状态枚举阶数；$s$ 表示故障状态；$\Omega^k$ 表示 $k$ 阶故障状态集；$u_i$ 表示元件 $i$ 的不可用率；$\Delta I_s$ 是状态 $s$ 的影响增量，其计算式为

$$\Delta I_s=\sum_{k=0}^{n_s}(-1)^{n_s-k}\sum_{u\in\Omega_s^k}I_u \tag{5}$$

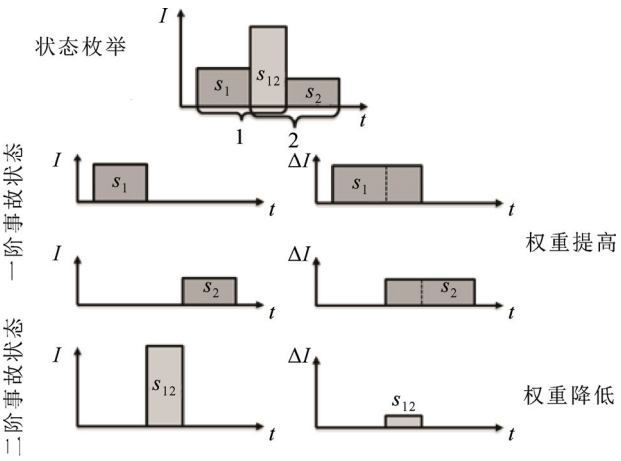



图 2　基于影响增量的状态枚举法

Fig.2　Impact-increment-based state enumeration method

式中：$n_s$ 是系统状态 $s$ 的故障元件数；$I_u$ 表示系统状态 $u$ 的最优负荷削减量；$\Omega_s^k$ 是 $s$ 的 $k$ 阶子集。

基于影响增量方法，文献[83]针对极端灾害时小概率大损失的故障状态，利用各状态的修正故障概率以及相应的影响增量，快速计算考虑单次台风灾害影响的输电网风险水平。文献[84]构建了基于影响增量的状态枚举–蒙特卡洛混合评估方法，将状态枚举法用于概率占比较高的低阶事故空间，蒙特卡洛法用于概率占比较低的高阶事故空间，实现可靠性评估精度和计算效率的有机协调，提高了其适用性和灵活性。

随着高比例可再生能源接入电网，大量的分布式电源元件会带来新的故障风险因素，导致更多的潜在故障状态。而此类状态缩减技术可以缩减系统故障状态数量，从而提高含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性评估效率。此外，聚类算法[85]可以提取典型的可再生能源出力场景，减少系统状态数量，进而提高解析法的评估效率。

### 2.1.2　系统状态快速分析技术

系统状态快速分析技术能够提高单个系统状态最优负荷削减量计算速度，从而在状态数量不变的前提下提高计算效率。在电力系统运行可靠性评估中，系统状态往往非常相似，而只有少量状态参数存在差异，例如几个不同的故障元件、负荷水平等。利用这种相似性快速推导相似状态的负荷损失，而不需要逐个分析计算每个状态的负荷损失。

文献[86]基于线性规划灵敏度分析方法快速求取系统的最大供电能力，可以省略 70%的优化计算任务。文献[74]将优化后分析方法运用于发输电系

统可靠性评估中，利用基状态快速推导其余相似状态的最优负荷削减量，但该方法尚未考虑可再生能源等不确定因素。文献[87]提出了一种基于影子价格的状态枚举可靠性快速评估方法，通过影子价格来描述节点负荷大小与系统最优负荷削减量的关系，从而快速计算负荷波动对系统所产生的影响，并进一步将该方法扩展至含可再生能源的电力系统可靠性评估[88]。文献[75]结合多参数线性规划方法与动态学习算法建立了输电线路状态字典集，同一集合内的系统状态仅需要一次最优潮流计算，从而避免海量的 OPF 优化求解。此外，多参数线性规划方法还被应用于综合能源概率潮流[89]、连锁故障分析[90]、输电线路扩展规划[91]、机器学习特征分类[92]和发输电系统可靠性评估[93]等。然而，可靠性评估中元件故障往往会导致系统拓扑发生变化，上述方法并不能快速计算拓扑变化后系统状态的最优负荷削减量。

文献[76, 94]提出了一种基于拉格朗日乘子灵敏度的高比例可再生能源电力系统可靠性快速评估方法，建立了元件故障、源荷波动与系统最优负荷削减量之间的函数关系，实现了不同系统状态最优负荷削减量的快速求解，从而避免了反复调用最优潮流来计算每个系统状态的最优负荷削减量，有效提升了电力系统可靠性评估效率。针对拓扑变化引起 OPF 模型维度、参数变化，导致原有拉格朗日乘子不再匹配的问题，该方法利用最优基的所在列数构建新拓扑结构下拉格朗日乘子，实现了拓扑变化下最优负荷削减量快速求解，详细过程见附录 A。

基于上述系统状态快速分析技术，可以快速计算可再生能源波动所导致的系统负荷削减，从而减少运行可靠性评估的计算需求，提升含高比例可再生能源电力系统的评估效率。

#### 2.1.3 数据驱动的运行可靠性评估效率提升技术

对于电力系统运行可靠性评估，传统模型驱动方法的计算效率易受到计算速度与计算精度矛盾的限制，难以满足运行可靠性的高时效性要求。而数据驱动方法不依赖于优化模型，计算速度快，实时响应能力强[95]，对运行可靠性评估效率的提升效果值得期待。文献[96]提出了使用机器学习等数据驱动技术来筛选状态或加速状态分析，以实现电力系统可靠性的在线评估。

