

# 保障极端天气下供需安全的新型电力系统电源规划

阮前途<sup>1</sup>, 叶 荣<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建省福州市 350001;

2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建省福州市 350012)

**摘要:**近年来,愈加频繁的持续性高温干旱、低温冰冻等极端天气造成了区域电力系统供需失衡,导致大规模停电或限电的发生。主要原因是新型电力系统中,极端天气对供需平衡的影响更大。针对长期性气候变化,阐明了电力系统弹性评价与提升的整体研究框架。首先,构建含气候参数的系统运行抽象模型,以刻画不同类型极端天气对各类电源、电网、负荷的影响;其次,提出基于去噪变分自编码器算法的极端场景集生成方法;最后,面向持续性极端天气的供需保障,提出新型电力系统多类型电源扩展规划方法。基于中国南方某省份的极端天气历史数据生成典型源荷场景集,结合IEEE标准算例进行仿真,验证了所提协同规划方法的有效性。

**关键词:**新型电力系统; 弹性; 供需平衡; 极端天气; 场景生成; 电源规划

## 0 引言

近年来,随着全球气候变化,极端天气愈加频发,已多次导致大面积停电或缺电,严重影响局部区域的生产生活秩序<sup>[1-2]</sup>。极端天气对电力系统的影响可以分为2类:一类是洪水、雷暴等灾害,导致电力基础设施损毁,系统发输变电能力减弱;另一类是持续性高温或寒潮等天气,造成新能源、水电等电源出力下降,同时,电采暖或制冷负荷需求增加,导致电力供需严重失衡,用户因调度决策或过高电价而停电。

本文聚焦于第2类天气影响事件,例如,2021年2月美国得克萨斯州遭遇极端寒潮,约40 GW风电机组因覆冰而无法正常运转,多地出现大规模连续停电,约270万户家庭“无电可用”<sup>[3]</sup>;2021年1月初,中国多地出现了由极寒天气导致的电源出力不足、采暖负荷激增的源荷失衡事件<sup>[4]</sup>;2022年夏季,作为“水电大省”的四川省遭遇历史同期最极端高温、最少降雨量、最大电力负荷“三最”叠加局面,电力缺口超过10 GW,部分工商业负荷限电超过一个星期,直接经济损失高达250多亿元<sup>[5-7]</sup>。

第2类天气影响事件频发的根本原因是气候变化和新能源占比提升的双重因素叠加。随着风电、光伏开发使用成本的降低,中国新能源发电装机容量迅速增长,仅2023年就新增290 GW,占全球增量

的63%,电源出力对天气的敏感性大大增加<sup>[8]</sup>。随着这一趋势的不断发展,气候变化将成为电力系统安全保供中的重要考量因素,新型电力系统必须具备极端天气下保障关键负荷持续供电的能力<sup>[9]</sup>。

近年来,学术界与工业界共同提出了“电力系统弹性(resilience)”的概念,以表征电力系统在小概率、高风险事件中最大限度保障负荷供电的能力。在极端天气下的电力系统建模、评估、恢复策略等方面,已进行了大量研究<sup>[10]</sup>。针对气候对源荷特性的影响,文献[11-12]提出了考虑风速、气压、温度、湿度、光照强度等因素的新能源场站出力预测方法。此外,文献[13]通过分析气候因子与电力负荷的时空关联性,将气候敏感负荷从总体负荷中分离出来,并进行专门预测以提升负荷预测的准确性。文献[14]提出了结合空间相关性建模和元件状态时序连接关系的概率化评估方法,以及基于极值理论的天气场景构建方法,但缺少具体的场景建模和算例分析来验证所提方法的有效性。文献[15]研究了高温干旱天气对水电、火电出力的影响,提出了电源层面的弹性指标,但未综合考虑极端天气对源、荷的双重影响,不能反映此类场景下的电网供需不平衡程度。对极端天气灾损特征的评估是提升系统弹性的基础性工作<sup>[16]</sup>,弹性评估指标可以分为2类:一类是基于资源充裕性、元件冗余度的静态弹性评估指标<sup>[17-18]</sup>;另一类是根据电力系统在极端事件中、事后恢复过程建立的动态弹性评估指标<sup>[19-20]</sup>。在此基础上,文献[21-22]探究了不同场景下电力系统的应

收稿日期:2023-12-27;修回日期:2024-07-16。

上网日期:2024-09-27。

急控制策略和分布式电源、储能设备的优化配置方法。但现有弹性评估研究主要关注极端天气损毁电力基础设施导致的停电,应对策略多从加固输电线路、布局各种应急资源使系统快速恢复2个方面进行优化决策。

综上,现有研究一方面聚焦于极端天气下的源荷特性改变,另一方面聚焦于电网拓扑破坏后,通过小型柴油发电机、应急电源车的优化调度保障重要负荷的短时间应急供电。然而,对于极端天气导致的系统全局性、结构性、持续性供需失衡风险,以及基于电源规划的针对性保障措施,目前研究尚不充分。因此,本文面向新型电力系统,揭示极端天气对电源出力与负荷变化的作用机理,更加全面地分析系统在极端天气下不同时间尺度的供需保障能力,并提出面向弹性提升的电源规划方法。首先,构建多维气候因素驱动的水电、风电、光伏等新能源场站出力模型与负荷集群模型,准确刻画持续性极端天气对于源荷的影响;其次,基于去噪变分自编码器(denoising variational autoencoder, DVAE)算法,提出涵盖气温、辐照度与风速3个气候因素的典型极端天气场景集生成方法,以较高精度生成与原始天气数据时序特征高度一致的多维天气场景,有力支撑了系统弹性提升研究;最后,以典型极端天气场景集为边界条件,计及电源日前调度策略与用户负荷调控可行域,提出基于两阶段随机规划的电源布局方法,在长时间尺度下提升系统的极端天气保供能力。

## 1 极端天气下新型电力系统弹性研究思路

本章分析极端天气对新型电力系统供需的影响过程,提出含气候参数的电力系统生产运行模型。

### 1.1 极端天气对电力系统供需影响的过程

常见的气候要素有温度、湿度、风速、光照强度、降水等,这些要素均对电力需求和供应具有较大的影响,直接决定了水电、风电、光伏等可再生能源的发电能力与区域负荷水平。根据某一类天气的发展特征,可归纳为几种典型的天气过程,其中,主要的天气过程有区域性高温、干旱,以及区域性低温、冰冻和持续性降水<sup>[23]</sup>。具体分析如下:

1)区域性高温、干旱:当日最高气温大于35℃、日最低气温高于25℃、持续3d及以上为高温天气,当区域内有20%以上面积范围出现高温天气时,则为区域性高温天气。对水电而言,高温天气导致水库蒸发快于补水,因而水电站水位下降,水轮机出力降低<sup>[24]</sup>;对风电而言,高温容易导致风机过热,风机需要降功率运行<sup>[25]</sup>;对网侧而言,架空线路输电容

量因过热而降低<sup>[26]</sup>,配电变压器发生故障的概率增大。

2)区域性低温、冰冻<sup>[27-28]</sup>:在中国中东部地区,大范围大气环流演变导致冷空气积聚并向南移动,这个过程往往带来剧烈的降温和大风天气,一般出现在春季3至4月、秋季10至11月,持续时间一般为3~4d,最长可达8~9d。低温降雪天气可导致风机叶片结冰、风电场出力下降<sup>[3]</sup>。对于燃气供热地区,由于取暖用气量大增且上游高压输气管线容量达到极限,燃气机组由于供气不足而出力受限<sup>[5]</sup>。

3)持续性降水<sup>[29]</sup>:包括连续性或阵发性的大范围雨雪及夏季暴雨。中国不同区域雨季时间不同,通常出现在6至8月。降水导致的内涝往往造成变压器停运、架空线路损毁等。

本文关注天气对供需的影响过程。如图1所示,持续性高温、低温天气一方面造成制冷、取暖负荷需求增大,另一方面造成水电、风光出力下降,最终导致用户大规模停电或限电。

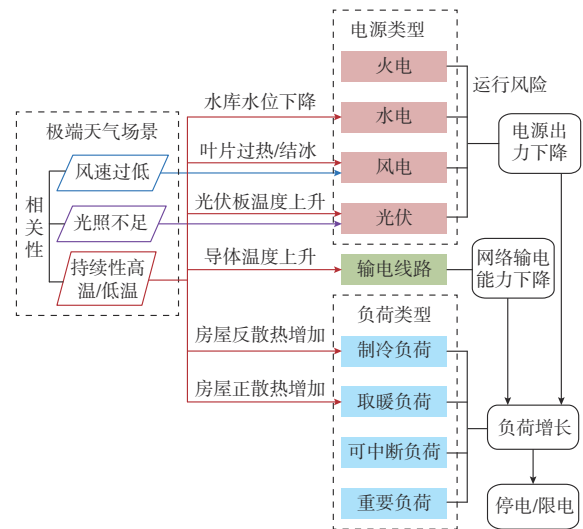


图1 极端天气与电力系统供需失衡的关系  
Fig. 1 Relationship between extreme weather and supply-demand imbalance of power system

