

# 面向配电网分布式光伏消纳和可靠性 提高的构网型储能优化配置

胥德玉<sup>1</sup>, 黄媛<sup>1</sup>, 唐志远<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 孙增杰<sup>2</sup>, 郝志方<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 成都市 610065; 2. 国网河北省电力有限公司, 石家庄市 050000;  
3. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄市 050081)

**摘要:**【目的】高比例分布式光伏并网导致配电网的消纳能力不足,同时新型配电系统的建设对可靠性提出了更高要求。构网型储能凭借灵活的功率同步控制能力,兼具促进新型配电网分布式光伏消纳和可靠性提升的能力。文章提出了一种考虑配电网分布式光伏消纳和可靠性提高的构网型储能优化配置模型。【方法】首先,建立了构网型储能选址定容双层优化模型,上层模型考虑故障状态和负荷重要性,建立了提高配电网可靠性的储能选址模型;下层模型考虑分布式光伏的不确定性,建立了提升分布式光伏消纳能力的储能定容模型;其中,光伏不确定性的概率分布置信集合由1-范数和 $\infty$ -范数约束,基于分布鲁棒优化方法,采用列与约束生成(column and constraint generation, CCG)算法进行求解。其次,建立了考虑可靠性与分布式光伏消纳和经济性的综合指标体系,采用改进的优劣解距离法求得最优配置方案。最后,以改进的33节点算例系统为例验证所提算法的合理性。【结果】结果表明,相较于传统储能方案,所提模型的可靠性指标提高超过10%,分布式光伏弃光率减小了7.44%,在4个关键节点配置构网型储能可获得最优效果。【结论】所提构网型储能优化配置方法显著提高了配电网的分布式光伏消纳能力和可靠性,为高比例分布式光伏接入配电网的规划投资提供参考。

**关键词:**配电网;构网型储能;可靠性;分布式光伏;分布鲁棒优化

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)01-0001-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.001

## Research on Grid-Forming Energy Storage Configuration for Distributed Photovoltaic Consumption and Reliability Improvement of Distribution Network

XU Deyu<sup>1</sup>, HUANG Yuan<sup>1</sup>, TANG Zhiyuan<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, SUN Zengjie<sup>2</sup>, HAO Zhifang<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Shijiazhuang 050081, China)

**ABSTRACT:** [Objective] High-penetration distributed photovoltaic (PV) grid integration leads to insufficient power absorption capacity in distribution networks. Meanwhile, the development of new distribution systems imposes higher reliability requirements. Grid-forming energy storage, with its flexible power synchronization control capabilities, possesses the ability to both promote distributed PV consumption and enhance reliability in new distribution networks. This paper proposes an optimal configuration model for grid-forming energy storage that considers both distributed PV consumption and reliability improvement in distribution networks. [Methods] First, a bi-level optimization model for the siting and sizing of grid-forming energy storage is established. The upper-level model considers fault conditions and load importance to establish an energy storage siting model for improving distribution network reliability. The lower-level model considers the uncertainty of distributed PV systems to establish an energy storage sizing model for enhancing PV consumption. Specifically, the confidence set for the probability distribution of PV uncertainty is constrained by 1-norm and  $\infty$ -norm constraints, and is solved using the column and constraint generation (CCG) algorithm based on the distributionally robust optimization. Second, a comprehensive evaluation index system incorporating reliability, distributed PV consumption, and economic

performance is established. The optimal configuration scheme is obtained using an improved Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method. **[Results]** The proposed algorithm is validated through a modified 33-node test system. The results show that compared with traditional energy storage schemes, the proposed model improves the reliability index by more than 10%, and reduces the distributed PV curtailment rate by 7.44%. The optimal effect is achieved by configuring grid-forming energy storage at four key nodes. **[Conclusions]** The proposed grid-forming energy storage optimization configuration method significantly improves the distributed photovoltaic capacity and reliability of distribution network, providing reference for planning and investment in distribution networks with high-penetration distributed PV integration.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207127).