传统运行可靠性评估的大部分计算资源都被用于计算无负荷损失的系统状态，但也只有经过最优潮流分析后才能确定系统状态是否存在负荷损失，这导致大量的计算时间被消耗在对可靠性指标贡献很小的系统状态上。然而，数据驱动的分类技术可以实现对系统状态的预分类，进而能够将计算资源集中用于分析对可靠性指标起主导作用的系统状态。例如，神经网络(artificial neural networks，ANNs)[71]、学习向量量化(learning vector quantization，LVQ)[72]和最小二乘支持向量机(least squares support vector machine，LSSVM)[73]等模型可用于确定每个系统状态是否存在负荷削减，从而减少大量的 OPF 计算负担。

在系统状态分析过程中，传统方法需要基于 OPF 模型对潜在系统状态逐一分析求解最优负荷削减量，计算耗时过长，难以满足运行决策对时效性的要求。文献[97]采用改进的反向传播算法训练人工神经网络，实现了系统状态运行参数与负荷削减量之间的映射关系，从而将 OPF 优化计算简化为函数运行，提高计算效率。文献[77]使用深度神经网络作为最优潮流的替代求解算法，并利用快速解耦潮流方程的物理特性来加速网络训练。文献[78]采用堆叠降噪自动编码器挖掘非线性潮流方程的高阶特征，建立了系统可再生能源波动和负荷削减量之间的非线性关系映射模型。文献[92]提出了一种基于堆叠极限学习机的最优潮流快速算法，可以在不需要系统拓扑参数的情况下快速获得高质量的最优解，并采用激活约束对样本进行预分类，提高了模型的学习效率。上述文献多采用机器学习或深度学习方法，这些方法通常需要大量的数据和先验知识进行模型训练，同时对特征设计和超参数调整有很强的依赖性。与此相比，强化学习方法并不直接依赖于大量的标注数据和先验知识，而是通过与环境的交互，尝试不同的策略并观察结果，以此学习如何选择最大化长期奖励信号的最优策略，这个过程无需复杂的特征设计或超参数调整。文献[79]提出了一种基于拉格朗日深度强化学习算法的最优潮流在线计算方法，该方法设计了一个带有约束越限惩罚的奖励函数，从而保证最优解在安全约束内。

### 2.2 考虑极端灾害的不确定性建模技术

相较于常规电力系统，含高比例可再生能源的电力系统更容易受到极端灾害影响。极端灾害发生时，电力系统中的一些元件如风机、架空线路等会直接暴露在恶劣的极端环境中，极易发生故障失效，并且某些关键元件失效可能会导致系统运行状态迅

速恶化，造成大范围供能中断。因此，元件故障失效是造成极端灾害下系统大范围负荷损失的直接原因，详细分析不同类型极端灾害对各类元件运行状态的影响，建立元件失效不确定性的概率分布模型，是进行考虑极端灾害的电力系统运行可靠性评估的前提和基础。

不同于正常运行状态，极端灾害往往具有时间和空间维度的变化特性，例如台风登陆后会不断移动并衰减。因此，传统的两态或多态天气模型不足以描述极端灾害下元件失效概率。针对该问题，许多学者从时间、空间 2 个角度分析极端灾害对元件失效概率的影响，将持续变化的极端灾害相关参数作为变量，建立基于历史数据的统计模型[98-99]或基于机理分析的物理模型[100-101]。文献[102]针对台风和暴雨灾害，提出了一种全面反映气象环境对电网元件故障概率影响的时空预警框架；文献[103]根据台风预报信息进行台风灾害模拟，进而得到各输电线路在台风下的故障概率，生成故障集合；文献[104]建立了单个元件与输电系统整体的脆弱性模型，用以反映恶劣天气对元件运行状态的实时影响，重点关注了台风灾害下元件的失效概率；文献[105]利用蒙特卡洛方法模拟生成了天气强度时间序列，进而计算得到了不同天气条件下的系统运行状态；文献[106]建立了考虑冰风荷载的输电线路故障概率时变模型，采用模糊数学方法预测了输电线路的短期运行风险；文献[107]提出了用于计算输电线路载冰率的气象模型，研究了载冰量对输电元件强迫停运率的影响；文献[108]利用地震动衰减方程估算了电网各元件所处位置的地震动强度，结合电网元件脆弱性曲线计算得到了元件的失效概率。

上述模型与方法实际只考虑了单一极端灾害的影响，考虑的灾害类型有限。但实际上电力系统面临着各种极端自然灾害的威胁，只考虑单一灾害类型的评估可能得出片面的结论。此外，极端灾害的参数存在不确定性，同一类灾害的不同场景差异性很大。为此，文献[109]构建了一种适用于多类型极端灾害的通用建模框架，可以将任一灾害的潜在场景抽象为场景权重与元件失效概率组构成的统一格式，如图 3 所示。该框架中灾害概率模型用于刻画灾害场景的不确定性，灾害攻击模型用于描述灾害场景对电力系统的影响。