### 1.2 含气候参数的电力系统运行模型

含多类型新能源场站的电力系统日前优化调度模型可用矩阵形式表达。目标函数式(1)为火电厂24h的总发电费用 $f_c(\cdot)$ 最小。

$$\min f_c(P_G) \quad (1)$$

式中: $P_G$ 为火电厂出力。

约束条件可归纳为由运行状态变量与系统参数、气候参数构成的等式约束式(2)与不等式约束式(3)。

$$f_{eq}(P_G, P_H, P_W, P_{PV}, P_D(\theta)) = 0 \quad (2)$$

$$f_{\text{ineq}}(P_G, P_H, P_W, P_{PV}, P_D(\theta)) \leq g_{\text{ineq}}(\bar{P}_G, \bar{P}_{RG}, \bar{P}_H(\theta), \bar{P}_W(\boldsymbol{w}, \theta), \bar{P}_{PV}(r, \theta), \bar{P}_L(\theta)) \quad (3)$$

式中:  $f_{\text{eq}}(\cdot)$ 、 $f_{\text{ineq}}(\cdot)$  分别为等式约束函数和不等式约束函数;  $g_{\text{ineq}}(\cdot)$  为不等式约束上限;  $P_H$ 、 $P_W$ 、 $P_{PV}$  分别为水电站、风电场、光伏电站出力;  $P_D(\theta)$  为节点负荷;  $\bar{P}_G$ 、 $\bar{P}_{RG}$ 、 $\bar{P}_H(\theta)$ 、 $\bar{P}_W(\boldsymbol{w}, \theta)$ 、 $\bar{P}_{PV}(r, \theta)$ 、 $\bar{P}_L(\theta)$  分别为火电厂出力上限、火电厂爬坡约束、水电站出力上限、风电场出力上限、光伏电站出力上限、输电线路容量, 这些上限共同构成了系统的运行可行域;  $\boldsymbol{w}$ 、 $r$ 、 $\theta$  分别为风速、辐照度、气温这3个维度的天气参数。  $\boldsymbol{w}$ 、 $r$ 、 $\theta$  分别为  $N_w \times T$ 、 $N_r \times T$ 、 $N_b \times T$  矩阵, 其中,  $N_b$  为电网总节点数,  $N_r$  为光伏电站节点数,  $N_w$  为风电场节点数,  $T$  为极端事件代表性场景累计的时间步长数。

式(2)包括节点功率平衡约束与电网潮流约束; 式(3)主要包括各类电源的出力约束, 以及输电线路的容量约束。一般情况下, 电力系统的状态参数  $P_D(\theta)$ 、 $\bar{P}_L(\theta)$  与电源出力约束  $\bar{P}_H(\theta)$ 、 $\bar{P}_W(\boldsymbol{w}, \theta)$ 、 $\bar{P}_{PV}(r, \theta)$  均受到天气参数的显著影响, 尤其是持续性高温或极寒天气往往造成负荷参数的增大与新能源场站出力上限的缩减, 系统源荷平衡矛盾凸显。若不考虑切负荷, 则运行调度模型可能出现无解情况, 这就是极端天气导致新型电力系统供需风险的典型场景。因此, 需要在运行层面通过需求侧响应或有序用电削减  $P_D(\theta)$ , 在规划层面通过布局电源拓展运行可行域。

综上, 研究气候对新型电力系统影响的关键在于依据极端天气下源荷的历史数据, 构建电源与负荷的气候影响模型。在给定时间段内, 气候参数的场景集  $S$  如式(4)所示。

$$S = \{\theta, r, \boldsymbol{w}\} \quad (4)$$

在运行层面,  $T$  可取多个极端天气典型日; 而在规划层面, 由于电源的寿命周期较长,  $T$  应取新能源场站建成后若干年的典型日, 理论上应包括对未来气候的预测, 以及负荷增长趋势的预测。

## 2 电源与负荷的气候敏感性模型

基于影响新能源场站出力的天气参数集, 本章分别构建新能源场站、负荷、输电线路的气候敏感性模型。

### 2.1 风电机组

风电机组通过叶轮和同步发电机将风能转化为电能, 其出力取决于实时风速与风机出力特性曲线, 计算公式如式(5)所示<sup>[30]</sup>。

$$P_{W,t} = \min\left(\frac{1}{2}\rho_a A C_p \omega_t, \frac{1}{2}\rho_a A C_p \omega_n^3\right) \quad (5)$$

式中:  $P_{W,t}$  为风电机组在  $t$  时刻的实时出力;  $\rho_a$  为空气密度;  $A$  为扫风面积;  $C_p$  为风机效率系数;  $\omega_t$  为  $t$  时刻的风速;  $\omega_n$  为风机在额定功率下的风速。其中,  $\rho_a$  随着温度升高而降低, 当气温从  $0^\circ\text{C}$  升至  $40^\circ\text{C}$  时,  $\rho_a$  从  $1.29 \text{ kg/m}^3$  降至  $1.08 \text{ kg/m}^3$ 。

此外, 当环境温度超过一定阈值(通常为  $40^\circ\text{C}$ ) 时, 为防止转子过热而损毁, 风机通常采取降功率运行<sup>[25]</sup>, 降功率特性曲线见附录 A。

### 2.2 光伏发电系统

光伏发电系统的输出功率随着太阳辐照度同比变化, 而温度也会影响太阳能电池的发电效率。假设光伏逆变器的控制策略可保障光伏组件在最大功率点运行, 其输出功率与正常范围内的太阳辐照度成正比。在额定功率范围内, 一个光伏组件的输出功率与光伏板法向入射辐照度成正比<sup>[8]</sup>, 如式(6)所示。

$$P_{PV,t} = \min\left\{\frac{1}{1000} r_t P_{PVn} [1 - 0.005(\theta_{a,t} - 25^\circ\text{C})], P_{PVn}\right\} \quad (6)$$

式中:  $P_{PV,t}$  为光伏发电系统在  $t$  时刻的实时出力;  $r_t$  为  $t$  时刻的辐照度;  $\theta_{a,t}$  为  $t$  时刻的环境温度;  $P_{PVn}$  为光伏发电系统在标准测试条件下的出力。

例如, 当光伏板工作温度达到  $55^\circ\text{C}$  时, 相同辐照度下的输出功率比  $25^\circ\text{C}$  时降低  $15\%$ 。

### 2.3 水电机组

水电机组的出力是由水流量与水压共同决定的, 这2个变量都与水库的水位相关, 而在较长的一段时间内, 水位与天气条件和泄洪调度行为密切相关。当天气持续干热、水库大量蒸发导致水位下降时, 水电机组的出力会降低。水电机组的近似出力由式(7)确定<sup>[15]</sup>。

$$P_{H,t} = \min(1 \times 10^{-6} \eta_H Q_{tb} \rho_w g H_{\text{net}}, P_{Hn}) \quad (7)$$

式中:  $P_{H,t}$  为水电机组在  $t$  时刻的实时出力;  $\eta_H$  为水电机组的发电效率;  $Q_{tb}$  为水轮机通过的水流速;  $\rho_w$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $H_{\text{net}}$  为水位相对于水轮机的高程, 又称重力水头;  $P_{Hn}$  为水电机组额定出力。

水库水位在给定时间段( $\Delta T$ )内的增量等于净注入流量的积分, 涉及上游注入流速( $Q_m$ )、水面蒸发速率( $Q_{\text{eva}}$ )、水底渗漏速率( $Q_{\text{leak}}$ )、泄洪流速( $Q_{\text{out}}$ ), 以及水轮机通过的水流速( $Q_{tb}$ )5个参数,  $H_{\text{net}}$  的表达式如式(8)<sup>[31-32]</sup>所示。

$$H_{\text{net}} = H_{\text{net}0} + \int_0^{\Delta T} f_{\text{Re}}(Q_{\text{in}} - Q_{\text{eva}} - Q_{\text{leak}} - Q_{\text{out}} - Q_{\text{tb}}) dt \quad (8)$$

式中:  $H_{\text{net}0}$  为初始重力水头,  $t=0$  为  $H_{\text{net}0}$  对应的时刻;  $f_{\text{Re}}(\cdot)$  为净注入流量的函数。

$Q_{\text{leak}}$  与水库地质条件相关, 基本不受天气影响;  $Q_{\text{out}}$  由水利部门调度决策;  $Q_{\text{eva}}$  受气候因素影响较大。由于水库的坡面不规则, 函数  $f_{\text{Re}}(\cdot)$  为非线性。当水库水位变化较小时, 可近似认为坡面是垂直的。在此基础上, 若各种流量参数恒定, 则式(8)可近似为式(9)。

$$H_{\text{net}} \approx H_{\text{net}0} + \frac{(Q_{\text{in}} - Q_{\text{eva}} - Q_{\text{leak}} - Q_{\text{out}} - Q_{\text{tb}}) \Delta T}{A_{\text{res}}} \quad (9)$$

式中:  $A_{\text{res}}$  为水库面积。

一般地,  $Q_{\text{eva}}$  主要受水汽压差  $\Delta e$ 、水汽温差  $\Delta \theta$ 、空气相对湿度  $h$ 、水面上方风速  $w_1$  等因素影响。若将4个因素的影响解耦, 则  $Q_{\text{eva}}$  可用经验公式(10)模拟<sup>[24]</sup>。

$$Q_{\text{eva}} = \Delta e f_{\text{H}}(\Delta \theta) f_{\text{M}}(h) f_{\text{W}}(w_1) \quad (10)$$

式中:  $f_{\text{H}}(\Delta \theta)$  为水汽温差影响函数;  $f_{\text{M}}(h)$  为相对湿度影响函数;  $f_{\text{W}}(w_1)$  为风速影响函数。