**KEYWORDS:** distribution network; grid-forming energy storage; reliability; distributed photovoltaic; distributionally robust optimization

## 0 引言

“双碳”背景下,分布式光伏因低碳排放等优势大规模接入配电网。然而,由于光伏发电的间歇性和负荷需求的时序不匹配性,导致配电网的光伏消纳能力不足。此外分布式光伏发电量受天气影响较大,其发电的随机性导致在光伏大发时引起节点电压越限<sup>[1-3]</sup>,产生的电流谐波也易诱发设备故障、保护误动等问题<sup>[4-5]</sup>,影响配电网的电能质量和可靠性。因此,如何充分消纳分布式光伏资源,并有效提高配电网运行可靠性成为近年来的研究热点。

储能是一种有效提升新型配电网分布式光伏消纳能力的重要措施,文献[6]针对分布式光伏接入配电网后的电压波动和越限问题,提出一种促进光伏消纳、改善电压质量的储能优化配置模型。文献[7]进一步考虑线路联络状态,结合动态重构建立了计及经济性和促进光伏消纳的多目标储能规划模型,但未涉及储能选址定容。文献[8]在高比例光伏接入场景下,采用Cholesky分解法提取光伏和负荷时间相关性信息,提出一种计及光伏消纳的光储联合优化配置方法。文献[9-10]针对分布式光伏出力的波动性和不确定性,基于Jensen-Shannon散度距离构建其出力模糊集合,采用分布鲁棒优化求解方法,建立了提升光伏消纳的储能配置模型。上述研究均未考虑储能配置对配网运行可靠性的影响。

储能可以作为备用电源,在配电网故障时提高其可靠性<sup>[11]</sup>。文献[12-13]采用蒙特卡罗法计算出储能配置后的系统平均停电次数、时间、供电缺额等可靠性指标,但蒙特卡罗法计算效率较低。文献[14]建立了储能单点和多点接入配电网的两阶段供电可靠性模型,但模型中基于可靠性的非线性目标导致求解困难、精度不高。文献[15-16]考虑储能经济效益和负荷重要性,建立故障状态下的多时段动态孤岛划分模型,通过提升负荷功率的恢复率提高

配电网可靠性。上述研究均未考虑储能促进分布式光伏消纳的同时可以提高配电网可靠性。

传统储能控制依赖电网实际电压及频率,充放电响应较慢、主动调节能力不足<sup>[17]</sup>,难以实时跟踪光伏出力的快速波动,并且在配电网故障时难以维持电压稳定与无功平衡。随着并网变流器技术的突破,构网型储能(grid-forming energy storage, GES),采用电压源型换流器<sup>[18]</sup>,兼具主动功率控制、能量储存、电压支撑等功能<sup>[19-21]</sup>,能进一步提升新能源消纳能力和配电网的可靠性。文献[22-23]指出GES具有较强的调峰、调频能力,在提高电能质量的同时,能够进一步促进可再生能源消纳。文献[24-26]提出系统故障时,GES凭借灵活的功率调控能力,能够有效缓解偏远地区供电缺口增大、孤岛等可靠性不足问题。然而,现有研究集中在其机理分析和并网控制方面,针对配电网场景下GES提升分布式光伏消纳能力和可靠性的规划配置与运行优化研究较少。

分布式光伏消纳和配电网可靠性提升效果与储能配置的容量和位置密切相关:配电网故障后,储能的选址将直接决定孤岛负荷是否能恢复供电。分布式光伏并网后,储能的容量决定存储和释放光伏发电量的大小,是减少弃光量的主要因素。因此,本文基于GES灵活的有功、无功功率同步调节能力,综合考虑GES选址对可靠性和GES容量对分布式光伏消纳能力提升的影响,建立了GES的优化配置模型。首先,考虑配电网故障状态和光伏的不确定性,建立了GES选址定容双层优化模型。上层模型中,通过概率比例抽样(probability proportional to size, PPS)生成配电网故障状态,根据负荷的重要性,以负荷恢复量最大为目标建立GES选址模型。下层模型中,采用拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling, LHS)和K-means算法聚类得到分布式光伏出力典型场景,场景分布的概率置信区间由1-范数和 $\infty$ -范数约束,然后建立分布式光伏消纳量最大和经济性最优的

GES容量配置分布鲁棒模型,并采用列与约束生成(column and constraint generation, CCG)算法求解。其次,基于GES优化配置结果,采用解析法对配电网可靠性指标快速评估,建立计及可靠性和分布式光伏消纳及经济性等多维度指标体系,采用改进的优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对所有场景下的GES配置方案评分。最后,通过改进的33节点配电网算例验证所提GES配置方法对配电网分布式光伏消纳能力和可靠性提升的有效性。

## 1 提升分布式光伏消纳和可靠性的构网型储能选址定容双层优化模型

GES选址定容的双层优化模型如图1所示。上层模型以最大化故障时的负荷恢复量为目标,确定GES选址;下层模型以分布式光伏消纳和配置成本为目标,确定GES的配置容量。双层模型之间相互迭代,上层为下层提供GES地址和容量下限,储能容量下限保障了配电网故障后GES持续为孤岛供电的能力。下层为上层提供GES配置的最优总容量,实现GES对可靠性和分布式光伏消纳能力的提升。