### 2.3　基于解析法的序贯可靠性评估方法

随着可再生能源等新技术的推广应用，电力系统的序贯分析已成为运行可靠性评估中不可或缺的一方面。文献[110]采用序贯蒙特卡洛方法来分析负荷和可再生能源时序相关性对系统可靠性的影响。文献[111]对 Itaipu 水电厂进行序贯可靠性评估，通过频率和持续时间指标为大坝发电系统的定期维护提供决策依据。然而，传统解析评估方法难以模拟系统状态转移过程，缺乏对时序因素的考虑，无法计算频率和持续时间相关的可靠性指标。为此，文献[63]通过马尔可夫链模型建立不同状态集合之间的转移关系。以两元件的简单电力系统为例，其 4 种系统状态的转移关系如图 4 所示，元件状态之间的转换率为 $\lambda$ 和 $\mu$，转移矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 如式(6)所示。

基于马尔可夫链模型的解析评估方法可以对电力系统进行序贯分析，计算负荷削减频率和持续时间等指标。然而，该方法仅适用于含少量元件的简单电力系统，当元件数增大时，马尔可夫链模型阶数呈指数增加，难以有效计算。文献[112]提出了一种系统状态融合技术，如图 5 所示，通过融合高阶状态和相似状态大幅度降低了马尔可夫链模型的阶数，提高了计算效率，详细过程见附录 A。

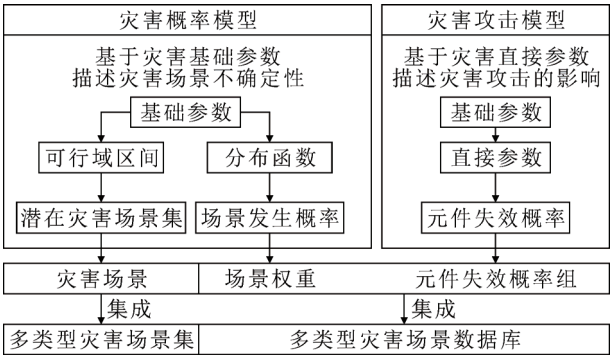



图 3　多类型极端灾害通用建模框架

Fig.3　Universal modeling framework for multi-type extreme disasters

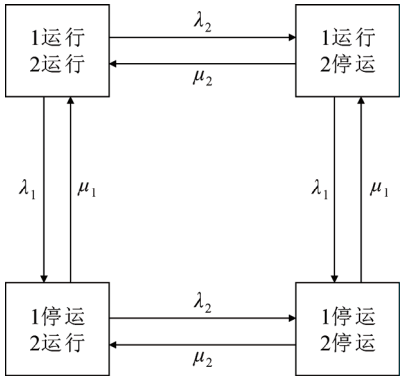



图 4　两元件系统的状态转换图

Fig.4　State transition of two components system

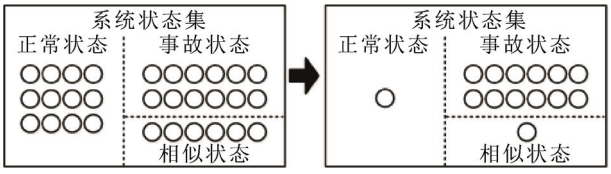



图 5 系统状态融合技术的基本思路

Fig.5 Basic idea of system state mergence technique

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} -(\lambda_1+\lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_2+\mu_1) & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1+\mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\mu_1+\mu_2) \end{bmatrix} \tag{6}$$

## 3 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的未来研究展望

通过对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相关研究的归纳和分析可知，以下问题还有待研究。

1）面向未来高度数字化、智能化、互联化的电力系统，源网荷储协调互动、信息物理融合、多能耦合互联等新技术新设备的运行可靠性评估及影响要素尚未深入研究。

电力信息物理系统[113]、综合能源系统[114]、微网系统[115]等均是未来电力系统的重点发展方向，信息系统和多种能源系统的深度耦合有助于协调控制多种能源设备，提高能源利用效率，促进可再生能源消纳。但是，这种深度耦合也可能导致故障在不同系统之间耦合传播，进一步增加系统安全风险。能源系统与信息系统间、不同能源系统间的模型差异、复杂耦合关系、连锁传播机理以及时间尺度差异都将给运行可靠性评估分析带来巨大挑战。另一方面，在进行含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性性评估时，应全面分析大量新的不确定因素及相应的故障影响后果，这将导致潜在系统状态数量继续爆炸式增长，运行可靠性评估方法的兼容性和高效性仍有待进一步提升。

2）在日趋复杂的电力系统运行可靠性评估中，单一模型驱动或数据驱动方法均存在局限性，模型数据混合驱动方法有待进一步研究。

含高比例可再生能源的电力系统具有元素多、变化快、随机强的新特点，对运行可靠性评估提出了更高的时效性需求。模型驱动方法可以建立准确的最优负荷削减模型，结果可解释性强。然而，对于电力系统的复杂优化问题，其优化求解效率一直难以有效提升。相比而言，数据驱动方法建模过程简单，计算速度快，有望突破模型驱动方法的效率瓶颈。但这种方法强烈依赖大量标签样本数据，且通常为黑箱模型，可解释差，结果准确性难以保证。目前，已有研究提出了数据–模型混合驱动的运行可靠性评估方法，其评估效果值得期待[116]。未来研究的重要方向是如何设计合理的模型与数据联合驱动结构，证明混合驱动方法的有效性，提升计算结果的准确性，并在实际应用中实现准确性和效率的同步提升。

3）近年来，频繁发生的极端事件严重威胁着电力系统的安全可靠运行，且可再生能源极易受到自然条件影响，考虑极端灾害的电力系统运行可靠性在故障机理建模、评估方法体系和应对能力提升等方面仍存在不足。