基于多个水库长时间尺度的观测数据, 通过统计学方法可拟合出3个函数。统计模型显示, 当水汽温差由  $0^\circ\text{C}$  升高到  $10^\circ\text{C}$  时, 蒸发速率上升约45%。因此, 在  $Q_{\text{in}}$  与  $Q_{\text{out}}$  恒定的条件下, 气温是影响水库水位的主要因素。此外, 夏季高温、干旱天气导致空气相对湿度降低,  $f_{\text{H}}(\Delta \theta)$  增大, 进一步降低了水库水位<sup>[24]</sup>。

## 2.4 输电线路容量模型

输电线路可传输容量(又称热稳极限)受到环境温度的影响。根据导体的发热与散热机理, 架空线路( $i, j$ )的可传输容量( $\bar{P}_{ij}(\theta_{a,t})$ )可用式(11)估计<sup>[26]</sup>, 其中,  $i, j$  分别为输电线路  $l$  的首端、末端节点编号。

$$\bar{P}_{ij}(\theta_{a,t}) = \frac{\sqrt{9.92(w_l D)^{0.5} + \alpha_1[(\Delta \theta_l + \theta_{a,t})^4 - \theta_{a,t}^4] - \alpha_2 D}}{R_l} \quad (11)$$

式中:  $R_l$  为输电线路  $l$  在  $0^\circ\text{C}$  时的交流电阻;  $w_l$  为输电线路  $l$  上方的风速;  $D$  为导线外径;  $\Delta \theta_l$  为输电线路  $l$  表面平均温升;  $\alpha_1, \alpha_2$  为与导体物理特性相关的参数。

## 2.5 气候敏感性负荷

负荷的组成结构较为复杂, 存在多种分类方

式。按照用户类别, 可分为工业、商业、居民与公共服务负荷。从极端天气应急保电的角度将  $t$  时刻变电站节点负荷( $P_{D,t}$ )分为刚性负荷( $P_{D1,t}$ )、弹性负荷( $P_{D2,t}$ )与可中断负荷( $P_{D3,t}$ ), 如式(12)所示。

$$P_{D,t} = P_{D1,t} + P_{D2,t} + P_{D3,t} \quad (12)$$

其中, 刚性负荷表示保障社会生产生活的重要负荷, 通常不可中断; 弹性负荷表示在极热或极寒天气下可通过需求侧响应来压缩的负荷; 可中断负荷表示供电不足时可完全关停的负荷, 包括部分工商业负荷<sup>[33]</sup>, 可根据供电紧缺的程度决定切除量, 缓解源荷失衡矛盾。

本文将弹性负荷定义为气候敏感性负荷, 主要为居民降温、采暖负荷。近年来, 随着经济社会发展、产业结构调整 and 人民生活水平提高, 气候敏感性负荷在电力总负荷中的占比越来越高, 多个省级电网夏季降温负荷占最高用电负荷的比例超过40%。以制冷空调、电采暖为例, 负荷与环境温度的关系可用式(13)估算<sup>[34]</sup>。

$$\begin{cases} P_{\text{DCo},t} = \frac{N_{\text{AC}}(\theta_{a,t} - \theta_c)}{\eta_c R_{\text{AC}}} \\ P_{\text{DHea},t} = \frac{N_{\text{AC}}(\theta_H - \theta_{a,t})}{\eta_H R_{\text{AC}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{DCo},t}$ 、 $P_{\text{DHea},t}$  分别为不同温度下制冷空调及电采暖在  $t$  时刻的功率;  $N_{\text{AC}}$  为用户数量;  $\theta_c$ 、 $\theta_H$  分别为空调集群制冷、制热的平均设定温度;  $R_{\text{AC}}$  为空调集群所在房屋的平均热阻, 由房屋面积、房屋在建筑物中位置, 以及建筑物外立面材质决定;  $\eta_c$ 、 $\eta_H$  分别为制冷、制热的平均热效率。

极热天气下可采取有序用电, 将用户空调温度调高, 以减少空调负荷。例如, 针对美国2个州激励型需求侧响应的大样本问卷调查显示, 用户对于需求侧响应计划的参与度随月度补偿额的增加而增加。其中, 每月10美元的补偿计划包含了一系列负荷调控合约, 包括在极热天气(最高气温  $> 38^\circ\text{C}$ )时将空调温度调高  $3^\circ\text{C}$ 。根据调查结果, 约40%的用户愿意加入此计划<sup>[34]</sup>。事实上, 极端天气下的有序用电不同于一般运行场景, 在中国, 通过政策引导可以进一步提高空调、电采暖负荷的调节深度<sup>[35]</sup>。根据式(13), 温控负荷的削减量可用式(14)估计。

$$\Delta P_{D2,t} = \frac{N_{\text{AC}} |\Delta \theta_{\text{AC}}|}{\eta R_{\text{AC}}} \quad (14)$$

式中:  $\Delta P_{D2,t}$  为温控负荷在  $t$  时刻的削减量;  $\eta$  为平均热效率, 可为  $\eta_c$  或  $\eta_H$ ;  $\Delta \theta_{\text{AC}}$  为环境温度与负荷温度之差。

当  $\Delta\theta_{AC}$  取上限  $\Delta\bar{\theta}_{AC}$  时,负荷削减量上限为  $\Delta\bar{P}_{D2,t0}$ 。

### 3 气候驱动的典型供需场景生成方法

同一地区的风速、辐照度、气温等气候要素呈现明显的时序规律。通过海量气候数据的特征提取与聚类,生成风、光、温度多维耦合的天气场景集,及其影响下的典型供需场景集,是评估面向气候变化的电力系统弹性、优化电源选址定容等工作的基础。本文采用 DVAE 算法,基于历史数据直接生成风、光、温度多维耦合场景集,省去了分别生成风、光、温度场景后匹配与削减复杂场景的环节,有效提高了场景集生成效率<sup>[36]</sup>。该方法具备增强数据鲁棒性与泛化能力、捕捉复杂耦合特性、避免模式崩溃等显著优势。与生成对抗网络 (generative adversarial network, GAN) 算法相比,DAVE 算法通过其去噪和变分推断机制,能够更稳定地生成与原始数据时序特征高度一致的多维耦合天气场景集。

#### 3.1 受气候影响的典型供需场景聚类

为体现特定气象条件下多源-荷场景内部统计规律,首先,对耦合天气场景集进行聚类分析,提取典型极端场景均值参数;其次,采用模块化去噪变分自编码器 (modular denoising variational autoencoder, MDVAE) 进一步生成符合历史数据时序特征的极端天气场景。MDVAE 通过神经网络拟合历史数据集的概率分布,生成与原始数据具有相似概率分布的新场景。这不仅保留了历史数据的统计特征,还能通过去噪机制提高生成数据的鲁棒性,避免噪声对模型性能的干扰<sup>[36]</sup>。

考虑到风速、辐照度与温度之间的潜在耦合关系,采用  $K$  均值聚类算法对历史气象场景进行划分,并根据不同气象类型内日期对应的历史风速、辐照度、负荷建立 MDVAE 模型,生成耦合场景。在时间尺度上以日为单位作为聚类基本单元(样本),每个单元包含当日的气象数据,表示为  $M_{n,t}$ 。其中,  $n=1,2,\dots,N$ ,  $N$  为样本总天数,  $t$  表示日内 24 个时刻中的第  $t$  个时刻。在聚类过程中获得  $K$  种典型天气类型,记为  $1,2,\dots,k,\dots,K$ ,第  $k$  种典型天气场景中包含的原始场景数为  $N_k$ ,第  $k$  种典型场景出现的概率为  $g_k=N_k/N$ 。通过生成风、光、温度多维耦合场景集,并根据本文所构建的电源与负荷的气候敏感性模型,最终生成受气候影响的典型供需场景集。

#### 3.2 DVAE

变分自编码器 (variational autoencoder, VAE) 的核心内容是变分推断。若真实样本  $x$  与潜变量  $z(z \in \mathbf{R})$  存在特殊的映射关系,为提高模型泛化能

力,使生成场景具有随机性,令潜变量服从单位正态分布,防止潜变量服从的分布方差为 0;VAE 模型退化为自编码 (autoencoder, AE) 模型。采用 VAE 生成场景时,定义生成网络为  $p_\pi(x|z)$ ,识别网络为  $q_\phi(z|x)$ <sup>[36]</sup>,其中,  $\pi, \phi$  为网络参数。由于直接优化最大似然估计困难,利用变分推断对最大似然函数  $\log p_\phi(x)$  的证据下界进行优化,式 (15) 的具体推导见附录 B。

$$\log p_\phi(x) = E_{q_\phi(z|x)}(\log(p_\pi(x|z)) - D_{\text{KL}}(q_\phi(z|x) \parallel p_\pi(z))) \quad (15)$$

式中:  $D_{\text{KL}}(\cdot)$  为求 KL (Kullback-Leibler) 散度的函数;  $E_{q_\phi(z|x)}(\cdot)$  为在识别网络  $q_\phi(z|x)$  下的期望函数;  $p_\pi(z)$  为  $z$  的分布。