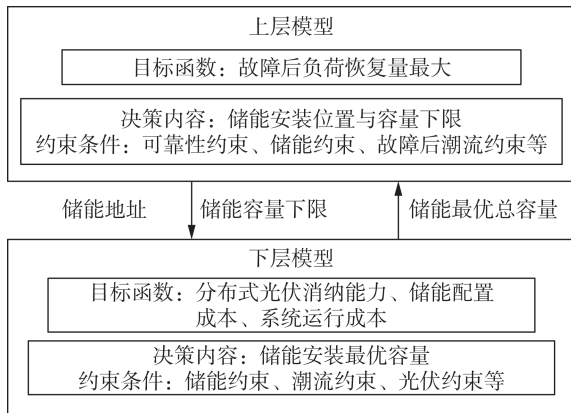


图1 GES选址定容双层优化模型

Fig. 1 GES siting and capacity-setting two-tier optimisation model

### 1.1 上层构网型储能选址模型

配电网线路故障概率可以根据历史数据统计得到,对于不同的故障场景,GES的选址不同。本文采用概率比例抽样,根据历史故障概率抽取配电网所有线路工作状态,生成 $N_f$ 个故障场景,根据概率故障场景确定GES地址。

#### 1.1.1 上层模型目标

考虑故障后负荷重要程度,尽可能将负荷功率恢复到临界水平,提高配电网供电可靠性。因此,上层储能选址模型以故障后配电网各孤岛区域负荷恢

复量最大为目标,目标函数如式(1)所示:

$$f_1 = \max \sum_{t \in \Omega_{f(t)}} \sum_{i \in \Omega_{f(i)}} \omega_i P_{i,t}^{\text{load}} \quad (1)$$

式中: $\Omega_{f(t)}$ 和 $\Omega_{f(i)}$ 表示所有时段以及所有孤岛节点的集合; $\omega_i$ 表示节点 $i$ 负荷的重要系数,本文对I、II和III类负荷的重要系数分别取3、2和1; $P_{i,t}^{\text{load}}$ 表示节点 $i$ 在时段 $t$ 的负荷。

#### 1.1.2 上层约束条件

##### 1) 故障后孤岛负荷供电可靠性约束。

考虑优先为重要负荷区的无源孤岛配置储能,如式(2)所示:

$$\sum_{k \in \Omega^k} Z_k^{\text{ESS}} \geq 1 \quad (2)$$

式中: $Z_k^{\text{ESS}}$ 表示储能安装与否的0、1二维变量; $\Omega^k$ 表示无电源孤岛的节点集合,集合内节点按负荷重要程度排序,可靠性约束保证了故障后无电源的孤岛至少有一处储能可以供电。

##### 2) 连通区域的潮流约束。

$$\sum_{k \in \Omega_{a(i)}} (P_{ki,t} - R_{ki} \tilde{I}_{ij,t}) - \sum_{j \in \Omega_{b(i)}} P_{ij,t} + P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{dis}} - P_{i,t}^{\text{ch}} = P_{i,t}^{\text{load}} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \Omega_{a(i)}} (Q_{ki,t} - X_{ki} \tilde{I}_{ij,t}) - \sum_{j \in \Omega_{b(i)}} Q_{ij,t} + Q_{i,t}^{\text{PV}} + Q_{i,t}^{\text{dis}} - Q_{i,t}^{\text{ch}} = Q_{i,t}^{\text{load}} \quad (4)$$

$$\tilde{U}_{i+1,t} = \tilde{U}_{i,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \tilde{I}_{ij,t} \quad (5)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{U}_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{U}_{i,t} \quad (6)$$

式中: $\Omega_{a(i)}$ 表示以节点 $i$ 为末端节点的线路其首端节点的集合; $\Omega_{b(i)}$ 表示以节点 $i$ 为首端节点的线路其末端节点的集合; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 表示在 $t$ 时刻线路 $ij$ 上流过的有功和无功功率; $R_{ki}$ 、 $R_{ij}$ 、 $X_{ki}$ 、 $X_{ij}$ 分别表示线路 $ki$ 和线路 $ij$ 的电阻和电抗; $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{PV}}$ 表示 $t$ 时刻节点 $i$ 上注入的光伏有功和无功功率; $Q_{i,t}^{\text{load}}$ 表示 $t$ 时刻节点 $i$ 上负荷的无功功率; $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{dis}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{ch}}$ 分别表示 $t$ 时刻GES的放电有功、充电有功、放电无功和充电无功功率; $\tilde{U}_{i,t}$ 和 $\tilde{I}_{ij,t}$ 表示 $t$ 时刻节点 $i$ 的电压的平方和线路 $ij$ 上流过的电流的平方。式(3)和式(4)为节点的有功和无功功率平衡约束,式(5)为线路的电压降落约束,式(6)为二阶锥线路功率约束。