传统可靠性评估方法主要针对大概率故障下的长期可靠性开展研究，缺乏对考虑小概率、高损失极端事件的系统运行可靠性的研究。然而，各类型的极端事件(如台风、冰灾、地震、人为攻击等)都会对电力系统的正常运行造成严重影响。此外，极端事件的发生、发展和结束都存在强烈的不确定性，导致元件故障机理复杂，难以准确刻画故障影响的时空演化规律。因此在进行运行可靠性评估时，需要充分考虑各种极端事件的不确定性，并在灾前、灾中、灾后全面地分析不同类型极端事件对含高比例可再生能源电力系统可靠性的影响。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

## 参考文献 References

[1] Climate Action Tracker. CAT net zero target evaluations[EB/OL].[2022-12-11]. https: //climateactiontracker. org.

[2] 国家能源局. 国家能源局发布 2022 年可再生能源发展情况并介绍完善可再生能源绿色电力证书制度有关工作进展等情况[EB/OL]. [2023-02-14]. http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/14/content_5741481. htm.
National Energy Administration. The national energy administration releases the development status of renewable energy in 2022 and introduces progress on the improvement of the green power certificate system for renewable energy[EB/OL]. [2023-02-14]. http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/14/content_5741481.htm.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. [2022-06-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623. pdf.
National Development and Reform Commission. The 14th five-year plan for renewable energy development[EB/OL]. [2023-06-01]. https: //www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623. pdf.

[4] 习近平. (受权发布)习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL].[2022-10-16]. http://www.

news. cn/politics/cpc20/2022-10/25/c_1129079429. htm.
XI Jinping. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects——report to the 20th national congress of the communist party of China[EB/OL].[2022-10-16]. http://www.news.cn/politics/cpc20/2022-10/25/c_1129079429.htm.

[5] 李建林，郭兆东，马速良，等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.

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

[7] 黄　豫. 高比例消纳新能源关键在于提升电力系统灵活性[N]. 中国能源报，2021-07-12(2).
HUANG Yu. The key to a high proportion of new energy consumption is to improve the flexibility of the power system[N]. China Energy News, 2021-07-12(2).

[8] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京：清华大学出版社，1986：17-23.
GUO Yongji. Principle and application of power system reliability[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1986: 17-23.

[9] 孙元章，程　林，何　剑. 电力系统运行可靠性理论[M]. 北京：清华大学出版社，2012：36-42.
SUN Yuanzhang, CHENG Lin, HE Jian. Power system operational reliability theory[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2012: 36-42.

[10] 何　剑. 电力系统运行可靠性评估与辅助决策理论和方法[D]. 北京：清华大学，2010.
HE Jian. Theory and methodology of operational reliability assessment and decision-making of power systems[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2010.

[11] 李更丰，黄玉雄，别朝红，等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：12-21.
LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 12-21.

[12] SUN Y Z, CHENG L, YE X H, et al. Overview of power system operational reliability[C]// Proceedings of 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Singapore: IEEE, 2010: 166-171.

[13] CHEN X L, TANG J J, LI W Y. Probabilistic operational reliability of composite power systems considering multiple meteorological factors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 85-97.

[14] HU B, PAN C C, SHAO C Z, et al. Decision-dependent uncertainty modeling in power system operational reliability evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5708-5721.

[15] LIANG C, WANG P, HAN X Q, et al. Operational reliability and economics of power systems with considering frequency control processes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2570-2580.

[16] DING Y, CHENG L, ZHANG Y H, et al. Operational reliability evaluation of restructured power systems with wind power penetration utilizing reliability network equivalent and time-sequential simulation approaches[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 329-340.

[17] JIA H P, DING Y, SONG Y H, et al. Operating reliability evaluation of power systems considering flexible reserve provider in demand side[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3452-3464.

[18] PARVINI Z, ABBASPOUR A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Operational reliability studies of power systems in the presence of energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3691-3700.

[19] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. 2nd ed. New York, USA: Springer, 1996: 182-219.

[20] 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.

[21] KADHEM A A, WAHAB N I A, ARIS I, et al. Computational techniques for assessing the reliability and sustainability of electrical power systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1175-1186.

[22] KUMAR S, SAKET R K, DHEER D K, et al. Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(10): 1799-1815.

[23] GENG L, ZHAO Y, LI W Y. Enhanced cross entropy method for composite power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3129-3139.

[24] 侯　恺. 电力系统可靠性评估方法改进与应用研究[D]. 天津：天津大学，2016.
HOU Kai. Power system reliability assessment methodology improvement and its application[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2016.

[25] BILLINTON R, LI W Y. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. New York, USA: Springer, 1994: 78-83.

[26] 彭吕斌，何　剑，谢开贵，等. 特高压交流和直流输电系统可靠性与经济性比较[J]. 电网技术，2017，41(4)：1098-1105.
PENG Lübin, HE Jian, XIE Kaigui, et al. Comparison of reliability and economy between UHVAC and UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1098-1105.

[27] 王　震，鲁宗相，段晓波，等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化，2011，35(15)：18-24.
WANG Zhen, LU Zongxiang, DUAN Xiaobo, et al. Reliability model and indices of distributed photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 18-24.

