储能XXXX

一种基于连续缺电事件集的长时储能时长饱和点判定方法

诸晓骏，王 鑫，肖人杰，鄢 博，朱凤举
（国网江苏省电力有限公司经济技术研究院，江苏 南京 210008）

摘 要：储能的容量可信度随放电时长增加呈边际递减的“时长饱和效应”已获广泛共识，但其形成机制与定量刻画仍有待深入。本文从缺电事件持续时间的分布特征出发，揭示时长饱和效应的统计机理，并提出一种基于连续缺电事件集的储能时长饱和点定量判定方法。通过追踪发电容量裕度符号变化提取全年连续缺电事件，在EENS汇总之前建立事件持续时间的Weibull分布模型，从分布右尾衰减特征导出容量信用边际增益与缺电事件概率之间的定量关系，揭示饱和效应的内在成因；进而以边际增益跌落至预设阈值作为技术饱和点的判定准则。基于IEEE RTS-96系统的算例分析表明：储能容量信用边际增益由缺电事件持续时间分布的尾部特征所控制；新能源渗透率升高，传统电源充裕度不变时，系统总充裕度提高，饱和点左移；极端天气推升饱和点存在临界持续时长阈值，仅当极端天气覆盖尺度超过系统固有的事件分布尺度后，分布尾部增厚才会驱动饱和点右移。本文将时长饱和效应从经验观察推进为具有统计基础和可操作判据的定量分析框架，可为容量市场中储能时长阶梯补偿系数的动态调整提供方法论支撑。

关键词：长时储能；容量可信度；有效载荷容量（ELCC）；时长饱和点；连续缺电事件
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0567
中图分类号：TK 9　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-14

A Method for Determining the Duration Saturation Point of Long-Duration Energy Storage Based on Consecutive Energy Deficit Events

ZHU Xiaojun, WANG Xin, XIAO Renjie, YAN Bo, YUE Fen
(Economic and Technical Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, Jiangsu,China)

Abstract: While the "duration saturation effect"—the diminishing marginal increase of energy storage capacity credit with longer discharge duration—is widely recognized, its formation mechanism and quantitative characterization remain insufficiently understood. Starting from the distribution characteristics of energy deficit event durations, this paper reveals the statistical mechanism underlying the duration saturation effect and proposes a quantitative method for determining the duration saturation point of energy storage based on consecutive energy deficit events. By tracking the sign changes of the generation capacity margin, consecutive energy deficit events throughout the year are extracted, and before EENS

收稿日期：2026-07-01；修改稿日期：2026-10-09。
基金项目：国网江苏经研院2026年高阶平衡资源的商业模式创新及政策支持研究服务（B710EB25807O）。
第一作者：诸晓骏（1990—），女，高级工程师。主要研究方向：新型储能在电力系统中应用，储能经济性，Email：zhuxj2026@163.com，手机：15950529098
引用本文：诸晓骏, 王鑫, 肖人杰, 等. 一种基于连续缺电事件集的长时储能时长饱和点判定方法[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-14.
Citation：ZHU Xiaojun, WANG Xin, XIAO Renjie, et al. A Method for Determining the Duration Saturation Point of Long-Duration Energy Storage Based on Consecutive Energy Deficit Events[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

aggregation, a Weibull distribution model of event durations is established. From the right-tail decay characteristics of this distribution, a quantitative relationship between the marginal gain in capacity credit and the probability of deficit events is derived, revealing the inherent cause of the saturation effect. A technical saturation point is then defined using a criterion where the marginal gain drops below a preset threshold. Case studies based on the IEEE RTS-96 system show that the marginal gain of storage capacity credit is governed by the tail characteristics of the duration distribution of power shortage events. As renewable penetration increases, when the adequacy of conventional generation remains unchanged, the overall system adequacy improves, and the saturation point shifts leftward. There exists a critical duration threshold for extreme weather to raise the saturation point; only when the coverage scale of extreme weather exceeds the system's inherent event distribution scale does the thickening of the distribution tail drive the saturation point rightward. This work advances the duration saturation effect from an empirical observation to a quantitative analysis framework with a statistical foundation and operable criteria, providing methodological support for the dynamic adjustment of duration-based tiered compensation coefficients for energy storage in capacity markets.

Keywords: Long-duration energy storage; Capacity credit; Effective load carrying capability (ELCC); Duration saturation point; Consecutive energy deficit events

1 引 言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标的关键路径。截至2025年底，我国风电、太阳能发电总装机已超过18亿千瓦，新能源已成为我国装机第一大电源[1]。随着波动性电源占比持续提升，电力系统面临的净负荷波动性和不确定性显著增强[2-3]，仅靠传统的抽水蓄能和短时储能已难以应对持续多日无风、阴雨等极端天气带来的电力缺口[4-6]。长时储能（通常指持续放电4小时以上，乃至跨日、跨周储能）能够实现能量的时空平移，是保障系统容量充裕度、促进新能源消纳的核心手段[7-9]。

容量市场是保障系统长期容量充裕度的长效机制，各类资源根据其对系统可靠性的贡献（即容量可信度）获得容量补偿[10-12]。储能资源因其能量有限特性，容量可信度评估尤为复杂[13-15]。美国PJM、NYISO等成熟容量市场均采用有效载荷容量（ELCC）指标评估储能容量可信度[15-16]。研究表明，储能的ELCC随其放电时长增加而提高，但边际增益逐渐减小，存在“时长饱和效应”[17-20]。例如，PJM的评估显示，4小时储能的ELCC约为76%，而6小时以上储能的ELCC增速显著放缓[21]。这一现象的普遍性已获广泛共识，但其形成机制与定量刻画仍有待深入。

容量可信度的评估方法已从传统解析法拓展至蒙特卡罗模拟与序列运算等多种途径[22-27]，但现有方法均以逐小时可靠性指标为输出，未能从事件维度刻画储能对持续性缺电的覆盖能力。对于储能，已有研究通过ELCC-放电时长曲线的参数扫描，普遍观察到容量信用呈先陡后平的边际递减形态，但“饱和”仍依赖于经验判断，存在三方面局限：在方法层面，传统评估将逐小时缺电信息直接汇总为LOLE、EENS等统计指标，丢失了缺电事件的持续时间、时序分布等结构信息，难以从事件维度刻画储能对跨日乃至跨周缺电的覆盖能力[13,26]；在机理层面，尚未从缺电事件持续时间的分布统计特征解释饱和效应的内在成因，缺乏判定饱和发生位置的统一阈值准则；在场景层面，极端天气事件频发对系统充裕度的冲击日益受到关注[28-30]，但极端天气如何通过改变缺电事件分布尾部特征进而影响储能时长需求及其饱和特性，现有研究尚缺乏定量分析。

针对上述不足，本文从缺电事件持续时间的统计分布角度入手，在EENS汇总之前提取连续缺电事件集，建立储能容量信用边际增益与事件概率之

间的关联，并基于该关系提出一种具有明确阈值准则的饱和点判定方法。在此基础上，将所提框架拓展至极端天气场景，以考察其对饱和点迁移规律的影响。上述工作将时长饱和效应从经验观察推进为具有统计机理支撑、可判断饱和点迁移方向的定量分析工具，可为给定功率下储能时长需求的快速评估提供参考。需要说明的是，本文聚焦时长维度的容量信用评估，不涉及功率—能量联合规划；功率—容量协同配置需结合规划模型另行优化。