尽管 VAE 在简单场景生成方面取得了良好效果,但在具有复杂耦合关系的历史数据中挖掘其内在统计规律、获取样本后验分布方面仍有待提高。针对 VAE 的短板, DVAE 在潜变量中加入噪声,并提出了新的去噪变分下界。DVAE 采用基于识别网络的变分推断去噪准则,可使低维流形中近邻数据点对高维观测空间的噪声具有良好的鲁棒性,从而可构建具有良好泛化性能的场景生成模型<sup>[36]</sup>。令随机识别网络  $q_\phi(z|\tilde{x}) \sim N(z|\mu_{\phi(\tilde{x})}, \sigma_{\phi(\tilde{x})})$ ,其中,  $\tilde{x}$  为含噪声的数据,  $N(z|\mu_{\phi(\tilde{x})}, \sigma_{\phi(\tilde{x})})$  为正态分布函数,  $\mu_{\phi(\tilde{x})}, \sigma_{\phi(\tilde{x})}$  分别为正态分布的期望值和方差,则有:

$$E_{p(\tilde{x}|x)}(q_\phi(z|\tilde{x})) = \int_{\tilde{x}} q_\phi(z|\tilde{x}) p(\tilde{x}|x) d\tilde{x} \quad (16)$$

式中:  $p(\tilde{x}|x)$  为关于  $x$  的噪声分布;  $E_{p(\tilde{x}|x)}(\cdot)$  为基于  $p(\tilde{x}|x)$  分布的期望函数。

每次对  $\tilde{x} \sim p(\tilde{x}|x)$  采样并代入  $q_\phi(z|\tilde{x})$ , 得到不同的高斯分布。由于  $E_{p(\tilde{x}|x)}(q_\phi(z|\tilde{x}))$  需要引入噪声分布,使得下界估计变得困难。引入去噪变分下界前,应先在  $q_\phi(z|x)$  中加入随机层并对随机变量求积分,即:

$$q_\phi(z|x) = \int_{z'} q_\phi(z|z') q_\psi(z'|x) dz' \quad (17)$$

式中:  $z'$  为引入的随机变量;  $\phi = \{\varphi, \psi\}$ , 其中,  $\varphi, \psi$  为随机层网络参数。

令  $x$  和  $z$  的联合生成网络  $p_\pi(x, z) = p_\pi(x|z) p_\pi(z)$ ; 随机层识别网络  $\tilde{q}_\phi(z|x) = \int q_\phi(z|\tilde{x}) p(\tilde{x}|x) d\tilde{x}$ , 可得:

$$\log p_\pi(x) \geq E_{\tilde{q}_\phi(z|x)} \left( \log \frac{p_\pi(x, z)}{q_\phi(z|x)} \right) \quad (18)$$

式中:  $E_{\tilde{q}_\phi(z|x)}$  为在  $\tilde{q}_\phi(z|x)$  下的期望函数。

去噪变分下界  $L_{\text{dvae}}$  为:

$$L_{\text{dvae}} = E_{\tilde{q}_\phi(z|x)} \left( \log \frac{p_\pi(x, z)}{q_\phi(z|x)} \right) \quad (19)$$

最大化下界为:

$$\log p_\pi(x) \geq L_{\text{dvae}} + E_{\rho(z|x)} (D_{\text{KL}}(\tilde{q}_\phi(z|x) \| \rho(z|x))) \quad (20)$$

式中:  $\rho(z|x)$  为后验分布。

DVAE 与 VAE 结构类似, 但编码器并非直接输出一个潜变量, 而是输出多维正态分布, 再对该分布进行采样, 得到潜变量  $z$ 。其中, 对多维正态分布采样过程, 通过蒙特卡洛抽样近似为:

$$L_{\text{dvae}} = E_{\rho(z|x)} \left( E_{q(z|\tilde{x})} \left( \log \frac{p_\pi(x, z)}{q_\phi(z|\tilde{x})} \right) \right) \approx \frac{1}{\Phi \Psi} \sum_{\beta=1}^{\Phi} \sum_{\alpha=1}^{\Psi} \log \frac{p_\pi(x, z^{(\alpha|\beta)})}{q_\phi(z^{(\alpha|\beta)}|\tilde{x}^{(\beta)})} \quad (21)$$

式中:  $\tilde{x}^{(\beta)} \sim \rho(\tilde{x}|x)$ , 为引入的噪声变量样本;  $z^{(\alpha|\beta)} \sim q_\phi(z|\tilde{x}^{(\beta)})$ , 为引入的潜变量样本;  $q(z|\tilde{x})$  为随机后验分布;  $\Phi$  为噪声变量样本总数;  $\Psi$  为潜变量样本总数。

DVAE 在神经网络训练过程与损失函数的计算与 VAE 类似:

$$\log p_\pi(x) = E_{\tilde{q}_\phi(z|x)} \left( \log \frac{p_\pi(x, z)}{\tilde{q}_\phi(z|x)} \right) \triangleq L_{\text{cvae}} \quad (22)$$

式中:  $L_{\text{cvae}}$  为最大化下界。

相较于其他场景生成算法, DVAE 能够满足复杂场景的生成要求, 通过引入去噪变分下界, 提高了所构建变分分布的灵活性, 更适用于生成具有复杂耦合特性的风、光、温度多维场景集<sup>[37]</sup>。

#### 4 计及应急保供的电源扩展规划

根据 1.2 节与第 2 章的分析, 持续性极热或寒潮天气压缩了区域电力系统的运行可行域。新能源占比越高, 极端天气对源荷平衡的影响越大。因此, 在制定需求侧响应计划的基础上, 合理布局各类电源与电化学储能, 并根据区域的风光资源禀赋布局新能源场站以扩展优化调度的可行域, 是降低极端天气停电损失的重要途径<sup>[38-39]</sup>。

本文以火电装机容量、风光电源装机容量、储能配置容量为决策变量, 构建两阶段随机规划模型, 如图 2 所示。第 1 阶段为规划阶段, 在考虑机组容量补偿机制的前提下, 以代表性场景下电源的净建设成本与灾害下综合成本期望值最小为目标函数, 决策各类电源装机容量配置, 并将规划电源的选址定

容参数传递至第 2 阶段; 第 2 阶段为运行调度阶段, 以给定的随机场景下综合运行成本最小为目标函数, 决策传统电源出力、切负荷量以及储能容量<sup>[40]</sup>。此外, 本文所提电源扩展规划方法适用于更多类型电源联合规划的场景。

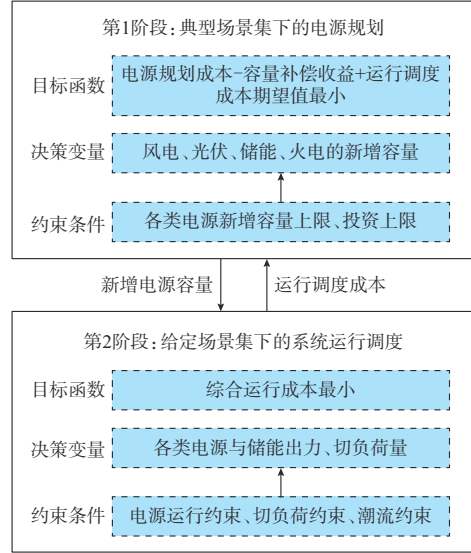


图 2 两阶段随机规划模型

Fig. 2 Two-stage stochastic programming model

##### 4.1 第 1 阶段模型

第 1 阶段的目标函数定义为规划成本、运行调度成本期望值之和与电源容量补偿收益之差最小, 如式 (23) 所示。

$$\min \left[ \frac{\gamma(1+\gamma)^{N_Y}}{(1+\gamma)^{N_Y} - 1} F_1 + N_Y \sum_{s \in S} \lambda_s (F_{2,s} + F_{3,s}) - O_{\text{rev}} \right] \quad (23)$$

$$F_1 = C_{W, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_w} P_{W, \text{in}, i} + C_{PV, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_{pv}} P_{PV, \text{in}, i} + C_{G, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_g} P_{G, \text{in}, i} + C_{ES, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_{es}} P_{ES, \text{in}, i} \quad (24)$$

$$F_{2,s} = \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{t=1}^T (C_{D2} \Delta P_{D2, s, i, t} + C_{D3} \Delta P_{D3, s, i, t}) \Delta t \quad (25)$$

$$F_{3,s} = \sum_{i \in \Omega_g} \sum_{t=1}^T (a_2 P_{G, s, i, t}^2 + a_1 P_{G, s, i, t} + a_0) \Delta t \quad (26)$$

$$O_{\text{rev}} = N_Y \left( o_{W, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_w} P_{W, \text{in}, i} + o_{PV, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_{pv}} P_{PV, \text{in}, i} + o_{G, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_g} P_{G, \text{in}, i} + o_{ES, \text{in}} \sum_{i \in \Omega_{es}} P_{ES, \text{in}, i} \right) \quad (27)$$

式中:  $F_1$  为各类电源规划投资总费用, 包括火电厂、风电场、光伏电站与储能电站的投资总费用;  $F_{2,s}$  为场景  $s$  中切负荷的综合经济损失;  $F_{3,s}$  为场景  $s$  中火电厂运行成本;  $\gamma$  为投资贴现率;  $N_Y$  为电源的使用年