[28] 刘文霞，蒋　程，张建华，等. 一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J]. 电力系统保护与控制，2013，41(8)：73-80.
LIU Wenxia, JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, et al. A multistage reliability model of wind turbines for sequential Monte Carlo simulation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 73-80.

[29] ZHANG P, LI W Y, LI S, et al. Reliability assessment of photovoltaic power systems: review of current status and future perspectives[J]. Applied Energy, 2013, 104: 822-833.

[30] 孟凡成，郭　琦，康宏伟，等. 计及集中式和分布式新能源的电力系统连锁故障模拟[J]. 高电压技术，2022，48(1)：189-198.
MENG Fancheng, GUO Qi, KANG Hongwei, et al. Cascading failure simulation for power system with utility-scale and distributed renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 189-198.

[31] 陈 凡，卫志农，张小莲，等. 计入风速与风电机组故障相关性的风电场可靠性建模及其应用[J]. 中国电机工程学报，2016，36(11)：2900-2908.
CHEN Fan, WEI Zhinong, ZHANG Xiaolian, et al. Reliability modeling of wind farms incorporating correlation between wind speed and failure of wind turbines and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2900-2908.

[32] 陈永进，任 震，黄雯莹. 考虑天气变化的可靠性评估模型与分析[J]. 电力系统自动化，2004，28(21)：17-21.
CHEN Yongjin, REN Zhen, HUANG Wenying. Model and analysis of power system reliability evaluation considering weather change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 17-21.

[33] CHA S T, JEON D H, BAE I S, et al. Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects[C]// Proceedings of 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, USA: IEEE, 2004: 451-456.

[34] NGUYEN N, ALMASABI S, MITRA J. Impact of correlation between wind speed and turbine availability on wind farm reliability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2392-2400.

[35] LEI H T, SINGH C. Non-sequential Monte Carlo simulation for cyber-induced dependent failures in composite power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1064-1072.

[36] JIMADA-OJUOLAPE B, TEH J. Composite reliability impacts of synchrophasor-based DTR and SIPS cyber-physical systems[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(3): 3927-3938.

[37] 梁冰冰. 适用于电力系统可靠性分析的负荷模型[J]. 农村电气化，2009(1)：7-8.
LIANG Bingbing. Load model applicable to power system reliability analysis[J]. Rural Electrification, 2009(1): 7-8.

[38] LI W Y, ZHOU J Q, XIE K G, et al. Power system risk assessment using a hybrid method of fuzzy set and Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 336-343.

[39] WAN C, ZHAO J, SONG Y H, et al. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 38-46.

[40] 施云辉. 考虑可再生能源不确定性的电力系统多阶段鲁棒调度方法[D]. 杭州：浙江大学，2021.
SHI Yunhui. Multi-stage robust dispatch of power system considering uncertainties of renewable energy[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2021.

[41] PINSON P, KARINIOTAKIS G. Conditional prediction intervals of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1845-1856.

[42] 徐 林，阮新波，张步涵，等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报，2012，32(25)：88-98.
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.

[43] 颜 伟，任洲洋，赵 霞，等. 光伏电源输出功率的非参数核密度估计模型[J]. 电力系统自动化，2013，37(10)：35-40.
YAN Wei, REN Zhouyang, ZHAO Xia, et al. Probabilistic photovoltaic power modeling based on nonparametric kernel density estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 35-40.

[44] 王 皓. 含高比例可再生能源的发电系统可靠性评估[D]. 保定：华北电力大学，2020.
WANG Hao. Reliability evaluation of power generation system with high-proportion renewable energy[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2020.

[45] KUDISH A I, IANETZ A. Analysis of daily clearness index, global and beam radiation for Beer Sheva, Israel: partition according to day type and statistical analysis[J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(4): 405-416.

[46] AKUFFO F O, BREW-HAMMOND A. The frequency distribution of daily global irradiation at Kumasi[J]. Solar Energy, 1993, 50(2): 145-154.

[47] HOLLANDS K G T, HUGET R G. A probability density function for the clearness index, with applications[J]. Solar Energy, 1983, 30(3): 195-209.

[48] WANG L, YEH T H, LEE W J, et al. Benefit evaluation of wind turbine generators in wind farms using capacity-factor analysis and economic-cost methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 692-704.

[49] YEH T H, WANG L. A study on generator capacity for wind turbines under various tower heights and rated wind speeds using Weibull distribution[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 592-602.

[50] GARCIA A, TORRES J L, PRIETO E, et al. Fitting wind speed distributions: a case study[J]. Solar Energy, 1998, 62(2): 139-144.

[51] 杨锡运，刘玉奇，张 璜，等. 含并网光伏电站的系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2689-2696.
YANG Xiyun, LIU Yuqi, ZHANG Huang, et al. Reliability evaluation method of grid connected with photovoltaic power station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2689-2696.

[52] 胡国伟，别朝红，王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报，2013，28(5)：58-65.
HU Guowei, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.

[53] 邱宜彬，欧阳誉波，徐 蓓，等. 基于混合藤 Copula 模型的风光联合发电相关性建模及其在无功优化中的应用[J]. 电网技术，2017，41(3)：791-798.
QIU Yibin, OUYANG Yubo, XU Bei, et al. Modeling of multi-dimensional wind and PV farm output correlation based on mixture vine copula structures and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 791-798.

[54] EKSTRÖM J, KOIVISTO M, MELLIN I, et al. A statistical model for hourly large-scale wind and photovoltaic generation in new locations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1383-1393.