2 系统可靠性评估基础模型

2.1 容量可信度与ELCC的定义

容量可信度衡量机组对系统可靠性的贡献。本文采用等效带负荷能力（ELCC）指标，即在保持系统可靠性不变前提下，待评估机组可额外承载的负荷与其额定容量之比。ELCC的计算基于等可靠性准则，常用可靠性指标包括失负荷概率（LOLP）、失负荷时间期望（LOLE）和电量不足期望（EENS）。其中LOLE被广泛采用，如NERC与PJM均以LOLE≤0.1天/年为核心准则。但随着间歇性电源和储能等能量受限资源大规模接入，系统可靠性风险已从“停多少次”转向“停多严重”。EENS能量化停电总电量损失，对储能放电时序不敏感，衡量能量受限资源容量价值时较LOLE更全面一致。

本文以EENS为核心指标评估储能容量信用，算例中对系统充裕度及储能贡献的定量判断均以EENS为主要依据。需指出，EENS为绝对量，数值依赖系统规模，难以直观反映可靠性相对水平。因此第4章同时给出LOLE作为对照指标，利用其与“0.1天/年”等通用门槛的可比性，辅助读者直观感受系统可靠性水平。EENS的精准性与LOLE的直观性互为补充，共同刻画系统充裕度特征。

2.2 常规发电机组两状态马尔科夫模型

常规发电机组采用两状态马尔科夫模型，每台机组在任意时刻仅处于“正常运行”或“故障停运”两种状态之一。其强迫停运率FOR由平均无故障时间MTTF、平均修复时间MTTR满足：

$$FOR=MTTR/(MTTF+MTTR) \quad (1)$$

式（1）物理含义为：在长期运行中，机组处于故障停运状态的时间比例等于其平均修复时间占一个完整运行-停运周期的比例。

设故障率λ=1/MTTF，修复率μ=1/MTTR。两种状态的持续时间分别服从参数为λ和μ的指数分布。通过逆变换法生成随机样本，生成(0,1]上独立的均匀随机数u_1、u_2，按式(2)得到每次状态驻留时长：

$$TTF=-MTTF\times\ln(u_1),\ TTR=-MTTR\times\ln(u_2) \quad (2)$$

其中，TTF为正常运行时间，TTR为故障修复时间，u_1,u_2服从[0,1]上的均匀分布。

对每个仿真场景，按等时间步长（1小时）检查各机组状态。设机组i的额定容量为C_i，在t时刻的状态指示变量为$s_i(t)\in\{0,1\}$（1表示正常运行，0表示故障停运），则系统所有常规机组在t时刻的总可用容量为：

$$G_{avail}(t)=\sum_{i=1}^{N_g}C_i\times s_i(t) \quad (3)$$

式中，N_g为常规发电机组总台数。

上述模型仅模拟强迫停运。为完整刻画机组运行特性，本文进一步将最小技术出力与深度调峰下限约束嵌入可靠性评估链路，详见附录D。

2.3 新能源出力序列模拟

本文采用马尔科夫链-蒙特卡罗（MCMC）方法生成风电和光伏的年度8760小时出力序列，设定离散状态数N=10。首先将历史出力标幺值转换为实际值，提取有效出力数据，采用自适应分位划分状态区间（使低出力段获得更窄区间），并将完整历史序列离散化为状态序列S(t)。基于状态转移频次构建N×N转移概率矩阵T，并通过平稳分布修正使生成序列的宏观发电水平与历史一致。在蒙特卡罗抽样阶段，区别于传统状态区间内均匀插值，本文采用历史经验采样——从各状态对应的历史出力样本集中随机抽取，以更精确地复现历史出力分布形态。对生成序列施加爬坡率约束（风电50%/h、光伏60%/h），并利用历史零值掩码强制光伏夜间出力为零。其中，离散状态数N取10，该取值下平均每状态样本数达876个，可为MCMC转移概率矩阵的估计提供充分的统计稳定性。上述流程共生成M=500个场景。

2.4 储能充放电模型

本文储能系统采用理想化通用模型，关键参数包括：额定功率P_{rated}（MW）、放电时长T（h）以及对应的能量容量E= P_{rated}（MW）×T（h）。充放电过程考虑效率损耗，设充电效率为η_{ch}，放电效率η_{dis}，且二者相等。本文采用自然反应策略：任

一时刻若系统存在功率缺额（M(t)<0），储能即放电填补缺额（功率不超过额定值和缺额值的较小），直至缺额消失或能量耗尽；缺额消失后以额定功率充电至满电。该策略不依赖未来信息，代表储能的“保底价值”评估方式，具体放电量计算见3.1节式(8)。

3 基于连续缺电事件的时序ELCC与时长饱和特性模型

本章构建储能时长饱和特性分析框架：定义连续缺电事件及其提取方法，建立储能覆盖能力的数学描述；基于等可靠性准则定义容量信用，建立其与放电时长的函数关系；提出饱和点判定准则，并从事件持续时间分布解释饱和机理；最后比较本方法与传统峰值负荷时段方法，并引入功率充裕性与极端天气影响分析。

3.1 连续缺电事件与储能覆盖模型

3.1.1 基本定义

定义1（等效负荷需求）：为保障系统安全运行，系统需维持充足的旋转备用容量以应对负荷波动与机组随机停运。假设备用系数为σ（通常取15%~20%），备用总需求按负荷的一定比例确定，则系统在t时刻需要满足的等效负荷需求（即原始负荷加上旋转备用）为：

$$L_{\mathrm{eq}}(t) = D(t) \times (1 + \sigma) \tag{4}$$

式中，$D(t)$为t时刻原始负荷（MW），σ为备用系数。

定义2（发电容量裕度）：系统发电容量裕度$M(t)$为发电资源总可用容量$G_{\mathrm{total}}(t)$与等效负荷需求之差。

$$M(t) = G_{\mathrm{total}}(t) - L_{\mathrm{eq}}(t) \tag{5}$$

当$M(t) \geqslant 0$时,系统发电容量充足；当$M(t) < 0$时，系统存在功率缺额。

其中，$G_{\mathrm{total}}(t)$不仅包括常规机组的可用容量$G_{avail}(t)$（由2.2节式（3）给出），还计及风电、光伏在该时刻的可信容量（或称有效容量），这里不考虑储能。令$C_W(t)$、$C_S(t)$分别为风电、光伏的可信容量，则$G_{\mathrm{total}}(t)$为：

$$G_{\mathrm{total}}(t) = G_{\mathrm{avail}}(t) + C_W(t) + C_S(t) \tag{6}$$

3.1.2 连续缺电事件的定义和提取

定义3（连续缺电事件）：连续缺电事件e定义为满足$M(t)<0$的最大连续时段$[t_e, t_e+L_e-1]$，其中L_e为事件持续时间（小时）。事件e的总缺电量为：

$$Q_e = \sum_{t_e}^{t_e + L_e - 1}(-M(t)), M(t)<0 \tag{7}$$

定义3将分析视角从“峰值负荷时段”拓展为以“缺电事件”为基本单元的全时序视角，其优势在于：无需预设风险集中于峰荷时段，通过$M(t)$符号变化自动识别全年任意时段的功率缺口，完整捕捉各类持续时长的缺电事件，准确反映长时储能对跨日乃至跨周缺电的覆盖能力。