##### 3) 孤岛的潮流约束。

孤岛的潮流约束包括式(3)、(4)和(6),此外对于故障后断开的线路,采用大 $M$ 法表征模拟运行中线路的开断状态和压降,如式(7)~(9)所示:

$$-M \cdot a_{ij,t} \leq P_{ij,t} \leq M \cdot a_{ij,t} \quad (7)$$

$$-M \cdot a_{ij,t} \leq Q_{ij,t} \leq M \cdot a_{ij,t} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{U}_{i+1,t} \geq -M(1 - a_{ij,t}) + \tilde{U}_{i,t} - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + \\ (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)\tilde{I}_{ij,t} \\ \tilde{U}_{i+1,t} \leq M(1 - a_{ij,t}) + \tilde{U}_{i,t} - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + \\ (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)\tilde{I}_{ij,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $M$ 为比较大的一个常数； $a_{ij,t}$ 表示线路开断的0、1二维变量， $a_{ij,t}=1$ 则线路连通，否则断开。

4)电压偏差约束。

$$U_N(1 - \varepsilon_1) \leq U_{i,t} \leq U_N(1 - \varepsilon_2) \quad (10)$$

式中： $U_N$ 为标称电压； $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 分别代表国标允许的电压偏差率的上下限。

5)线路电流约束。

$$I_{ij,t} \leq a_{ij,t} \cdot I_{ij,t,\max} \quad (11)$$

式中： $I_{ij,t}$ 为线路 $ij$ 上 $t$ 时刻流过的电流； $I_{ij,\max}$ 为线路 $ij$ 上能够承载的电流最大值； $a_{ij,t}I_{ij,\max}$ 表示此约束只对连通支路有效。

6)构网型储能约束。

GES能灵活控制有功和无功功率的输出，在配电网故障时，为负荷和电压支撑提供无功需求<sup>[21]</sup>，如式(12)、(13)所示：

$$P_{i,t}^{\text{dis}} = \frac{EU_{i,t}}{X_f} \sin \delta_{i,t} \quad (12)$$

$$Q_{i,t}^{\text{dis}} = \frac{E^2}{X_f} - \frac{EU_{i,t}}{X_f} \cos \delta_{i,t} \quad (13)$$

式中： $E$ 为输出电压有效值； $U_{i,t}$ 为节点电压有效值； $\delta_{i,t}$ 为功角； $X_f$ 表示滤波电抗。储能的运行约束<sup>[27]</sup>如式(14)–(19)所示：

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq U_{i,t}^{\text{dis}} P_{i,\max}^{\text{dis}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq U_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,\max}^{\text{ch}} \quad (15)$$

$$U_{i,t}^{\text{dis}} + U_{i,t}^{\text{ch}} \leq Z_i^{\text{ESS}} \quad (16)$$

$$\eta_i^{\text{ch}} \sum_{t=1}^{N_T} (P_{i,t}^{\text{ch}} \Delta t) - \frac{1}{\eta_i^{\text{dis}}} \sum_{t=1}^{N_T} (P_{i,t}^{\text{dis}} \Delta t) = 0 \quad (17)$$

$$\begin{cases} E_{i,0} + \eta_i^{\text{ch}} \sum_{t'=1}^t (P_{i,t'}^{\text{ch}} \Delta t) - \frac{1}{\eta_i^{\text{dis}}} \sum_{t'=1}^t (P_{i,t'}^{\text{dis}} \Delta t) \geq E_{i,\min} \\ E_{i,0} + \eta_i^{\text{ch}} \sum_{t'=1}^t (P_{i,t'}^{\text{ch}} \Delta t) - \frac{1}{\eta_i^{\text{dis}}} \sum_{t'=1}^t (P_{i,t'}^{\text{dis}} \Delta t) \leq E_{i,\max} \end{cases} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^N Z_i^{\text{ESS}} = n^{\text{ESS}} \quad (19)$$

式中： $P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 和 $P_{i,\max}^{\text{ch}}$ 分别表示节点 $i$ 上储能的最大放电和充电功率； $U_{i,t}^{\text{dis}}$ 和 $U_{i,t}^{\text{ch}}$ 表示节点 $i$ 上储能 $t$ 时刻的放电和充电状态，取值为1时分别表示放电和充电； $N^T$ 表示时间尺度，取值为24； $E_{i,\min}$ 和 $E_{i,\max}$ 表示节点 $i$ 储能的最小和最大荷电状态； $E_{i,0}$ 表示节点 $i$ 上储能的初始荷电状态； $\eta_i^{\text{dis}}$ 和 $\eta_i^{\text{ch}}$ 表示节点 $i$ 上储能的放电和充电效率； $n^{\text{ESS}}$ 表示储能安装的总节点数； $N$ 表示配电网