[55] REI A M, SCHILLING M T. Reliability assessment of the Brazilian power system using enumeration and Monte Carlo[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1480-1487.

[56] LIU H T, SUN Y Z, WANG P, et al. A novel state selection technique for power system reliability evaluation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(6): 1019-1027.

[57] AL-SHAALAN A M. Contingency selection and ranking for composite power system reliability evaluation[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2020, 32(2): 141-147.

[58] DAVIS C M, OVERBYE T J. Multiple element contingency screening[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1294-1301.

[59] SHARAF T A M, BERG G J. Reliability evaluation in power-system transmission planning: practical considerations[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1988, 37(3): 274-279.

[60] LIU Y, SINGH C. Reliability evaluation of composite power systems using Markov cut-set method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 777-785.

[61] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京：清华大学出版社，2003：54-59.
GUO Yongji. Power system reliability analysis[M]. Beijing, China:

Tsinghua University Press, 2003: 54-59.

[62] 赵　渊，周家启，刘　洋. 发输电组合系统可靠性评估中的最优负荷削减模型分析[J]. 电网技术，2004，28(10)：34-37.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Yang. Analysis on optimal load shedding model in reliability evaluation of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 34-37.

[63] MELO A C G, PEREIRA M V F, DA SILVA A M L. A conditional probability approach to the calculation of frequency and duration indices in composite reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1118-1125.

[64] PEREIRA M V F, PINTO L M V G. A new computational tool for composite reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 258-264.

[65] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 周家启，卢继平，胡小正，等译. 北京：科学出版社，2006：66-71.
LI Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. ZHOU Jiaqi, LU Jiping, HU Xiaozheng, et al, translated. Beijing, China: Science Press, 2006: 66-71.

[66] BILLINTON R. Power system reliability evaluation[M]. New York, USA: Taylor & Francis, 1970: 204-230.

[67] SINGH C, BILLINTON R. System reliability modelling and evaluation[M]. London, UK: Hutchinson, 1977: 63-88.

[68] DHILLON B S, SINGH C. Engineering reliability: new techniques and applications[M]. New York, USA: J. Wiley and Sons, 1981: 222-232.

[69] JIA Y B, WANG P, HAN X Q, et al. A fast contingency screening technique for generation system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4127-4133.

[70] HOU K, JIA H J, LI X, et al. Impact-increment based decoupled reliability assessment approach for composite generation and transmission systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(3): 586-595.

[71] DA SILVA A M L, DE RESENDE L C, DA FONSECA MANSO L A, et al. Composite reliability assessment based on Monte Carlo simulation and artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1202-1209.

[72] LUO X C, SINGH C, PATTON A D. Power system reliability evaluation using learning vector quantization and Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(2): 163-169.

[73] PINDORIYA N M, JIRUTITIJAROEN P, SRINIVASAN D, et al. Composite reliability evaluation using Monte Carlo simulation and least squares support vector classifier[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2483-2490.

[74] SAFDARIAN A, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F. Composite power system adequacy assessment based on postoptimal analysis[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2013, 21(1): 90-106.

[75] YONG P, ZHANG N, KANG C Q, et al. MPLP-based fast power system reliability evaluation using transmission line status dictionary[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1630-1640.

[76] LIU Z Y, HOU K, JIA H J, et al. A Lagrange multiplier based state enumeration reliability assessment for power systems with multiple types of loads and renewable generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3260-3270.

[77] YANG Y, YANG Z F, YU J, et al. Fast calculation of probabilistic power flow: a model-based deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2235-2244.

[78] DONG Z H, HOU K, MENG H M, et al. Data-driven power system reliability evaluation based on stacked denoising auto-encoders[J]. Energy Reports, 2022, 8(Supplement 1): 920-927.

[79] YAN Z M, XU Y. Real-time optimal power flow: a Lagrangian based deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3270-3273.

[80] DING T, LI C, YAN C, et al. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3803-3813.

[81] BILLINTON R, ZHANG W. State extension for adequacy evaluation of composite power systems-applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 427-432.

[82] DING Y, SINGH C, GOEL L, et al. Short-term and medium-term reliability evaluation for power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 896-906.

[83] LIU X N, HOU K, JIA H J, et al. A planning-oriented resilience assessment framework for transmission systems under typhoon disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5431-5441.

[84] LEI Y K, SUN Y G, HOU K, et al. Impact increment based hybrid reliability assessment method for transmission systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 317-328.

[85] YANG W H, CAO M S, GE P J, et al. Risk-oriented renewable energy scenario clustering for power system reliability assessment and tracing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 183995-184003.

[86] 廖伯书. 线性规划的灵敏度分析在发输电系统可靠性评估中的应用[J]. 水电能源科学，1991，9(2)：154-160.
LIAO Boshu. Application of linear programming sensitivity analysis in reliability evaluation of bulk power system[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1991, 9(2): 154-160.

[87] HOU K, TANG P T, LIU Z Y, et al. A fast optimal load shedding method for power system reliability assessment based on shadow price theory[J]. Energy Reports, 2022, 8(Supplement 1): 352-360.

[88] HOU K, TANG P T, LIU Z Y, et al. Reliability assessment of power systems with high renewable energy penetration using shadow price and impact increment methods[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 635071.

[89] ZHANG N, CHENG J N, WANG Y. Probabilistic optimal energy flow of district multienergy systems: an MPLP-based online dictionary-learning approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 4867-4877.