3.1.3 储能对缺电事件的覆盖能力

储能在事件e中的最大放电量由功率约束和能量约束共同决定：

$$C_e(T) = \min\left\{\sum_{\tau=1}^{L_e}\min(P_{\mathrm{rated}}, -M(t_e + \tau - 1)), E \cdot \eta_{\mathrm{dis}}\right\} \tag{8}$$

其中，$-M(t)$为t时刻的功率缺额。式(8)刻画了储能放电的两个物理上限：逐小时的放电功率不超过额定功率P_{rated}和当前缺额功率$-M(t)$中的较小值；累计放电量不超过可用容量$E \cdot \eta_{\mathrm{dis}}$。在此模型下，储能对缺电事件的放电持续时间并非固定为T，而是由功率约束和能量约束共同决定。当事件功率缺额较小时，实际放电功率低于额定值，储能可持续支撑的时间将超过额定放电时长T；当事件缺额较大时，能量可能在T小时内提前耗尽。

所以，考虑储能后的系统年失负荷期望（EENS）为：

$$EENS(T) = \sum_{e \in \Omega}\max(0, Q_e - C_e(T)) \tag{9}$$

所有缺电事件构成集合Ω，无储能时，$EENS(0) = \sum_{e \in \Omega} Q_e$。

3.1.4 缺电事件集的统计建模方法

为从数学上揭示时长饱和效应的统计机理，本节对事件集Ω的持续时间特征进行统计建模，建立其概率分布特征与容量信用边际衰减规律之间的定量联系。

（1） 事件持续时间的概率分布

对集合Ω中全部事件的持续时间L_e进行分布拟合。大量实证研究表明，电力系统可靠性事件持续时间可用Weibull分布有效描述。其概率密度函数为：

$$f(L; \lambda, k) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{L}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(L/\lambda)^k}, L > 0 \tag{10}$$

式中，$\lambda>0$为尺度参数，$k>0$为形状参数。形状参数k决定了分布尾部的厚度，是刻画缺电事件

持续时间结构的关键统计量；当k<1时，分布呈重尾特征，意味着长时间缺电事件的概率相对较高；当k>1时，分布尾部较轻，缺电事件更集中于较短事件尺度。参数估计采用极大似然法，对特定场景下的事件持续时间样本$\{L_1,L_2,\cdots,L_n\}$，通过最大化对数似然函数求解参数估计值$\hat{\lambda}$和$\hat{k}$。

（2） 事件持续时间尾部特征与饱和效应的数学关联

设$F(L)$为事件持续时间的累积分布函数，则1-$F(L)$表示持续时间大于T的事件的发生概率，即分布的右尾概率。由3.1.3节可知，储能在事件e中的覆盖量$C_e(T)$是放电时长T与事件持续事件L_e的函数。当储能放电时长由T延长时，其新增覆盖的缺电量主要来自持续时间长于当前T的尾部事件——这些事件的持续时间已超出储能当前时长的覆盖范围，而延长时长恰好能够覆盖其中一部分，从而降低其供电不足量。

在储能额定功率P_{rated}足够覆盖大多数缺电事件的峰值功率缺口（即功率约束不显著，储能的覆盖能力主要受限于其能量容量）的近似条件下，容量信用κ(T)对时长T的边际增益可近似表述为：

$$\frac{d\kappa}{dT} \approx K \cdot [1 - F(T)] \cdot \mathbb{E}[\bar{P}_e | L_e > T] \tag{11}$$

式中，K为常数，其$\bar{P}_e = Q_e/L_e$为事件e的平均缺电功率；1-F(T)为事件持续时间超过T的概率；$\mathbb{E}[\bar{P}_e | L_e > T]$为持续时间超过T的事件在其持续期间内的条件期望平均缺电功率。

式（11）为揭示饱和机理的近似解析式，其成立条件为：储能额定功率足以覆盖多数缺电事件的峰值功率缺额，覆盖能力主要受能量容量约束；且条件期望平均缺电功率$E\left[\dot{P}_e | L_e > T\right]$随$T$缓变。当功率约束显著时，应以式（8）数值计算为准，式（11）用于解释右尾概率对边际增益衰减的主导作用，不直接替代数值ELCC。

式(11)标明延长储能放电时长带来的容量信用增量，正比于两个因素：其一为持续时间超过当前时长的缺电事件的发生概率$1 - F(T)$；其二为这些长事件的条件期望缺电功率。该式的完整推导见附录C。需指出，“功率约束不显著”为理想化近似；但功率项仅作为T的缓变因子出现，右尾概率1−F(T)才是边际增益衰减的主导因素。算例中1−F(T)从4 h到20 h跨越两个数量级，而条件平均缺电功率仅在250 – 320 MW内波动，故式(11)揭示的“饱和由事件持续时间分布主导”这一机理是稳健的。

式(11)从数学上揭示了时长饱和效应的统计本质：边际增益随T衰减的速度，由事件持续时间分布的右尾函数1-F(T)所控制。当形状参数k较小时（重尾分布），右尾概率衰减缓慢，长事件概率不可忽视，新增时长仍能覆盖可观的边际缺电量，因此饱和点右移；当k较大时（轻尾分布），右尾概率随T快速衰减，边际增益迅速下降至阈值以下，饱和点左移。由此，Weibull分布的形状参数k成为判断储能时长需求的核心统计量。

3.2 储能的容量信用

定义4（容量信用）：对于额定功率P_{rated}、放电时长T的储能，其有效载荷容量ELCC(P_{rated},T)定义为：在保持系统年失负荷期望（EENS）与无储能基准水平严格相等的前提下，系统可额外承载的负荷增量。即求解ΔL，使得：

$$EENS_{\text{es}}(P_{\text{rated}}, T, \Delta L) = EENS_0 \tag{12}$$

成立。ΔL即为所求的ELCC值，即$LCC(P_{rated}, T) = \Delta L$。储能的容量信用则由其与额定功率的比值给出：

$$\kappa(P_{\text{rated}}, T) = \frac{ELCC(P_{\text{rated}}, T)}{P_{\text{rated}}} \tag{13}$$

容量信用κ表征了单位储能额定功率对系统充裕度的等效带负荷能力。计算中，对ΔL采用二分法迭代搜索，逐步逼近使等式(12)成立的负荷增量，进而由式(13)得到相应κ值。这一过程完全基于等可靠性准则，保证了评估结果与可靠性基准的一致性。

3.3 时长饱和点及其统计机理

定义5（时长边际增益）：在储能额定功率P_{rated}固定的条件下，定义时长边际增益为放电时长每增加ΔT所带来的容量信用提升：

$$\Delta\kappa_T(T) = \kappa(T + \Delta T) - \kappa(T) \tag{14}$$

其中ΔT为时长扫描步长（本文取2h）。该指标刻画了延长储能放电时长对容量贡献的边际效果。

定义6（时长饱和点）：给定增益阈值ε_T（本文取1个百分点），技术时长饱和点T_{sat}为边际增益首次低于该阈值的最小放电时长：

$$T_{sat} = \min\left\{T \mid \Delta\kappa_T(T) < \varepsilon_T\right\} \quad (15)$$