节点总数。约束式(19)表示配电网所有节点安装的储能总数和规划数量一致。

7)光伏逆变器可调范围约束。

$$\begin{aligned} P_{i,t}^{\text{PV}} \tan(\cos^{-1}(\delta_{i,\max}^{\text{PV}})) \leq Q_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \tan(\cos^{-1}(\delta_{i,\min}^{\text{PV}})) \quad (20) \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_i^{\text{cap}} \beta_t \quad (21) \end{aligned}$$

式中： $\delta_{i,\max}^{\text{PV}}$ 和 $\delta_{i,\min}^{\text{PV}}$ 为第 $i$ 个光伏逆变器功率因数的最大值和最小值； $P_i^{\text{cap}}$ 为第 $i$ 个节点上光伏安装容量； $\beta_t$ 为 $t$ 时段的光伏出力比例。

8)变压器节点功率约束。

在日照不足等恶劣情况下，需要向上级网络购电以满足自身的负荷需求，如式(22)和(23)所示：

$$P_{\min}^{\text{GSP}} \leq P_t^{\text{GSP}} \leq P_{\max}^{\text{GSP}} \quad (22)$$

$$Q_{\min}^{\text{GSP}} \leq Q_t^{\text{GSP}} \leq Q_{\max}^{\text{GSP}} \quad (23)$$

式中： $P_{\min}^{\text{GSP}}$ 、 $Q_{\min}^{\text{GSP}}$ 、 $P_{\max}^{\text{GSP}}$ 和 $Q_{\max}^{\text{GSP}}$ 分别是变压器节点所能输送的最小有功和无功功率以及最大有功和无功功率； $P_t^{\text{GSP}}$ 和 $Q_t^{\text{GSP}}$ 表示 $t$ 时刻变压器节点输入的有功和无功功率。

## 1.2 下层构网型储能定容模型

### 1.2.1 下层模型目标

下层模型主要考虑分布式光伏消纳能力和系统运行的经济性<sup>[28-29]</sup>，其中分布式光伏消纳能力以弃光成本表示，目标函数如式(24)所示：

$$f_2 = \min(F_{\text{cut}}^{\text{PV}} + F_{\text{ope}}) \quad (24)$$

$$F_{\text{cut}}^{\text{PV}} = C_{\text{cut}} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{N_T} (P_i^{\text{cap}} \beta_t - P_{i,t}^{\text{PV}}) \quad (25)$$

$$F_{\text{ope}} = F_{\text{Sub}} + F_{\text{Loss}} + F_{\text{ESS}} \quad (26)$$

$$F_{\text{Sub}} = \sum_{t=1}^{N_T} C_{\text{Sub}} P_t^{\text{GSP}} \quad (27)$$

$$F_{\text{Loss}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij \in \Omega^t} C_{\text{Loss}} I_{ij,t}^2 R_{ij} \quad (28)$$

$$\begin{cases} F_{\text{ESS}} = \lambda_{\text{ESS}} \sum_{i=1}^N C_{\text{ESS}} E_i^{\text{ESS}} \\ \lambda_{\text{ESS}} = \frac{k(1+k)^y}{(1+k)^y - 1} \end{cases} \quad (29)$$

式中： $F_{\text{cut}}^{\text{PV}}$ 表示配电网的弃光成本； $F_{\text{ope}}$ 为储能的配置成本以及配置后配电网的购电成本和网损成本； $F_{\text{Sub}}$ 为配电网从上级变压器的购电成本； $F_{\text{Loss}}$ 为配电网运行的网损成本； $F_{\text{ESS}}$ 为储能配置成本； $C_{\text{Sub}}$ 、 $C_{\text{Loss}}$ 和 $C_{\text{ESS}}$ 表示单位购电功率、单位网损功率和单位储能装置容量的成本； $E_i^{\text{ESS}}$ 为节点 $i$ 处储能安装容量； $\lambda_{\text{ESS}}$ 为储能的折现系数； $k$ 为折现率； $y$ 为储能的寿命周期； $\Omega^t$ 表示配电网线路集合。