限;  $\lambda_s$  为场景  $s$  的发生概率;  $O_{\text{rev}}$  为投资各类电源在指定周期内的容量补偿收益;  $\Omega_D$  为负荷的候选布局节点集合;  $\Omega_G$ 、 $\Omega_W$ 、 $\Omega_{\text{PV}}$ 、 $\Omega_{\text{ES}}$  分别为火电厂、风电场、光伏电站、储能电站的候选布局节点集合;  $C_{G,\text{in}}$ 、 $C_{W,\text{in}}$ 、 $C_{\text{PV},\text{in}}$ 、 $C_{\text{ES},\text{in}}$  分别为火电厂、风电场、光伏电站、储能电站的单位容量装机成本;  $P_{G,\text{in},i}$ 、 $P_{W,\text{in},i}$ 、 $P_{\text{PV},\text{in},i}$ 、 $P_{\text{ES},\text{in},i}$  分别为火电厂、风电场、光伏电站与储能在电网节点  $i$  的规划新增装机容量;  $C_{\text{D}2}$ 、 $C_{\text{D}3}$  分别为切除单位弹性负荷、可中断负荷的损失系数;  $P_{G,s,i,t}$  为场景  $s$  中节点  $i$  的火电厂在  $t$  时刻的出力;  $\Delta P_{\text{D}2,s,i,t}$ 、 $\Delta P_{\text{D}3,s,i,t}$  分别为场景  $s$  中节点  $i$  处弹性负荷、可中断负荷在  $t$  时刻的削减量;  $o_{G,\text{in}}$ 、 $o_{W,\text{in}}$ 、 $o_{\text{PV},\text{in}}$ 、 $o_{\text{ES},\text{in}}$  分别为单位容量火电厂、风电场、光伏电站与储能电站在单位时间(通常为年度)内的补偿收益;  $a_2$ 、 $a_1$ 、 $a_0$  为火电机燃料发电成本系数;  $\Delta t$  为时间步长。

第1阶段的约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega_G} P_{G,\text{in},i} \leq \bar{P}_{G,\text{in}} \\ \sum_{i \in \Omega_W} P_{W,\text{in},i} \leq \bar{P}_{W,\text{in}} \\ \sum_{i \in \Omega_{\text{PV}}} P_{\text{PV},\text{in},i} \leq \bar{P}_{\text{PV},\text{in}} \\ \sum_{i \in \Omega_{\text{ES}}} P_{\text{ES},\text{in},i} \leq \bar{P}_{\text{ES},\text{in}} \end{cases} \quad (28)$$

$$\bar{E}_{\text{in},i} = \tau_E \bar{P}_{\text{ES},\text{n},i} \quad (29)$$

式中:  $\bar{P}_{G,\text{in}}$ 、 $\bar{P}_{W,\text{in}}$ 、 $\bar{P}_{\text{PV},\text{in}}$ 、 $\bar{P}_{\text{ES},\text{in}}$  分别为火电厂、风电场、光伏电站与储能电站的规划装机容量上限;  $\bar{E}_{\text{in},i}$  为节点  $i$  处储能电站的额定能量;  $\bar{P}_{\text{ES},\text{n},i}$  为节点  $i$  处储能电站的额定功率;  $\tau_E$  为储能以额定功率放电的时间, 本文取  $\tau_E = 3 \text{ h}$ 。

式(28)表示各类电源规划容量的上限, 通常由能源主管部门根据当地风光资源禀赋与经济发展状况来指定; 式(29)表示储能的额定能量( $\bar{E}_{\text{in},i}$ )与额定功率( $\bar{P}_{\text{ES},\text{n},i}$ )的关系。

## 4.2 第2阶段模型

第2阶段以综合运行成本最小及综合灵活性不足率最小为目标函数, 考虑潮流约束与各类电源、负荷运行约束, 建立综合经济性与灵活性的调度模型。目标函数如式(30)所示。

$$\min F_2 = F_{2,s} + F_{3,s} \quad (30)$$

式中:  $F_2$  为电力系统综合运行成本。

其中,  $F_{2,s}$  与  $F_{3,s}$  的表达式分别如式(25)、式(26)所示。第2阶段的约束条件可分为潮流约束、电源出力与切负荷约束两大部分。

### 4.2.1 潮流约束

本文采用直流潮流模型, 约束条件为式(31)—

式(34)。

$$P_{i,t} = P_{G,s,i,t} + P_{H,s,i,t} + P_{W,s,i,t} + P_{\text{PV},s,i,t} - k_{X,\text{in},i} (P_{\text{D},s,i,t} + P_{\text{ES},s,i,t}) \quad (31)$$

$$k_{X,\text{in},i} = \frac{\bar{P}_{X,i} + P_{X,\text{in},i}}{\bar{P}_{X,i}} \quad (32)$$

$$P_{i,t} = \sum_{j=1}^{N_b} B_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (33)$$

$$-\bar{P}_{ij}(\theta_{a,t}) \leq B_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \leq \bar{P}_{ij}(\theta_{a,t}) \quad (34)$$

式中:  $P_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻向系统注入的功率;  $P_{G,s,i,t}$  为场景  $s$  中节点  $i$  处火电厂在  $t$  时刻的出力;  $P_{W,s,i,t}$ 、 $P_{\text{PV},s,i,t}$ 、 $P_{H,s,i,t}$  分别为场景  $s$  中节点  $i$  处风电场、光伏电站、水电站在  $t$  时刻的出力, 分别根据式(5)、式(6)、式(7)求取;  $P_{\text{ES},s,i,t}$  为场景  $s$  中节点  $i$  处储能电站在  $t$  时刻的功率;  $P_{\text{D},s,i,t}$  为场景  $s$  中节点  $i$  在  $t$  时刻的负荷;  $B_{ij}$  为线路  $(i,j)$  的导纳;  $\delta_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的相角;  $\delta_{j,t}$  为节点  $j$  在  $t$  时刻的相角;  $k_{X,\text{in},i}$  为节点  $i$  新增第  $X$  种电源之后总容量相对于原有电源的扩容比例;  $\bar{P}_{X,i}$  为节点  $i$  接入第  $X$  种电源的功率上限, 下角标  $X$  均可替换为  $G$ 、 $W$ 、 $\text{PV}$ 、 $\text{ES}$ ;  $P_{X,\text{in},i}$  为节点  $i$  接入第  $X$  种电源的规划新增装机容量。

本文考虑火电厂、风电场、光伏电站、水电站4种典型的电源场站与大型储能电站。式(31)为节点净注入功率, 其等于各类电源出力与负荷、储能充电功率之差; 式(33)为直流潮流约束; 式(34)为计及温度影响的线路容量约束。

### 4.2.2 电源出力与切负荷约束

考虑第1阶段决策的新增电源与电网既有电源, 给出系统的源荷运行约束式(35)—式(45)。

$$k_{X,\text{in},i} P_{G,i} \leq P_{G,s,i,t} \leq k_{X,\text{in},i} \bar{P}_{G,i} \quad i \in \Omega_G \quad (35)$$

$$\begin{cases} P_{G,s,i,t+1} - P_{G,s,i,t} \leq k_{X,\text{in},i} \zeta_{\text{RGU},i} & i \in \Omega_G \\ P_{G,s,i,t} - P_{G,s,i,t+1} \leq k_{X,\text{in},i} \zeta_{\text{RGD},i} & i \in \Omega_G \end{cases} \quad (36)$$

$$0 \leq P_{H,s,i,t} \leq \bar{P}_{H,i,t} \quad i \in \Omega_H \quad (37)$$

$$\begin{cases} P_{H,s,i,t+1} - P_{H,s,i,t} \leq \zeta_{\text{RHU},i} & i \in \Omega_H \\ P_{H,s,i,t} - P_{H,s,i,t+1} \leq \zeta_{\text{RHD},i} & i \in \Omega_H \end{cases} \quad (38)$$

$$\sum_t P_{H,s,i,t} \Delta t \leq \bar{W}_{\text{th},i} \quad (39)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{Ec},s,i,t} \leq k_{X,\text{in},i} \bar{P}_{\text{ES},\text{in}} & i \in \Omega_{\text{ES}} \\ 0 \leq P_{\text{Ed},s,i,t} \leq k_{X,\text{in},i} \bar{P}_{\text{ES},\text{in}} & i \in \Omega_{\text{ES}} \end{cases} \quad (40)$$

$$E_{i,s,t} = E_{i,s,t-1} + \sum_t (P_{\text{Ec},s,i,t} \Delta t + P_{\text{Ed},s,i,t} \Delta t) \quad (41)$$

$$\underline{E}_i \leq E_{i,s,t} \leq \bar{E}_i \quad (42)$$

$$\Delta P_{\text{D}2,s,i,t} \leq \Delta \bar{P}_{\text{D}2,i,t} \quad (43)$$

$$\Delta P_{\text{D}3,s,i,t} \leq \Delta \bar{P}_{\text{D}3,i,t} \quad (44)$$

$$P_{\text{D},s,i,t} = P_{\text{D}0,s,i,t} - \Delta P_{\text{D}2,s,i,t} - \Delta P_{\text{D}3,s,i,t} \quad (45)$$