饱和点右侧意味着，继续延长放电时长已无法带来超过一个百分点的容量信用增量，即储能已进入“时长收益递减饱和区”。

3.4 与传统峰值负荷时段方法的比较

ELCC的工程实现存在两种典型路线。一种是以峰值负荷时段为观察窗口的简化方法，截取全年负荷最高的若干小时至一周进行评估，隐含假设充裕度风险集中于少数峰荷时段。本文方法则以全年8760小时全时序扫描为基础，以“连续缺电事件”为分析单元，允许风险在全年任意时段分散发生。两种路线的系统比较见表1。

表1 本文方法与传统峰值负荷时段方法的比较

Table 1 Comparison of the proposed method and the conventional peak-load-period method

比较维度	传统峰值负荷时段方法	本文连续缺电事件方法
时间尺度	仅截取年最大负荷日或周的K小时	全年8760小时全时序
缺电事件定义	峰值负荷时段内的功率不足	全年任意时段M(t)<0的连续区间
长时储能价值捕捉	无法反映（峰值时段通常不超过数小时，长时储能的持续放电优势无法体现）	完整捕捉（事件集Ω中按持续时间分布可完整评价从分钟到数日的覆盖能力）
适用场景	常规电源主导、缺电由短时故障引起的系统	高比例新能源渗透、存在多日持续缺电风险的系统

3.4.1 传统方法误差源的理论分析

传统方法的截断误差源于两点。其一，窗口外缺电事件被直接遗漏——年最大负荷周以外发生的缺电事件及其电量缺口均不计入评估，导致基准缺电量与储能覆盖贡献被双重低估。其二，储能跨窗口能量闭环被切断——储能的充放电行为具有时序连续性，可能在窗口外充电、窗口内放电，传统方法仅观察窗口内的行为，无法刻画储能跨时段能量调度的实际价值，这一缺陷对长时储能尤为严重。

4 算例分析

4.1 算例系统设计

本算例的常规发电机组基础数据采用IEEE RTS-96系统的32台机组容量及强迫停运参数，原始总装机容量3405 MW。设定基准场景，在RTS-96系统基础上退役2台U100机组和1台U155机组，常规电源装机降至3050 MW（详见附录B），并添加4000 MW光伏、2000 MW风电。负荷数据均基于某地区电网实测8760小时序列等比缩放；新能源8760小时出力序列由该地区实测风光出力标幺值乘以各场景装机容量得到，风电、光伏装机容量的比例按1：2进行设置。基准场景的负荷及电源装机数据如表2所示。

蒙特卡罗模拟场景数M=500，仿真周期为8760小时。常规机组的可靠性参数（MTTF、MTTR）均取自IEEE RTS-96标准报告，各机组的具体数值详见附录表A。风电和光伏出力基于历史数据生成MCMC序列，状态数N=10。

表2 基准场景下负荷及电源装机数据

Table 2 Load and generation capacity data for the base scenario

年峰值负荷(MW)	常规电源装机(MW)	光伏装机(MW)	风电装机(MW)	新能源装机占比γ
2800	3050	4000	2000	66.3%

需要说明，本文算例为改造后的IEEE RTS-96孤立测试系统，未计及跨区互联支援。极端天气通过强制压低风光出力构造，属于确定性情景压力测试，并非概率气象抽样。因此，本文结论主要用于揭示时长饱和效应的统计机理和趋势性规律，实际工程配置需结合具体电网互联条件、概率气象场景进行再校准。

为检验常规机组建模简化的影响，本文将火电最小技术出力与深度调峰下限约束纳入发电裕度计算：系统最小技术出力为$G_{\min}(t) = \sum_i r_i C_i s_i(t)$，新能源实际可消纳出力为$P_{RE,eff}(t) = \min\left(P_{RE}|(t)\max\left(0|L(t) - G_{\min}(t)\right)\right)$，进而按式(5)计算发电裕度。$r_i$为机组类型最小出力系数，取值见附录D表D2。分别在不含约束与含约束两种条件下重算可靠性指标，结果详见附录D表D1。含约束时弃风弃光小时占比由26.2%升至61.8%，发电裕度最大下降1252.23 MW；但缺电事件持续时间分布与时长饱和点均不变。本文其余算例均采用含约束条件。

4.2 基准场景下的缺电事件统计与时长饱和特性

4.2.1 连续缺电事件的统计特征

在备用系数σ=0.15下，基于无储能时系统的

发电容量裕度M(t)<0提取连续缺电事件，按持续时间分组统计，结果如表3所示。

表3 连续缺电事件统计特征

Table 3 Statistical characteristics of consecutive energy deficit events

持续时间	事件次数	平均缺电量(MWh)	最大缺电量(MWh)	平均缺电功率 (MW)	最大缺电功率 (MW)
1-4h	7444	223.30	2720.71	146.95	1116.95
5-8h	353	1104.93	4775.12	229.57	1109.13
9-12h	24	2978.43	4775.12	320.07	1109.13
13-24h	5	4216.59	7247.88	304.69	790.68
>24h	0	0.00	0.00	0.00	0.00

基于500个蒙特卡罗模拟场景的汇总统计，共提取缺电事件7826次，其中95.1%集中在1-4 h短时区间，呈“高频低强度”特征；13-24h的长事件仅5次，但平均缺电量高达4216.59MWh，系统同时面临“短时频发”与“长时深度”的双重充裕度风险。无储能时系统LOLE达22.94小时/年，远超0.1天/年可靠性门槛。对事件持续时间序列进行Weibull分布拟合，形状参数k=1.664>1，呈轻尾特征，意味着极长事件概率随长度增加而快速衰减，容量信用边际增益将在较短时长内迅速饱和。此外，随持续时间增长，事件平均缺电功率单调上升而变异系数持续下降，表明长事件不仅功率缺额更大，且事件间特征更一致。

500MW基准功率以LOLE≤2.4小时/年为准则选取：无储能时系统LOLE为22.94小时/年，配置500MW/4 h储能后降至1.49小时/年，满足门槛。由表3可知，各区间平均缺电功率（147–320MW）均低于500MW，最大缺电功率（791–1117MW）虽超过500MW，但仅出现在事件内个别小时。储能覆盖的是事件能量（MWh），平均功率层面不构成瓶颈。

为验证上述统计结果对关键参数的稳健性，对备用系数σ和离散状态数N进行了敏感性分析。σ在0.10–0.20范围内变化时，系统充裕度显著变化，但Weibull形状参数k仅在1.629–1.696之间变化，且始终大于1，技术饱和点稳定为16h；N在10–30范围内变化时，k波动小于4%，T_{sat}亦稳定为16h。这说明本文核心结论对上述参数取值不敏感。

为验证统计稳定性，采用批均值法（10批×50场景）估计各指标方差：Weibull形状参数k的变异系数为6.86%，95%置信区间为[1.6139, 1.7572]；容量信用κ的变异系数为2.80%，置信区间为[63.2%, 65.4%]；无储能EENS的变异系数为10.66%。收敛曲线显示场景数M≥250后各指标进入收敛区间。说明本文核心结论对500场景的蒙特卡洛统计充分。