[90] LIU Y X, WANG Y, YONG P, et al. Fast power system cascading failure path searching with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2274-2283.

[91] ZHUO Z Y, DU E S, ZHANG N, et al. Incorporating massive scenarios in transmission expansion planning with high renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1061-1074.

[92] LEI X Y, YANG Z F, YU J, et al. Data-driven optimal power flow: a physics-informed machine learning approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 346-354.

[93] ZUO J, PENG S, YANG Y, et al. A modified multiparameter linear programming method for efficient power system reliability assessment[J]. Processes, 2022, 10(11): 2188.

[94] LIU Z Y, TANG P T, HOU K, et al. A Lagrange-multiplier-based reliability assessment for power systems considering topology and injection uncertainties[J/OL].[2023-06-01]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023: 1-11. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3258319.

[95] 管　霖，黄济宇，蔡锴涵，等. 图深度学习技术在电力系统分析与决策领域的应用与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3405-3422.
GUAN Lin, HUANG Jiyu, CAI Zihan, et al. Application and prospect of graph deep learning technique in power system analysis and deci-

sion[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3405-3422.
[96] SINGH C, WANG L F. Role of artificial intelligence in the reliability evaluation of electric power systems[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2008, 16(3): 189-200.
[97] 谢开贵，周家启. 基于 ANN 削减负荷的发输电组合系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化，2002，26(22)：31-33，44.
XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. Reliability evaluation of power generation and transmission system using artificial neural network for load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 31-33, 44.
[98] ZHOU Y, PAHWA A, YANG S S. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1683-1690.
[99] LI G F, ZHANG P, LUH P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U.S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
[100] HAMADA A, EL DAMATTY A A. Failure analysis of guyed transmission lines during F2 tornado event[J]. Engineering Structures, 2015, 85: 11-25.
[101] FU X, LI H N. Uncertainty analysis of the strength capacity and failure path for a transmission tower under a wind load[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 147-155.
[102] 吴勇军，薛禹胜，谢云云，等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化，2016，40(2)：20-29，83.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29, 83.
[103] 何　俊，于　华，邓长虹，等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1277-1285.
[104] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
[105] FU G H, WILKINSON S, DAWSON R J, et al. Integrated approach to assess the resilience of future electricity infrastructure networks to climate hazards[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3169-3180.
[106] 孙　羽，王秀丽，王建学，等. 架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测[J]. 中国电机工程学报，2011，31(7)：21-28.
SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 21-28.
[107] 王建学，张　耀，吴　思，等. 大规模冰灾对输电系统可靠性的影响分析[J]. 中国电机工程学报，2011，31(28)：49-56.
WANG Jianxue, ZHANG Yao, WU Si, et al. Influence of large-scale ice disaster on transmission system reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 49-56.
[108] 孙江玉，刘　创，欧阳敏，等. 地震灾害下电网性能研究综述——以弹性视角为主[J]. 自然灾害学报，2018，27(2)：14-23.
SUN Jiangyu, LIU Chuang, OUYANG Min, et al. Review of performance studies on electric power grids under seismic hazards—with a focus on resilience perspective[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 14-23.
[109] WANG H, HOU K, ZHAO J B, et al. Planning-oriented resilience assessment and enhancement of integrated electricity-gas system considering multi-type natural disasters[J]. Applied Energy, 2022, 315: 118824.
[110] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ R A, DA SILVA A M L. Reliability assessment of time-dependent systems via sequential cross-entropy Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2381-2389.
[111] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ R A, OVIEDO-SANABRIA R E, DA SILVA A M L. Generating capacity reliability assessment of the Itaipu hydroelectric plant via sequential Monte Carlo simulation[C] // Proceedings of 2014 Power Systems Computation Conference. Wroclaw, Poland: IEEE, 2014: 1-7.
[112] HOU K, JIA H J, XU X D, et al. A continuous time Markov chain based sequential analytical approach for composite power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 738-748.
[113] 郭庆来，辛蜀骏，孙宏斌，等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估：驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1481-1489.
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
[114] 贾宏杰，王　丹，徐宪东，等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化，2015，39(7)：198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
[115] 贾宏杰，王梓博，余晓丹，等. 城市园区微网系统端对端能量交易技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2453-2468.
JIA Hongjie, WANG Zibo, YU Xiaodan, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading technology in urban community microgrid system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2453-2468.
[116] 朱继忠，骆腾燕，吴皖莉，等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 Ⅱ：数据驱动法与模型−数据混合驱动法[J]. 电工技术学报，2022，37(13)：3227-3240.
ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems II: data-driven method and model-data hybrid driven method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3227-3240.