### 1.2.2 下层约束条件

下层约束条件包括上层潮流约束式(3)–(6)、节点电压和线路电流约束式(10)–(11)、储

能运行约束式(14)–(18)、光伏逆变器可调范围约束式(20)–(21)以及变压器节点功率约束式(22)–(23)。

此外,下层抉择储能的安装容量应大于上层传递的最小容量,保证停电后能维持供电的可靠性,如式(30)所示:

$$E_{i,\max} \geq E_{i,\text{cap}} \quad (30)$$

式中: $E_{i,\text{cap}}$ 表示节点*i*上配置的储能容量下限。

### 1.2.3 下层模型分布鲁棒优化方法

考虑天气等因素对分布式光伏消纳和GES容量的影响,利用LHS和场景聚类得到分布式光伏出力的典型场景,通过鲁棒优化可以限制和调整场景的概率分布。首先,利用LHS得到 $N_L$ 个原始场景数,采用K-means算法聚类得到 $N_S$ 个典型场景及场景的概率分布 $p_s$ ;基于分布鲁棒优化原理,采用基于1范数和无穷范数的置信区间约束概率分布波动范围<sup>[30]</sup>,分布鲁棒模型如式(31)–(32)所示:

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \max_{\{p_s\} \in \psi} \sum_{s=1}^{N_S} p_s \min_{\mathbf{y}} \mathbf{b}^T \mathbf{y}_s \quad (31)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} \geq \mathbf{f} \\ \mathbf{B}\mathbf{y} \geq \mathbf{e} \\ \mathbf{C}\mathbf{y} + \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{K} = \mathbf{0} \\ \|\mathbf{G}_i \mathbf{y}\|_2 \geq \mathbf{g}_i^T \mathbf{y} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ 表示弃光成本; $\mathbf{b}^T \mathbf{y}$ 表示系统运行成本; $\psi$ 为场景的概率分布集合,是由1范数和无穷范数约束的置信集合。式(32)第一行表示约束式(14)–(16)、(20)–(21);第二行表示约束式(10)–(11)、(18)、(22)–(23);第三行表示约束式(3)–(5)、(17);第四行为二阶锥潮流松弛约束式(6)。概率分布 $p$ 的置信度表示为式(33)和(34):

$$\Pr(\|p - p_0\|_1 \leq \theta_1) \geq 1 - 2N_S \exp\left(-\frac{2N_L \theta_1}{N_S}\right) \quad (33)$$

$$\Pr(\|p - p_0\|_\infty \leq \theta_\infty) \geq 1 - 2N_S \exp(-2N_L \theta_\infty) \quad (34)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 为概率函数; $p_0$ 为概率分布的预测值; $\theta_1$ 和 $\theta_\infty$ 为概率分布的允许偏差值。由上述公式可推导出概率分布的置信集合为:

$$\psi = \left\{ \{p_s\} \in \mathbf{R}_+^{N_S} \mid \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_S} p_s = 1 \\ \sum_{s=1}^{N_S} |p_s - p_{s0}| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq s \leq N_S} |p_s - p_{s0}| \leq \theta_\infty \end{cases} \right. \quad (35)$$

式中: $\mathbf{R}_+^{N_S}$ 为场景*s*概率分布的正实数集合; $\theta_1$ 和 $\theta_\infty$ 由1范数 $a_1$ 和无穷范数 $a_\infty$ 确定,如式(36)和(37)所示:

$$\theta_1 = \frac{N_S}{2N_L} \ln \frac{2N_S}{1 - a_1} \quad (36)$$

$$\theta_\infty = \frac{1}{2N_L} \ln \frac{2N_L}{1 - a_\infty} \quad (37)$$

## 1.3 模型求解

### 1.3.1 上层模型求解

上层模型为混合整数二阶锥规划模型,可用商业求解器Cplex直接求解。

### 1.3.2 下层模型求解

下层的分布鲁棒优化模型可采用CCG算法求解<sup>[31]</sup>,将其原问题分解为主问题(master problem, MP)和子问题(subproblem, SP)迭代求解。主问题是在已知场景概率分布 $p_s$ 的前提下,寻找分布式光伏弃光最小的最优解。子问题则寻找置信区间内的最恶劣场景下的概率分布和系统最小运行成本。

主问题可等效为式(38)–(39):

$$\min_{\mathbf{x}} (\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \eta) \quad (38)$$

$$\eta \geq \sum_{s=1}^{N_S} p_s^{(k)*} (\mathbf{b}^T \mathbf{y}_s^{(k)*}) \quad (39)$$

式中:上标\*表示对应变量的最优解; $\eta$ 为引入的连续辅助变量; $k$ 为迭代次数。式(39)是CCG算法里SP向MP添加的割集。通过求解主问题得到模型的下界 $L_B$ 。

子问题是max-min的双层结构,模型各层约束独立不相关,故分为两步求解,先求内层最小值,再求解外层最大值,得到模型的上界值 $U_B$ ,如式(40)所示:

$$\begin{cases} h_s = \min_{\mathbf{y}} \mathbf{b}^T \mathbf{y}_s \\ f = \max_{\{p_s\} \in \psi} \sum_{s=1}^{N_S} p_s h_s \end{cases} \quad (40)$$