图1将事件持续时间的Weibull分布与容量信用边际增益衰减并置对照。左图为基准场景下缺电事件持续时间的Weibull拟合（k=1.66>1），右尾概率1-F(T)随T增大快速衰减；右图为后续4.2.2节容量信用扫描得到的边际增益Δκ曲线，在T=16h处首次跌破ε_T=1个百分点，达到T_{sat}。图1验证了3.1.4节的论断：事件持续时间分布的尾部形态是刻画储能时长饱和行为的关键统计特征。

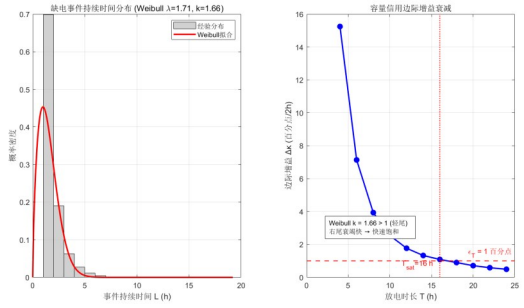


图1 缺电事件持续时间Weibull分布与容量信用边际增益衰减的关联机理

Fig.1 Correlation mechanism between the Weibull distribution of energy deficit event durations and the marginal gain attenuation of capacity credit

4.2.2 时长饱和特性验证

固定储能额定功率为500 MW，扫描放电时长T从2 h至24 h，计算不同放电时长储能容量信用κ(T)及其边际增益，结果如表4所示。

图2(a)给出κ(T)变化轨迹：T由2h增至4h时κ跃升15.25个百分点，此后增速持续放缓，至16h达82.12%后进入平台区，竖虚线标出T_{sat}=16h。图2(b)以Δκ柱状图展示边际增益的逐级衰减，红色柱

表4 不同放电时长储能的容量信用（P=500 MW）

Table 4 Capacity credit of energy storage with different discharge durations (P=500 MW)

T (h)	κ(T) (%)	$\Delta\kappa$ (百分点/2h)	LOLE（小时/年）
2	49.07	/	2.40
4	64.32	15.25	1.49
6	71.46	7.14	1.24
8	75.39	3.93	1.13
10	77.93	2.54	1.08
12	79.70	1.77	1.07
14	81.03	1.33	1.06
16	82.12	1.09	1.06
18	83.02	0.90	1.05
20	83.73	0.71	1.05
22	84.32	0.59	1.05
24	84.81	0.49	1.05

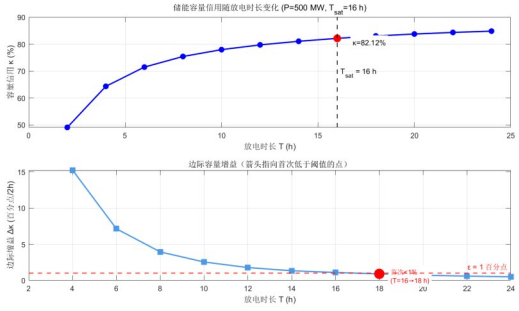


图2 基准场景下储能时长饱和特性与边际增益衰减

Fig.2 Duration saturation characteristics and marginal gain attenuation of energy storage under the base scenario

标识$\Delta\kappa$首次跌破阈值ε=1百分点的区间，此后增量均低于阈值。LOLE从无储能时的22.94小时/年骤降至4h储能的1.49小时/年，随后收敛于约1.05小时/年。该结果验证了轻尾分布（k=1.664>1）下右尾函数快速衰减导致饱和点较早出现的理论预测。

需说明的是，13–24 h长事件仅5次，但本文对全样本7826个事件拟合Weibull分布，长事件的尾部信息已包含在全样本中，不影响形状参数k的估计可靠性。

T_{sat}是在给定边际增益阈值ε和扫描步长ΔT下的判据性结果。敏感性分析表明：固定ΔT=2h时，ε取0.5、1.0、1.5、2.0百分点对应T_{sat}分别为22、16、12、10h，这是判据严格程度的真实反映；固定单位时间阈值$\varepsilon/\Delta T$=0.5百分点/小时，ΔT取1h和2h对应T_{sat}均为16 h，而若仅固定ε=1百分点、改变ΔT，则T_{sat}由16 h（ΔT=2h）变为10h（ΔT=1h）。后者的表观敏感性源于式(14)中$\Delta\kappa$是步长区间上的累积增量，未随ΔT归一化；改用单位时间判据$\Delta\kappa/\Delta T < \varepsilon'$后，步长影响基本消除。

为考察功率对饱和点的影响，补充了400–600MW五个功率等级的仿真。结果显示：饱和时长T_{sat}在400-450MW时为14h，随功率进一步增加依次右移至16、18、20h；饱和点处容量信用κ_{sat}由83.49%略降至81.68%；有储能LOLE由2.51h/年降至0.87h/年。上述功率敏感性测试用于说明饱和点对储能额定功率的依赖性，本文未展开功率—能量二维系统优化。所得饱和点是给定功率下的时长维度判据，不直接构成功率—容量协同规划方案；实际配置中需结合系统充裕度、储能功率与时长联合优化，而非单一追求时长延长。

4.3 储能容量饱和特性的影响因素分析

4.3.1 新能源渗透率对饱和点的影响

保持常规电源装机和储能额定功率（500 MW, 4h）不变，逐步提高新能源装机占比，计算不同渗透率场景下的技术时长饱和点，结果如表5所示。

表5 不同渗透率下的技术饱和点

Table 5 Technical saturation points under different penetration rates

新能源装机占比γ	T_{sat} (h)	相对基准右移(h)	饱和点κ (%)	无储能LOLE（小时/年）	Weibull k
61.1%	18	+2（右移）	81.07	30.12	1.616
63.9%	16	0	81.16	26.16	1.642
66.3%	16	0（基准）	82.12	22.94	1.664
68.4%	16	0	83.02	20.35	1.696
70.2%	14	-2（左移）	82.84	18.24	1.705

渗透率由61.1%升至70.2%，k由1.616递增至1.705，分布尾部趋于更轻，右尾函数加速衰减使饱和点由18小时左移至14小时。无储能LOLE由30.12小时/年降至18.24小时/年，根本原因在于常规电源与负荷不变条件下，新能源装机扩大意味着总电源容量相对负荷的裕度持续增加，若负荷与

新能源同步增长，上述趋势将不复存在，甚至可能逆转，因此该结论仅反映在当前假设条件下系统充裕度提升对储能时长需求的边际影响。

图3(a)以亮度渐变的蓝色系区分五组渗透率，图例同步标注γ与k值。每条曲线上方以竖虚线标出T_{sat}位置，图中趋势文本框点明核心规律："γ↑→充裕度↑→k↑→T_{sat}左移"。随渗透率由61.1%升至70.2%，k由1.616增至1.705，饱和点由18h左移至14h。图3(b)以散点连线图量化该趋势，每点旁标注k值，直观展示k与T_{sat}的负关联。各渗透率下κ(T)均呈"先陡后平"，随渗透率升高整条曲线上移——以T=8h为例，κ由约76%升至约82%。该变化的根本原因在于常规电源与负荷不变时，新能源装机扩大增加了总电源裕度。