**侯　恺**
1988—，男，博士，副教授，博导
主要从事电力系统与综合能源系统的可靠性及韧性评估方面的研究
E-mail: khou@tju.edu.cn

HOU Kai
Ph.D.
Associate professor



**刘泽宇**(通信作者)
1996—，男，博士生
主要从事电力系统与综合能源系统可靠性评估方面的研究
E-mail: tjulzy@tju.edu.cn

LIU Zeyu
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2023-04-13　修回日期　2023-06-16　　编辑　程子丰

## 附录 A

1、考虑拓扑变化的拉格朗日乘子灵敏度分析法

该方法利用最优基的所在列数(column number of optimal basis, $N_{CB}$)构建新拓扑结构下拉格朗日乘子，如图 A1 所示。首先，通过 OPF 分析计算初始拓扑状态，保留其 $\boldsymbol{N}_{CB}$=1, 3,⋯, $n$。然后，根据 *Col.* 构建新拓扑状态下的基矩阵 $B'$和拉格朗日乘子 $w$，验证其是否最优性判据：

$$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{B}} = \left(\boldsymbol{B}'\right)^{-1}\boldsymbol{b} = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{N}_{\mathrm{CB}})^{-1}\boldsymbol{b} > \boldsymbol{0} \tag{A1}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{c} - \boldsymbol{c}_{\mathrm{B}}\left(\boldsymbol{B}'\right)^{-1}\boldsymbol{A} = \boldsymbol{c} - \boldsymbol{c}_{\mathrm{B}}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{N}_{\mathrm{CB}})^{-1}\boldsymbol{A} \geq 0 \tag{A2}$$

如果最优性判据满足，则新拓扑状态的最优负荷削减量可通过式(A3)计算得到，否则，应通过 OPF 重新分析计算新拓扑状态的故障影响。

$$f_{\mathrm{LC}} = \boldsymbol{c}_{\mathrm{B}}\left(\boldsymbol{B}'\right)^{-1}\boldsymbol{b} = \boldsymbol{c}_{\mathrm{B}}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{N}_{\mathrm{CB}})^{-1}\boldsymbol{b} = \boldsymbol{w}\boldsymbol{b} \tag{A3}$$

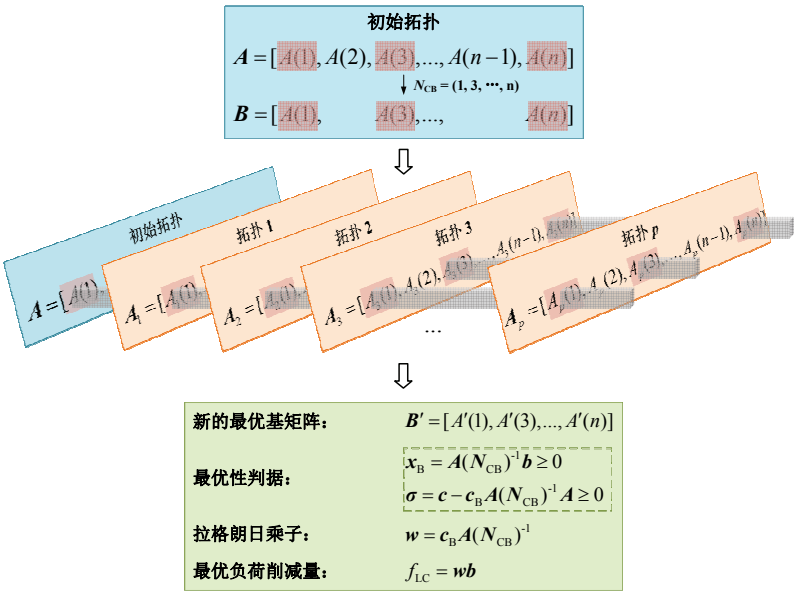



图 A1　考虑拓扑变化的拉格朗日乘子灵敏度分析法

Fig.A1　Lagrange-multiplier-based sensitivity analysis method considering topology changes

2、基于马尔可夫链的系统状态融合技术

对于系统状态影响空间 $\Omega_X$={$x_1, x_2, \cdots, x_{N+1}$},引入负荷曲线后，$x_i$扩展为集合 $x_i$={$x_{i,1}, x_{i,2}, \cdots, x_{i,N_L}$}，其中 $x_{i,u}$是在负荷水平 $L_u$ 下系统状态 $s_i$的负荷削减量，$N_L$是负荷的聚类数。定义状态影响 $x_i$ 和 $x_j$ 的差值为

$$d_{ij} = \max\left(\left|x_{i,k} - x_{j,k}\right|\right), \quad k = 1,2,\cdots,N_{\mathrm{L}} \tag{A4}$$

进一步，$\Omega_X$中的状态影响可以分为几组，各组内状态影响之间的差值小于阈值 $\delta_{SM}$。设某状态影响组 $\Omega_{xi}$={$x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}$}，其中 $x_{ik}$表示系统状态 $s_i$中第 $k$ 个元件状态，$m$ 表示系统元件数量。综上，在平稳分布时，$\Omega_{xi}$可融合为单一状态 $x_i^*$：

$$\pi_i^* = \sum_{k=1}^{m}\pi_{i_k} \tag{A5}$$

$$x_i^* = \left(\sum_{k=1}^{m}x_{i_k}\pi_{i_k}\right)\Big/\pi_i^* \tag{A6}$$

$$q_{ij}^* = \left(\sum_{k=1}^{m}q_{i_kj}\pi_{i_k}\right)\Big/\pi_i^*, \quad j \neq i \tag{A7}$$

$$q_{ji}^* = \sum_{k=1}^{m}q_{ji_k}, \quad j \neq i \tag{A8}$$

$$q_{ii}^* = \left(\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}q_{i_ji_k}\pi_{i_j}\right)\Big/\pi_i^* \tag{A9}$$

式中：带星号标注的为融合后的状态参数；$\pi_i$ 和 $\pi_{ik}$ 分别是系统状态 $s_i$ 和元件状态 $e_k$ 的平稳分布概率；$q_{ij}$ 是 $\boldsymbol{Q}$ 中第 $i$ 行 $j$ 列的元素。