求解SP得到 $p_s$ ,代入MP生成新的约束式(39),用于逼近最优解,进行下一次迭代优化。

由于式(35)中的绝对值约束为非线性约束,引入0-1变量 $\sigma_s$ 进行线性化,如式(41)所示:

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^{N_S} (p_s^+ + p_s^-) \leq \theta_1 \\ p_s^+ + p_s^- \leq \theta_\infty \\ \sigma_s^+ + \sigma_s^- \leq 1 \\ 0 \leq p_s^+ \leq \sigma_s^+ \theta_1 \\ 0 \leq p_s^- \leq \sigma_s^- \theta_1 \\ p_s = p_{s0} + p_s^+ - p_s^- \end{cases} \quad (41)$$

式中: $p_s^+$ 、 $p_s^-$ 分别为场景*s*的概率分布 $p_s$ 相对于 $p_{s0}$ 的正偏移量与负偏移量; $\sigma_s^+$ 、 $\sigma_s^-$ 分别为 $p_s^+$ 和 $p_s^-$ 是否取值的0-1标志变量。

经过上述步骤,模型式(31)–(32)被转化为混合整数线性规划问题,MP和SP均可用商业求解器Cplex快速求解。

## 2 计及可靠性和分布式光伏消纳能力与经济性的构网型储能评估方法

不同故障场景得到的 GES 配置方案不同,因此需要综合评定各方案可靠性、分布式光伏消纳能力以及经济性,从而确定最佳储能配置方案。

### 2.1 含分布式光伏和构网型储能的配电网可靠性评估

#### 2.1.1 分布式光伏和构网型储能对配电网可靠性影响机理

分布式光伏和储能可为孤岛内的负荷恢复供电,减少系统停电时间,在一定程度上提高配电网的供电可靠性。然而分布式光伏出力具有不确定性,对孤岛运行区域的供电质量、供电时间和范围都带有强烈的随机性<sup>[32]</sup>。配电网增设储能装置后,分布式电源供电半径增加,但由于故障发生具有随机性,若故障时储能荷电状态低、自身故障等都将难以支撑孤岛负荷恢复供电,而储能的充放电功率决定了所能维持的孤岛范围<sup>[33]</sup>。

GES 通过虚拟同步机控制等方式<sup>[19]</sup>调节内电势  $E$  和相角  $\delta_{iu}$  来调节储能输出的有功和无功功率,从而更加灵活地调节供电范围,并为负荷提供电压和功率支撑,从而提升可靠性,如图 2 所示。

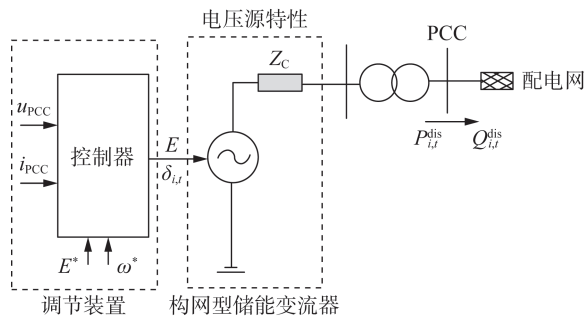


图 2 构网型储能调节示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid-type energy storage regulation

图 2 中, PCC 为公共耦合点,  $E^*$  和  $\omega^*$  表示变流器电压和频率参考值。

#### 2.1.2 考虑分布式光伏和储能供电不确定性的可靠性评估方法

由于故障时间、状态与天气等具有随机性,分布式光伏和储能的供电具有不确定性,因此采用四状态的马尔可夫状态转移模型<sup>[34-35]</sup>描述分布式光伏和 GES 的随机出力;为保证求解结果的精确性,采用基于最小路径的解析法通过列举分析所有的系统故障状态来计算可靠性指标,步骤如下:

1) 建立分布式光伏和 GES 的马尔可夫状态转移

概率模型,如图 3 所示。分布式光伏和储能包含全额发电  $S_1$ 、降额运行  $S_2$  和  $S_3$  以及停运  $S_4$  四个状态,各状态间的转移概率表征出力的随机性和波动性,通过马尔可夫状态转移法求出各容量状态概率。其中  $a_{ij}$  表示状态  $i$  向状态  $j$  转移的概率。