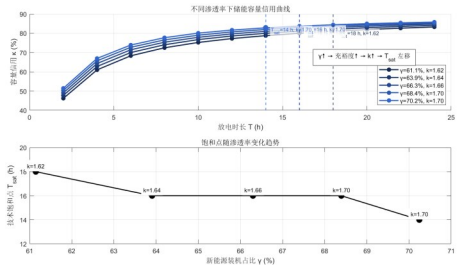


图3　新能源渗透率对储能时长饱和特性的影响

Fig.3　Impact of renewable energy penetration on duration saturation characteristics of energy storage

4.3.2　极端天气对饱和点的影响

将风电和光伏出力分别强制压低至其正常出力的10%和5%，并改变极端天气持续时长，结果如表6所示。

表6　极端天气对缺电事件分布与时长饱和点的影响

Table 6　Impact of extreme weather on deficit event distribution and duration saturation points

场景	持续时长（h）	事件分布					T_{sat} (h)	Weibull k	分布结构变化
		1-4h	5-8h	9-12h	13-24h	>24h			
E0（正常）	0	7444	353	24	5	0	16	1.664	—
E1	72h（3天）	7498	362	25	5	0	16	1.661	未质变
E2	168h（7天）	7563	368	26	6	0	16	1.655	未质变
E3	336h（14天）	7621	380	29	8	0	18	1.630	尾部增厚

随极端天气持续时长增至336 h，k由1.664递减至1.630，尾部变厚；13-24h长事件由5次增至8次（增幅60%），LOLE升至23.88小时/年。尾部增厚使右尾函数衰减减缓，饱和点在E3场景下右移至18小时。

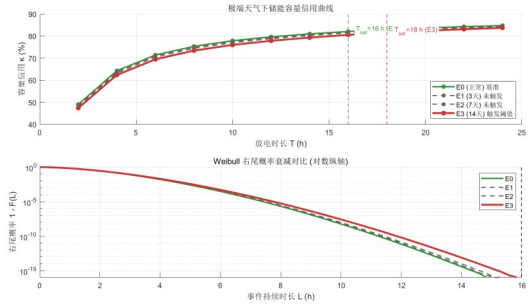


图4　极端天气对时长饱和特性及事件分布尾部的影响

Fig.4　Impact of extreme weather on duration saturation characteristics and the tail of event distribution

图4(a)以颜色与线型联合编码：E0基准为深绿实线，E1/E2未触发阶段为灰色虚线，E3触发阶段为加粗红实线。仅对E0和E3标注T_{sat}（16h和18h），图例注明"E0-E2饱和点稳定在16 h，仅E3右移至18 h"。图4(b)以对数纵轴绘制四条Weibull右尾概率衰减曲线。E3曲线（红实线）在L>16 h区间显著高于其余三条，直观展示尾部增厚效应；T=16h竖虚线左侧四条曲线几近重合，右侧E3概率密度明显抬高，从分布尾部角度解释了仅E3饱和点右移的原因。该图揭示了临界阈值效应：极端天气仅在覆盖尺度超过系统固有事件分布尺度后，尾部增厚才会驱动饱和点右移。

4.4　本方法与传统方法对比

传统峰值窗口方法取年最大负荷周（168h）作为评估窗口，窗口外时段不纳入可靠性统计。储能初始SOC设为满电，仅在窗口内充放电，窗口外不参与，因此跨窗口能量闭环被切断。两种方法均基于相同的蒙特卡罗场景、相同的常规机组故障序列、相同的负荷及新能源出力序列，仅可靠性统计范围不同。在基准系统配置下，固定储能功率500MW，扫描时长T，分别用本文方法和传统方法计算κ(T)，结果如表7所示。

两种方法下κ均呈边际递减，本文方法κ系统

表7 本方法与传统方法对比

Table7 Comparison of the proposed method and the conventional method

T (h)	本文方法		传统方法	
	κ (%)	EENS（MWh/年）	κ (%)	EENS（MWh/年）
2	49.07	533.22	48.10	87.77
4	64.32	257.77	63.06	42.91
6	71.46	182.00	69.90	30.46
8	75.39	151.84	73.53	24.43
10	77.93	141.69	76.01	23.63
12	79.70	134.32	77.87	23.63
14	81.03	130.17	79.28	23.63
16	82.12	128.32	80.50	23.63
18	83.02	126.98	81.62	23.63
20	83.73	126.98	82.62	23.63
22	84.32	126.98	83.46	23.63
24	84.81	126.98	84.17	23.63

注：本文方法EENS为全年8760h统计值；传统方法EENS为年最大负荷周（168h）窗口内统计值。两种方法κ均按各自基准的等可靠性准则计算，样本完全相同，仅统计窗口不同。

性略高于传统方法，差值呈倒U型，在T=10 h处达最大（1.92个百分点）。短时储能（≤4 h）差异微小；中长时（6-18 h）差异持续扩大，因储能边际价值转向窗口外跨日事件；超长时（≥20 h）差异收窄。在EENS维度，本文方法有储能EENS持续下降至126.98MWh/年，真实反映长时储能覆盖能力；传统方法在T≥10h后停滞于23.63 MWh/年不再下降，其窗口内无储能$EENS_0$仅516.47MWh/年，为本文方法$EENS_0$（3882.09MWh/年）的13.3%，严重低估系统缺电风险。

图5(a)中，蓝实线为本文方法，灰虚线为传统方法。两曲线在T≤4 h几乎重合，自T=6 h起分化：

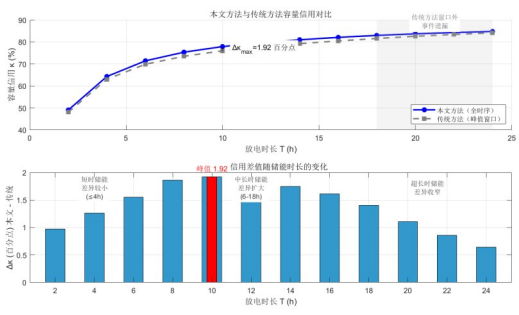


图5 本文方法与传统（峰值窗口）方法容量信用对比

Fig.5 Comparison of capacity credit between the proposed method and the conventional (peak-window) method

本文方法持续上移至T=16 h进入平台区，传统方法在T=10 h后趋于水平。T=10 h处以竖虚线标注$\Delta\kappa_{max}$=1.92百分点，右侧灰色区域示意传统方法窗口外事件遗漏。图5(b)以柱状图展示Δκ(本文−传统)，红色柱高亮峰值，分区标注揭示差异的阶段性：短时储能差异微小（≤4 h）、中长时差异扩大（6-18 h）、超长时收窄。在EENS维度，传统方法在T≥10 h后停滞于23.63MWh/年，其窗口内$EENS_0$仅为本文方法$EENS_0$（3882.09 MWh/年）的13.3%，严重低估系统缺电风险。传统方法窗口内k=1.648，略低于本文k=1.664，印证了窗口截断遗漏了全年分散的长持续时间缺电风险。

5 结 论

本文提出了一种基于连续缺电事件集的储能时长饱和点定量判定方法，通过IEEE RTS-96系统的蒙特卡洛模拟验证了其有效性。主要结论如下：

（1）本文引入连续缺电事件集作为中间分析层，从Weibull分布右尾解释饱和机理，并分析形状参数k对饱和点迁移方向的影响。以边际增益跌落至预设阈值作为饱和判据，可有效确定技术饱和点，为储能功率与时长的优化配置提供参考。