式中： $\zeta_{\text{RGU},i}$ 、 $\zeta_{\text{RGD},i}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处现有火电机组的上爬坡速率、下爬坡速率； $\zeta_{\text{RHU},i}$ 、 $\zeta_{\text{RHD},i}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处水电机组的上爬坡速率、下爬坡速率； $\bar{P}_{G,i}$ 、 $\underline{P}_{G,i}$  分别为节点  $i$  处火电厂出力上限、下限； $\bar{W}_{\text{ib},i}$  为节点  $i$  处水电站水库每日最大发电量约束，与水库的水位要求相关； $\bar{P}_{\text{H},i,t}$  为节点  $i$  处水电站在  $t$  时刻的出力上限； $\Omega_{\text{H}}$  为水电站的候选布局节点集合； $P_{\text{Ec},s,i,t}$ 、 $P_{\text{Ed},s,i,t}$  分别为场景  $s$  中节点  $i$  处储能电站在  $t$  时刻的充电、放电功率； $E_{i,s,t}$ 、 $E_{i,s,t-1}$  分别为场景  $s$  中节点  $i$  处储能电站在  $t$  时刻、 $t-1$  时刻的能量； $\bar{E}_i$ 、 $\underline{E}_i$  分别为节点  $i$  处储能电站能量上限、下限； $\Delta\bar{P}_{\text{D2},i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  处温控负荷削减量上限； $\Delta\bar{P}_{\text{D3},i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  处可中断负荷切除量上限； $P_{\text{D0},s,i,t}$  为场景  $s$  中节点  $i$  处变电站在  $t$  时刻的初始负荷。

式(35)、式(36)分别表示火电厂的出力上下限约束与爬坡约束；式(37)表示水电站的出力约束，与火电厂不同的是，水电站的出力上限为时变量，由式(7)计算得出；式(38)表示水电站的爬坡约束；式(39)表示水电站每日累计出力约束，取决于水库容量保持约束；式(40)表示储能电站的充放电约束、能量变化约束与能量上下限约束；式(41)、式(42)表示储能电站电量变化约束；式(43)、式(44)表示切负荷约束；式(45)表示在极端天气导致发电功率缺额条件下，合理调节可压缩负荷可以降低功率缺额，进而减小停电的综合社会影响。根据第2章的讨论，本文将温控负荷视为弹性负荷，计算公式如式(14)所示。

### 4.3 弹性评估指标

电力系统弹性可以用典型极端事件对用户造成的时域累计损失来表征。根据一个地区近年来的极端天气数据生成代表性极端场景集，是弹性评估的前提；在给定用户类型、应急资源与调度策略下计算极端事件造成的综合损失，是弹性评价的核心<sup>[41-42]</sup>。本文采用电量不足期望(loss of energy expectation, LOEE)与停电时间期望(loss of load expectation, LOLE)表征区域电力系统面向气候变化的弹性。LOEE(用  $I_{\text{LOEE}}$  表示)定义为每个由系统供电的用户在单位时间内的平均电量缺额，如式(46)所示。

$$I_{\text{LOEE}} = \sum_{i \in \Omega_{\text{b}}} \sum_{t=1}^T (C_{\text{D2}} \Delta P_{\text{D2},i,t} + C_{\text{D3}} \Delta P_{\text{D3},i,t}) \Delta t \quad (46)$$

LOLE(用  $I_{\text{LOLE}}$  表示)定义为每个由系统供电的用户在单位时间内的平均停电时间，如式(47)所示。

$$I_{\text{LOLE}} = \sum_{t=1}^T \Delta t \quad (47)$$

## 5 算例分析

本章对所提出的场景生成方法与多类型电源规划方法进行算例分析。计算设备为一台配备英特尔酷睿 i7 处理器(2.80 GHz)和 16 GB 内存的计算机，代码通过基于 MATLAB 的 IBM ILOG Gurobi Optimizer version 10.0.0 实现。整个优化调度模型为混合整数规划问题，可以直接由 Gurobi 求解器求解。

本文采用 IEEE 39 节点系统标准算例。该系统包含 6 座火电厂，装机容量占比为 49.7%；1 个水电站，装机容量占比为 15.0%；3 个风电场，装机容量占比为 21.1%；此外，还有 2 个光伏电站与分布式光伏集中区域，装机容量占比为 14.2%。IEEE 39 节点系统结构图及系统基本参数见附录 C。此外，每个风电场或光伏电站分别配有 1 个储能电站。按实际应用中电源的规划选址，综合考虑可用土地、地理环境、新能源禀赋等多种因素，算例中设置了 2 个火电厂候选节点、2 个风电场候选节点、2 个光伏电站和 4 个储能电站候选节点。在气候场景方面，采用中国东南某省的风速、光照强度、温度数据与相对应的气温数据生成典型气候场景集。

本文将温控负荷视为弹性负荷，假设在持续性极端高温天气下，用户的空调温度设定值最多可调高 3℃；在寒潮天气下，用户的电采暖温度设定值最多可降低 3℃。因此，实时可切除负荷可用式(14)来估算。在当前的装机容量基础上，给定不同机组的投资上限，验证所提的多类型电源扩展规划方法，并进行系统弹性指标的评估。

### 5.1 典型场景的聚类与生成

本文选取中国南方某省 2019 至 2021 年 3 年间高温与寒潮天气下的风速、辐照度、温度以及负荷数据。其中，风速、辐照度数据取自 3 个风电场和 1 个光伏电站；负荷数据取自各个 220 kV 变电站；温度数据以城市为统计颗粒度，覆盖了以上风电场、光伏电站。通过场景的筛选、聚类，生成极端天气典型的时空场景均值。在此基础上，利用第 3 章所提 DVAE 算法进行聚类，生成 2 类高温场景与 2 类寒潮场景，共计 4 类场景，每一类极端天气场景持续时间为 5 d。从 4 类天气场景中各自选取 1 个典型日，该日的 3 类天气参数、水电站出力以及负荷曲线，如图 3 所示。此外，如图 4 所示，基于相同的历史数据集，用 GAN 算法预测了测试集中某一日的温度、风速、辐照度参数。可见，DVAE 算法能够更好地反映历史数据的时序耦合关系，更准确地提取典型天气场景。



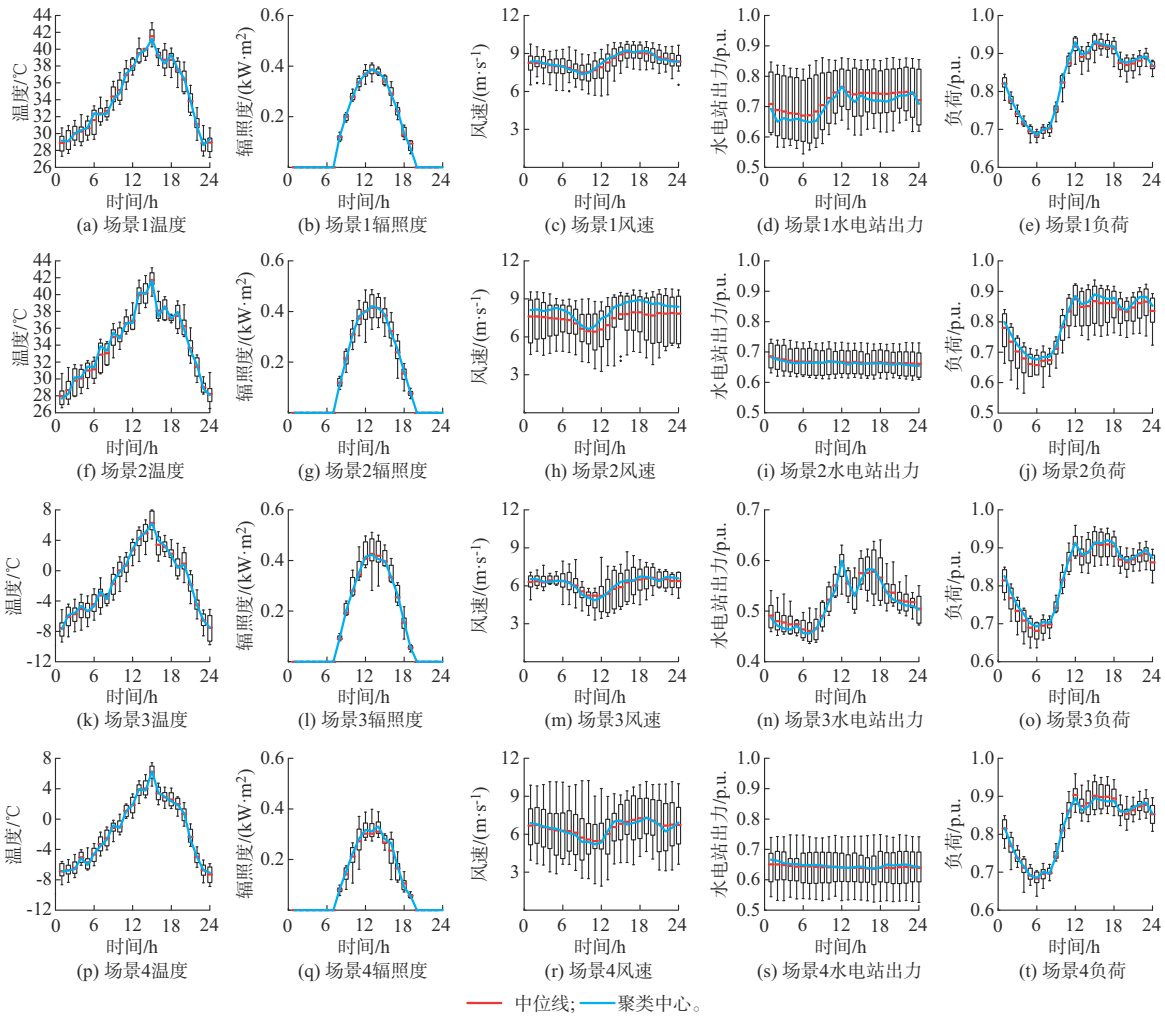


图3 极端天气场景数据分布与聚类中心  
Fig. 3 Data distribution and cluster center in extreme weather scenarios