（2）新能源渗透率对时长饱和点的影响取决于系统总充裕度的变化方向。若常规电源与负荷不变，仅增加新能源装机，系统总充裕度提高，缺电事件持续时间分布尾部趋轻，饱和点左移；若负荷同步增长，饱和点移动方向取决于二者增速的相对关系。这表明，系统总充裕度与长时储能时长需求呈负相关。

（3）极端天气对饱和点的推升效应存在临界阈值。短暂的新能源出力中断不足以改变事件持续时间分布结构；仅当极端天气覆盖尺度超过系统固有的事件分布尺度后，分布尾部增厚才会推动饱和点右移。该阈值由系统电源结构与新能源出力特性的交互决定，是评估储能时长需求对极端气候敏感性的关键参数。

（4）全时序连续缺电事件方法相较于传统峰值窗口方法具有显著优势。传统方法因窗口截断而系统性低估基准缺电风险，且无法捕捉长时储能对窗口外事件的覆盖价值。两种方法的容量信用差值呈倒U型——短时储能差异微小，中长时差异扩大，超长时收窄——表明传统方法对长时储能价值的低

估集中于中长时区段。本方法以缺电事件为基本分析单元，完整还原了不同时长储能的容量贡献，尤其适用于高比例新能源系统中充裕度风险分散化的新形态。

（5）研究成果为容量市场机制设计提供了动态量化工具。技术饱和点从纯可靠性视角界定了储能有效时长的技术边界，其数值随系统条件变化而动态调整，可为容量市场根据自身可靠性水平灵活设定阶梯补偿系数提供依据。实际补偿上限的设定还需综合经济性因素，本文方法提供了基于可靠性贡献的上限参考。

（6）本文研究存在一定局限：未计及需求响应、抽水蓄能等多元灵活性资源，缺电事件持续时间采用单一Weibull分布拟合，与实际可能存在偏差，尾部拟合误差会影响饱和点结果。因此，本文饱和点结果为给定假设和判据下的技术参考值，后续将引入多元灵活性资源和混合分布模型进一步验证。

参 考 文 献

[1] 国家能源局 . 2025 年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. (2026-02-12).

[2] 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 (01): 9-20.
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): 19-28.

[3] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 张放 . 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23 (6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[4] 居文平, 王一帆, 赵勇, 等 . 新型电力系统长时储能技术综述[J]. 热力发电,2024,53 (9):1-9.
JU Wenping, WANG Yifan, ZHAO Yong, et al. Overview of long-term energy storage technologies in new power systems[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 1-9.

[5] Zhao, J., Li, F. & Zhang, Q. Impacts of renewable energy resources on the weather vulnerability of power systems. Nat Energy 9, 1407 – 1414 (2024). https://doi. org/10.1038/s41560-024-01652-1.

[6] Conghao Zhao, Ming Zhou, Xiaoyuan Chen, et al. Planning multi-duration energy storage for power system resilience enhancement under extreme cold weather[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2026, 175: 111665.

[7] 房珂, 周明, 武昭原, 等 . 面向低碳电力系统的长期储能优化规划与成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (21): 8282-8294.
FANG Ke, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Optimal planning and cost-benefit analysis of long-duration energy storage for low-carbon electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8282-8294.

[8] 郑彦春, 陕超伦, 张晋宾 . 长持续时间储能体系研究现状及发展展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 93-101.
ZHENG Yanchun, SHAN Chaolun, ZHANG Jinbin. Current research status and development prospects of long duration energy storage system[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 93-101.

[9] 陈熙, 程瑜, 丁肇豪 . 低碳驱动的长时储能容量补偿机制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 32-41.
CHEN Xi, CHENG Yu, DING Zhaohao. Low-carbon-driven capacity payment mechanism of long-term energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 32-41.

[10] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等 . 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (3): 663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.

[11] 陈明媛, 莫东, 刘起兴, 等 . 计及发电容量充裕度的容量市场多能源定价模型[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39 (5): 270-278.
CHEN Mingyuan, MO Dong, LIU Qixing, et al. A multi-energy pricing model for capacity markets considering generating capacity adequacy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 270-278.

[12] 黄海涛, 贾秀锋, 程凯, 等 . 新型电力系统下多元资源发电容量充裕性评估与保障机制[J]. 电力系统自动化,2024,48(11):77-87.
HUANG Haitao, JIA Xiufeng, CHENG Kai, et al. Sufficiency evaluation and guarantee mechanism for generation capacity of diversified resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 77-87.

[13] 王仁顺, 王世龙, 耿光超, 等 . 面向风光储系统的多时空尺度容量置信度评估方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 3904-3913.
WANG Renshun, WANG Shilong, GENG Guangchao, et al. Multi-temporal-spatial scale capacity credit assessment method for wind-photovoltaic-storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 3904-3913.

[14] 齐宁, 程林, 刘锋 . 计及决策依赖不确定性的广义储能可信容量评估[J]. 电网技术, 2023, 47(12):4916-4930.
QI Ning, CHENG Lin, LIU Feng. Capacity credit evaluation of generic energy storage under decision-dependent uncertainty[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4916-4925.

[15] 王蓓蓓, 胡维涵, 牟玉亭, 等 . 储能对高比例新能源电力系统的容量价值贡献及机制思考[J]. 电网技术, 2024, 48 (6): 2520-2531.
WANG Beibei, HU Weihan, MOU Yuting, et al. Contribution and mechanism consideration of energy storage to capacity value in high proportion renewable energy power systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2520-2531.

[16] 靳慧龙, 刘宏扬, 康赫然, 等 . 国内外独立储能参与电力市场交易机

制研究 [J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2602-2616.
JIN Huilong, LIU Hongyang, KANG Heran, et al. Research on the mechanism of independent energy storage participating in electricity market trading in China and abroad[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2602-2616.

[17] Mertens T, Bruninx K, Duerinck J, et al. Capacity credit of storage in long-term planning models and capacity markets[R]. Leuven: KU Leuven, EnergyVille, 2020.

[18] Frazier A W, Cole W, Denholm P, et al. Assessing the Potential of Battery Storage as a Peaking Capacity Resource in the United States[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115385.

[19] Olson A, Ming Z, Carron B. Declining capacity credit for energy storage and demand response with increased penetration[R]. New York: New York Independent System Operator (NYISO), 2021.

[20] Sodano D, DeCarolis J F, de Queiroz A R, et al. The symbiotic relationship of solar power and energy storage in providing capacity value[J]. Renewable Energy, 2021, 177: 823-832.

[21] Denholm P. Beyond Four Hours: Potential Market Drivers for Deploying Long-Duration Energy Storage[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2023.

[22] GARVER L L. Effective load carrying capabilitity of generating units[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1966,85(8):910-919.

[23] 黄远明, 张玉欣, 夏赞阳, 等. 考虑需求响应资源和储能容量价值的新型电力系统电源规划方法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(04): 432-441.
HUANG Yuanming, ZHANG Yuxin, XIA Zanyang, et al. Power system planning considering demand response resources and capacity value of energy storage[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 432-441.

[24] 张宁, 康重庆, 陈治坪, 等. 基于序列运算的风电可信容量计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25):1-9.
ZHANG Ning, KANG Chongqing, CHEN Zhiping, et al. Wind power credible capacity evaluation model based on sequence operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 1-9.