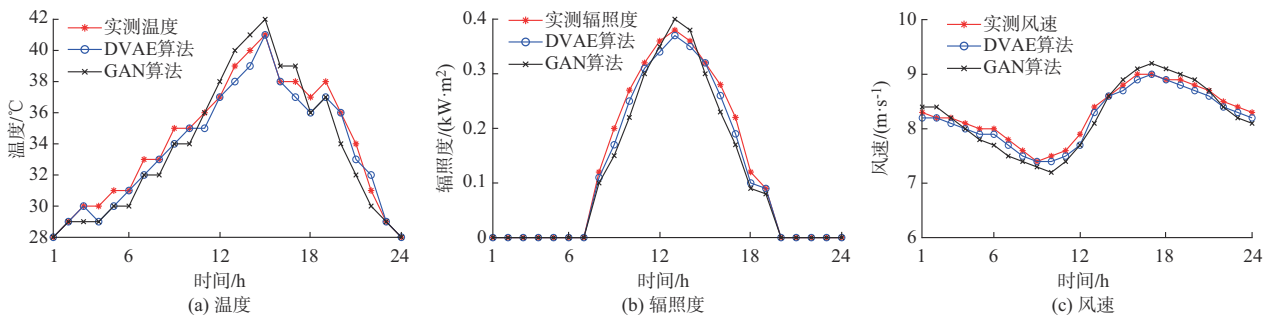


图4 场景生成方法结果对比  
Fig. 4 Comparison of results of scenario generation methods

在图3中,场景1、2为持续性高温天气场景,在该高温场景中,每天有10 h气温超过35℃,最高气温超过40℃,风电厂出力处于较低水平,大部分时间仅能达到额定容量的30%~40%。由于持续性高温少雨,水电站出力偏低,处于额定容量的60%~70%水平。与此同时,日最大负荷达到年最大负荷的90%以上。场景3、4为持续性寒潮天气场

景,全天有约2/3的时间气温低于0℃,造成电采暖地区的用电负荷激增,日最大负荷接近于高温场景下的最大负荷。同时,部分风机由于结冰而停运,水库在冬季枯水期水量较小,造成水电站出力不足。总体而言,在持续性高温与寒潮天气下,一方面新能源场站出力未能达到较高水平,另一方面负荷需求处于高位,源荷失衡矛盾较为突出。

由于未来极端天气发生频率与强度的预测较为复杂,本文假设未来极端天气强度不变,即所生成的极端场景集适用于整个电源规划周期(本文取 $N_Y=30$ 年)。

### 5.2 电源规划结果

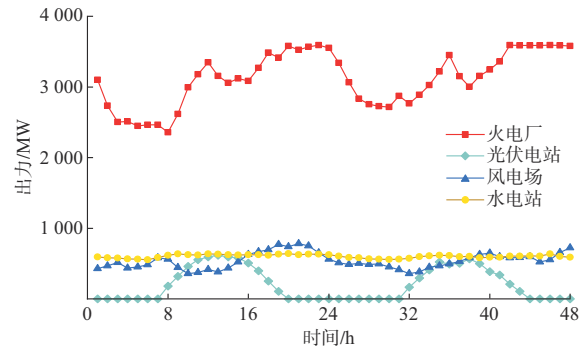
根据5.1节生成的极端天气场景集与第4章所提的两阶段随机规划模型,在给定费用与候选节点约束下,求解最小净成本目标下的多类型电源位置与容量,解决各场景中可能发生的供需失衡风险。各类电源的规划结果如表1所示。新建电站包括在节点3、19处新建2座大型火电厂、在节点1、2处新建大型风电基地、在节点21、22处新建大型光伏电站。通过适度增加火电厂建设力度、在风光资源禀赋较高的地区提升新能源发电容量的冗余度这2种途径来提升电力系统在持续性极端天气下的保供能力。

表1 电源最优规划结果  
Table 1 Optimal planning result of power sources

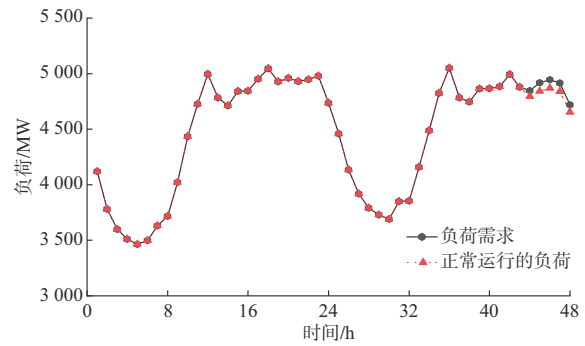
| 电源类型 | 总规划装机容量/(MV·A) | 电源选址定容结果      |        | 总投资/亿元 |
|------|----------------|---------------|--------|--------|
|      |                | 规划装机容量/(MV·A) | 选址节点编号 |        |
| 火电   | 600            | 321.2         | 3      | 30     |
|      |                | 278.8         | 19     |        |
| 风电   | 400            | 306.0         | 1      | 96     |
|      |                | 94.0          | 2      |        |
| 光伏   | 300            | 183.0         | 21     | 84     |
|      |                | 117.0         | 22     |        |
| 储能   | 100            | 50.0          | 21     | 16     |
|      |                | 50.0          | 22     |        |
| 合计   | 1800           |               |        | 226    |

第2阶段为系统在给定场景下的最优调度策略,包括火电厂经济调度出力、水电站调度出力、风电场与光伏电站出力。同时,考虑用户温控负荷与部分可中断负荷的调控可行域,实现极端天气场景下切负荷量的优化决策。以持续性高温天气场景1为例,其48 h电源出力仿真结果如图5(a)所示,全网切负荷情况如图5(b)所示。从图中可以看出,在极热天气下,一方面风电场出力降低,另一方面水库水位逐日下降,造成水电站出力下降。因此,新增的电源在持续性极端事件下起到了应急保电的重要作用。

在极端天气场景下电网弹性评估指标 LOEE 与 LOLE 计算结果如表2所示。由表2可见,通过规划多种类型的电源,同样极端天气场景下的 LOEE 与 LOLE 显著降低。与不新增电源的情况相比,新建电源大大降低了负荷损失。此外,新规划的火电厂不仅具备紧急供电的功能,而且具备小扰动条件下频率调节与平抑新能源波动的能力。



(a) 电源累计出力曲线



(b) 负荷累计需求曲线

图5 典型日优化调度结果  
Fig. 5 Optimal dispatch results of typical days

表2 各场景的弹性指标  
Table 2 Resilience indices of each scenario

| 极端场景 | LOEE/[(MW·h)/d] |       | LOEE/(h/d) |      |
|------|-----------------|-------|------------|------|
|      | 规划前             | 规划后   | 规划前        | 规划后  |
| 场景1  | 4 306           | 182.6 | 4.8        | 0.37 |
| 场景2  | 3 537           | 156.7 | 3.7        | 0.32 |
| 场景3  | 2 850           | 125.3 | 3.1        | 0.28 |
| 场景4  | 3 079           | 139.0 | 3.2        | 0.30 |

## 6 结语

针对近年来日渐频繁的持续性极端天气,本文首先阐明了面向气候变化的电力系统弹性评价与提升的整体研究思路;其次,总结了各类典型极端天气对电力系统风电、光伏、水电出力,以及温控负荷需求影响的评价模型,为弹性评估与提升奠定了基础;然后,针对特定地区的气候特征,提出了典型场景生成方法与提升气候变化下系统弹性的多类型电源规划两阶段随机规划模型;最后,通过算例仿真,验证了所提规划方法的有效性。