[25] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19):101-107.
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Current status and development trend on capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (19): 101-107.

[26] 吴鸣, 季宇, 郑楠, 等. 基于序列运算的风光储混合微电网可信容量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(03):251-258.
WU Ming, JI Yu, ZHENG Nan, et al. Assessment on credible capacity of hybrid microgrid containing wind/photovoltaic/storage based on sequence operation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(3): 251-258.

[27] 何俊, 邓长虹, 徐秋实, 等. 风光储联合发电系统的可信容量及互补效益评估[J]. 电网技术, 2013, 37(11):3030-3036.
HE Jun, DENG Changhong, XU Qiushi, et al. Assessment on capacity credit and complementary benefit of power generation system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3030-3036.

[28] PONCELET K, HÖSCHLE H, DELARUE E, et al. Selecting representative days for capturing the implications of integrating intermittent renewables in generation expansion planning problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1936-1948.

[29] GONZATO S, BRUNINX K, DELARUE E. Long term storage in generation expansion planning models with a reduced temporal scope[J]. Applied Energy, 2021, 298:117168.

[30] 刘泽洪, 马志远, 陈星, 侯方心, 胡东滨. 考虑长期气候变化和极端天气影响的新型电力系统充裕性评估研究[J]. 新型电力系统, 2024, 2 (4): 434-444.
LIU Zehong, MA Zhiyuan, CHEN Xing, et al. Study on the adequacy assessment of the new power system considering long-term climate change and extreme weather effects[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(4): 434-444.

[31] 卢操. 含高比例可再生能源电力系统的电源规划模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
LU Cao. Research on generation planning model of power systems with high proportion renewable energy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

附 录

附录A：32台机组可靠性参数表

Unit Group	Unit Size(MW)	Unit Type	Forced OutageRate	MTTF(Hour)	MTTR(Hour)	Scheduled MaintenanceWeeks per year
U12	12	Oil/Steam	0.02	2940	60	2
U20	20	Oil/CT	0.10	450	50	2
U50	50	Hydro	0.01	1980	20	2
U76	76	Coal/Steam	0.02	1960	40	3
U100	100	Oil/Steam	0.04	1200	50	3
U155	155	Coal/Steam	0.04	960	40	4
U197	197	Oil/Steam	0.05	950	50	4
U350	350	Coal/Steam	0.08	1150	100	5
U400	400	Nuclear	0.12	1100	150	6

附录B：基准场景下常规发电机组台数配置方案表B列出了IEEE RTS-96标准系统中全部9类32台常规机组，基准场景下，退役2台U100和1台U155，总装机降至3050 MW。

机组类型	单机容量 (MW)	原始台数（台）	基准场景台数（台）	说明
U12 (Oil/Steam)	12	5	5	/
U20 (Oil/CT)	20	4	4	/
U50 (Hydro)	50	6	6	零碳、快速响应、调峰
U76 (Coal/Steam)	76	4	4	/
U100 (Oil/Steam)	100	3	1	应急战略备用
U155 (Coal/Steam)	155	4	3	经CCS改造后可清洁利用，提供系统惯性和灵活性
U197 (Oil/Steam)	197	3	3	/
U350 (Coal/Steam)	350	1	1	大容量高效基荷
U400 (Nuclear)	400	2	2	碳基荷，极端条件下的安全兜底
合计	—	32	30	/
总装机容量 (MW)	—	3405	3050	/

附录C：式(11)的推导本推导在以下条件下建立式(11)的定量关系：

n 功率约束不显著：储能额定功率P_{rated}足以覆盖绝大多数缺电事件的瞬时功率缺额,覆盖能力主要受能量容量$E = P_{\text{rated}} \cdot T$约束。

n 连续近似：将离散时长步长ΔT视为连续微元dT。

记事件e的持续时间为L_e,总缺电量为$Q_e = \bar{p}_e L_e$,其中$\bar{p}_e$为该事件的平均缺电功率。

步骤1：储能的单事件覆盖量

忽略充放电效率损耗（系数可并入常数项），储能在事件e中的最大覆盖量为：

$$C_e(T) \approx \min(Q_e, P_{\text{rated}} \cdot T) = \min(\bar{p}_e L_e, P_{\text{rated}} T)$$

步骤2：延长时长dT的边际覆盖增量

将放电时长从T延长至$T + dT$，考察全年所有缺电事件：

n 若$L_e \leqslant T$：事件在原时长下已被完全覆盖，$dC_e = 0$；

n 若$L_e > T$：储能能量始终不足，延长的dT可额外覆盖$\bar{p}_e \cdot dT$的电量。

因此，全系统总覆盖量的增量（即储能减少的年缺电量增量）为：

$$dC_{\text{total}}(T) = \sum_{e:L_e > T} \bar{p}_e \cdot dT$$

设全年事件总数为N,事件持续时间服从概率密度$f(L)$，则上式写为积分形式：

$$\frac{dC_{\text{total}}}{dT} = N \cdot \int_T^{\infty} \bar{p}(L) f(L)\, dL$$

其中$\bar{p}(L)$为持续时长恰好为L的事件的平均缺电功率。

步骤3：从覆盖量到容量信用边际增益

根据ELCC的等可靠性准则，储能的容量信用$\kappa(T)$与其覆盖的总缺电量近似成正比(比例系数由系统边际可靠性决定,设为常数α)：

$$\kappa(T) = \frac{ELCC(T)}{P_{\text{rated}}} = \frac{\alpha \cdot C_{\text{total}}(T)}{P_{\text{rated}}}$$

对T求导，并将步骤2的结果代入：

$$\frac{d\kappa}{dT} = \frac{\alpha N}{P_{\text{rated}}} \cdot \int_T^{\infty} \bar{p}(L) f(L)\, dL$$

步骤4：引入右尾概率与条件期望

将积分项改写为右尾概率与条件期望的乘积：

$$\int_T^{\infty} \bar{p}(L) f(L)\, dL = [1 - F(T)] \cdot \mathbb{E}[\bar{p}_e \mid L_e > T]$$

其中$F(T)$为事件持续时间的累积分布函数,$1 - F(T)$即右尾概

率。

令常数项 $\beta = \frac{\alpha N}{P_{\text{rated}}}$，即得到正文式(11)：

$$\frac{dK}{dT} \approx \beta \cdot [1 - F(T)] \cdot \mathbb{E}[\bar{p}_e \mid L_e > T]$$

附录D

表D1　最小出力约束对可靠性指标的影响

条件	弃风弃光小时占比	M符号变化小时数	Weibull k	$LOLE_0$ (h/年)	T_{sat} (h)	κ_{sat} (%)
不含最小出力约束	26.2%	0	1.664	22.94	16	82.12
含最小出力约束	61.8%	0	1.664	22.94	16	82.12

注：弃风弃光小时占比指全年因机组最小出力限制而被迫减少新能源消纳的小时数占比。

表D2　机组类型最小出力系数 r_i

机组类型	r_i
Oil/Steam（U12、U100、U197）	0.30
Oil/CT（U20）	0.20
Hydro（U50）	0
Coal/Steam（U76、U155、U350）	0.40
Nuclear（U400）	0.50