算例仿真结果显示,针对性的电源优化规划有效缓解了极端天气下的切负荷损失。在气候持续变化的新型电力系统建设进程中,科学合理的电源规划将是提升系统弹性、保障极端天气下供需安全的重要手段。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] WANG C, JU P, WU F, et al. A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112567.
- [2] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
QIN Dahe. National assessment report on risk management and adaptation of extreme weather and climate events and disasters in China[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] 江文, 李慧. 2021年美国极端寒潮期间水力发电发挥重要作用[J]. *水利水电快报*, 2021, 42(4): 1.  
JIANG Wen, LI Hui. Hydropower played an important role during the 2021 extreme cold wave in the United States [J]. *Water Resources and Hydropower Express*, 2021, 42(4): 1.
- [4] 余潇潇, 宋福龙, 李隼, 等. 含高比例新能源电力系统极端天气条件下供电安全性的提升[J]. *现代电力*, 2023, 40(3): 303-313.  
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, LI Juan, et al. Improvement of power supply safety in high ratio new energy power systems under extreme weather conditions [J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(3): 303-313.
- [5] 张瀚舟, 张铭, 寇书萌, 等. 寒潮考验下得州和上海不同表现的启示[J]. *上海节能*, 2021(4): 337-341.  
ZHANG Hanzhou, ZHANG Ming, KOU Shumeng, et al. Inspiration from different performances of state of Texas and Shanghai under cold wave test [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2021(4): 337-341.
- [6] 聂新伟. 警惕极端天气成为电力“灰犀牛”[J]. *能源*, 2023(6): 30-33.  
NIE Xinwei. Beware of extreme weather as power “grey rhino” [J]. *Energy*, 2023(6): 30-33.
- [7] 杨晓冉. 新型电力系统如何跨天气关[N]. *中国能源报*, 2023-06-19(8).  
YANG Xiaoran. How does the new power system pass the weather [N]. *China Energy News*, 2023-06-19(8).
- [8] 张献方. 推动能源转型, 赋能绿色发展[N]. *国家电网报*, 2024-01-09(1).  
ZHANG Xianfang. Promote energy transformation and empower green development [N]. *State Grid News*, 2024-01-09(1).
- [9] 辛保安. 新型电力系统构建方法论研究[N]. *中国电力报*, 2023-07-11(1).  
XIN Baoan. Research on methodology of new power system construction [N]. *China Electric Power News*, 2023-07-11(1).
- [10] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2819-2830.  
RUAN Qiantu, MEI Shengwei, HUANG Dexin, et al. Challenges and research prospects of resilience enhancement of low-carbon power grid [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2022, 42(8): 2819-2830.
- [11] 代佳琨, 向月, 刘俊勇, 等. 基于数字孪生的区域气象关联风电预测模型[J]. *四川电力技术*, 2023, 46(2): 32-38.  
DAI Jiakun, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Regional meteorology correlated wind power prediction based on digital twin [J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2023, 46(2): 32-38.
- [12] 李豪, 马刚, 李天宇, 等. 基于时空相关性的短期光伏出力预测混合模型[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 6(5): 121-129.  
LI Hao, MA Gang, LI Tianyu, et al. Hybrid model for short-term photovoltaic output prediction based on spatiotemporal correlation [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 6(5): 121-129.
- [13] 董家富, 薛一波. 气象因子与电力负荷的时空关联特性研究[J]. *电力信息与通信技术*, 2022, 20(6): 11-23.  
DONG Jiafu, XUE Yibo. Research of spatio-temporal correlation characteristics between meteorological factors and power load [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2022, 20(6): 11-23.
- [14] 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.
- [15] SHUAI H, LI F X, ZHU J X, et al. Modeling the impact of extreme summer drought on conventional and renewable generation capacity: methods and a case study on the Eastern U.S. power system [J]. *Applied Energy*, 2024, 363: 122977.
- [16] MONTOYA-RINCON J P, MEJIA-MANRIQUE S A, AZAD S, et al. A socio-technical approach for the assessment of critical infrastructure system vulnerability in extreme weather events [J]. *Nature Energy*, 2023, 8: 1002-1012.
- [17] 陈碧云, 李翠珍, 覃鸿, 等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 47-52.  
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 47-52.
- [18] BAJPAI P, CHANDA S, SRIVASTAVA A K. A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and Choquet integral [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 2918-2929.
- [19] DEGHANIAN P, ASLAN S, DEGHANIAN P. Maintaining electric system safety through an enhanced network resilience [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 4927-4937.
- [20] 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院. 一种高分辨度电网弹性评估方法: CN112613676A [P]. 2021-04-06.  
Economic and Technical Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited. A high-resolution resilience assessment method for power grids: CN112613676A [P]. 2021-04-06.
- [21] 杨火明, 徐潇源, 严正. 考虑配电网韧性的储能系统选址定容优化方法[J]. *电力建设*, 2018, 39(1): 30-39.  
YANG Huoming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. Optimization approach of energy storage system locating and sizing considering distribution system resilience [J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(1): 30-39.
- [22] 王守相, 黄仁山, 潘志新, 等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复

- 力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 123-132.
- WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.
- [23] 林水静. 专家为能源电力系统与天气气候系统深度融合支招[N]. 中国能源报, 2024-04-29(9).
- LIN Shuijing. Experts provide suggestions for the deep integration of energy and power systems with weather and climate systems[N]. China Energy News, 2024-04-29(9).
- [24] 闵寿, 张万琨. 水库水面蒸发量计算方法的研究[J]. 水力发电, 2003, 29(5): 35-40.
- MIN Qian, ZHANG Wankun. Study on the calculation method of reservoir surface evaporation[J]. Water Power, 2003, 29(5): 35-40.
- [25] AL-KHAYAT M, AL-RASHEEDI M. A new method for estimating the annual energy production of wind turbines in hot environments [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 195: 114343.
- [26] 廖添泉. 提高输电线路输送容量研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.
- LIAO Tianquan. Study on improving transmission capacity of transmission lines[D]. Chengdu: Xihua University, 2009.
- [27] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 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[J/OL]. 电网技术[2024-05-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2268>.
- GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Review of extreme scenario research and response in new power systems from the perspective of power and electricity balance [J/OL]. Power System Technology [2024-05-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2268>.
- [28] 许胜贤. 基于大模型大数据的高寒地区电网线路覆冰预警系统设计[J]. 产业创新研究, 2024(6): 97-99.
- XU Shengxian. Design of ice warning system for power grid lines in high cold regions based on big model and big data[J]. Industrial Innovation Research, 2024(6): 97-99.
- [29] 陈舒平, 林丽平. 国网福建电力综合施策提升电网防汛能力[N]. 国家电网报, 2022-06-15(1).
- CHEN Shuping, LIN Liping. Comprehensive measures taken by State Grid Fujian Electric Power Company Limited to enhance the flood prevention capacity of the power grid [N]. State Grid News, 2022-06-15(1).
- [30] AMROLLAHI M H, BATHAEE S M T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response[J]. Applied Energy, 2017, 202: 66-77.
- [31] 袁林山, 张家余, 张力, 等. 气候变化对水电站发电出力的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 231-235.
- YUAN Linshan, ZHANG Jiayu, ZHANG Li, et al. Research on the impacts of climate change on the power generation of hydropower station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 231-235.
- [32] 王玉涛, 林涛涛. 三峡水库水面蒸发量估算[J]. 水利水电快报, 2022, 43(12): 27-30.
- WANG Yutao, LIN Taotao. Estimation of evaporation from water surface of Three Gorges Reservoir [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(12): 27-30.
- [33] WANG Z H, LU B, WANG B, et al. Incentive based emergency demand response effectively reduces peak load during heatwave without harm to vulnerable groups[J]. Nature Communications, 2023, 14: 6202.
- [34] SHI Q X, CHEN C F, MAMMOLI A, et al. Estimating the profile of incentive-based demand response (IBDR) by integrating technical models and social-behavioral factors [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 171-183.
- [35] 唐文虎, 申悦晴, 钱瞳, 等. 双碳目标下城市楼宇群能源系统灵活性量化分析与调控技术研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3423-3436.
- TANG Wenhui, SHEN Yueqing, QIAN Tong, et al. Research review and prospects of quantitative analysis and regulation technique for flexible resources in urban energy system embedded with building clusters under dual carbon target [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3423-3436.
- [36] 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): 2924-2934.
- HUANG Nantian, WANG Wenting, CAI Guowei, et al. modular denoising variational autoencoder for multi source load joint scene generation considering complex meteorological coupling characteristics [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(10): 2924-2934.
- [37] IBRAHIM N A, WAN ALWI S R, MANAN Z A, et al. Risk matrix approach of extreme temperature and precipitation for renewable energy systems in Malaysia [J]. Energy, 2022, 254: 124471.
- [38] CUI W Q, DING Y, HUI H X, et al. Evaluation and sequential dispatch of operating reserve provided by air conditioners considering lead-lag rebound effect [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6935-6950.
- [39] Power performance measurement of electricity producing wind turbines: IEC 61400-12-1 [S/OL]. [2024-05-10]. <https://webstore.iec.ch/en/publication/26603>.
- [40] TORQUATO R, SHI Q X, XU W, et al. A Monte Carlo simulation platform for studying low voltage residential networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2766-2776.
- [41] YANG Z K, LIU P, CHENG L, et al. Sizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower plant considering the effects of climate change: a case study in the Longyangxia of China [J]. Energy, 2021, 236: 121519.
- [42] HARTO C, YAN Y, DEMISSIE Y, et al. Analysis of drought impacts on electricity production in the Western and Texas interconnections of the United States [R]. Argonne, USA: Argonne National Laboratory, 2012.

阮前途(1965—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向: 电力系统。E-mail: future\_ruan@163.com

叶荣(1985—), 男, 博士, 主要研究方向: 能源电力发展规划。E-mail: yerong1985@qq.com

(编辑 顾晓荣)

## Power Source Planning of New Power System for Guaranteeing Supply-Demand Security Under Extreme Weather

*RUAN Qiantu<sup>1</sup>, YE Rong<sup>2</sup>*

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;

2. Institute of Economic and Technology of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China)

**Abstract:** In recent years, the increasing extreme weather such as the continuous high-temperature draught and low-temperature ice-coating has caused the power supply-demand imbalance in regional power systems, resulting in the occurrence of large-scale power outages or load curtailment. The main reason is that in the new power system, extreme weather has higher impact on supply-demand balance. Aiming at the long-term climate change, a framework of resilience assessment and enhancement of the power system is illustrated. Firstly, a compact operation model of power systems considering the climate parameters is established to characterize the impact of different types of extreme weather on various power sources, power grids, and loads. Secondly, an extreme scenario generation method based on the modular denoising variational autoencoder (MDVAE) algorithm is proposed. Finally, a multi-type power source expansion planning method of new power systems is proposed for power supply-demand guarantees under the continuous extreme weather. Based on the typical source-load scenario set generated from the extreme weather data in a province in South China, the proposed collaborative planning method is verified by the simulation with IEEE standard cases.

**Key words:** new power system; resilience; supply-demand balance; extreme weather; scenario generation; power source planning