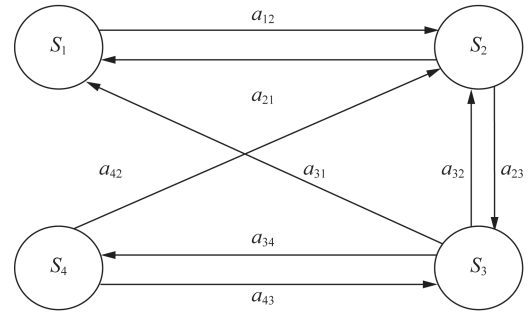


图 3 马尔可夫状态转移模型

Fig. 3 Markov state transfer model

2) 求负荷  $l$  到主电源节点的最短路径,判断元件故障对负荷  $l$  的影响。采用 Dijkstra 算法求出负荷节点  $l$  到主电源节点的最短路径,并确定路径中包含的元件。根据负荷  $l$  是否在分布式光伏或 GES 的供电范围等求解负荷  $l$  的停电频率、时间等可靠性参数。

3) 计算可靠性指标。

本文主要从系统平均停电频率指标 (system average interruption frequency index, SAIFI)、系统平均停电时间 (system average interruption duration index, SAIDI) 以及系统的供电可靠率 (average service availability index, ASAI) 三个指标来反映含分布式电源的配电网供电可靠性<sup>[36-37]</sup>,如式 (42)~(44) 所示:

$$I_{SAIF} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (42)$$

$$I_{SAID} = \frac{\sum t_i N_i}{\lambda_i N_i} \quad (43)$$

$$I_{ASA} = \frac{1 - I_{SAID}}{8760} \quad (44)$$

式中:  $\lambda_i$  表示线路故障率;  $N_i$  表示节点  $i$  用户数;  $t_i$  表示节点  $i$  平均停电时间。

### 2.2 基于改进优劣解距离法的构网型储能方案求解

上述步骤可以得出 GES 配置方案的可靠性、分布式光伏消纳率以及经济性等指标。但考虑到不同指标在物理意义、量纲上区别较大,因此采用改进的 TOPSIS 进行综合评估<sup>[38]</sup>,得出最佳 GES 配置方案。

为解决传统 TOPSIS 在新增评价对象时的逆序问题,引入绝对理想解。评价方法如下:

1)数据正向化处理与标准化处理。

评估指标的量纲不同,物理含义不同,为了消除不同量纲的影响,对数据进行正向化和标准化处理,评估指标如表 1 所示。

表 1 评估指标  
Table 1 Assessment indicators

指标	类型
SAIFI/[次/(年·户)]	可靠性指标,极小型
SAIDI/[h/(年·户)]	可靠性指标,极小型
ASAI/%	可靠性指标,极大型
分布式光伏消纳率/%	极大型
储能投资成本/万元	经济性指标,极小型

分布式光伏消纳率计算如式(45)所示:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{N_T} P_{i,t}^{PV}}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{N_T} P_i^{cap} \beta_t} \times 100\% \quad (45)$$

2)确定绝对理想解和绝对负理想解。

绝对理想解和负理想解可由评价者自己或有关专家根据经验确定,如式(46)、(47)所示:

$$V^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_m^+\} \quad (46)$$

$$V^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_m^-\} \quad (47)$$

式中: $v_j^+$ 和 $v_j^-$ 分别为第 $j$ 个指标的绝对理想解和绝对负理想解; $m$ 为指标个数。

3)TOPSIS评分计算。

各方案指标集与最优指标集及最劣指标集的欧氏距离计算如式(48)和式(49)所示:

$$D_{i,max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{i,j} - v_j^+)^2} \quad (48)$$

$$D_{i,min} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{i,j} - v_j^-)^2} \quad (49)$$

式中: $v_{i,j}$ 为方案 $i$ 的第 $j$ 个指标值; $D_{i,max}$ 和 $D_{i,min}$ 为方案 $i$ 指标集与最优指标集的欧氏距离和与最劣指标集的欧氏距离。则方案 $i$ 综合评分 $F_i$ 为:

$$F_i = \frac{D_{i,max}}{D_{i,max} + D_{i,min}} \quad (50)$$

### 2.3 提高分布式光伏消纳和可靠性的构网型储能配置方案求解流程

本文建立的提升配电网可靠性和分布式光伏消纳能力的GES配置计算方法整体流程如图4所示,步骤如下:

- 1)设定储能安装节点数从1依次增加到 $N$ ;
- 2)采用概率比例抽样生成配电网故障状态;
- 3)基于配电网实际状态,通过GES选址定容双

层优化模型计算储能配置方案;

4)基于解析法进行含分布式光伏和储能的配电网可靠性评估;

5)遍历所有配电网故障状态下的储能方案;

6)基于改进TOPSIS对所有GES配置方案的可靠性、分布式光伏消纳以及经济性指标进行综合评估;

7)遍历完设定的所有安装节点数,得出GES的最佳配置方案。

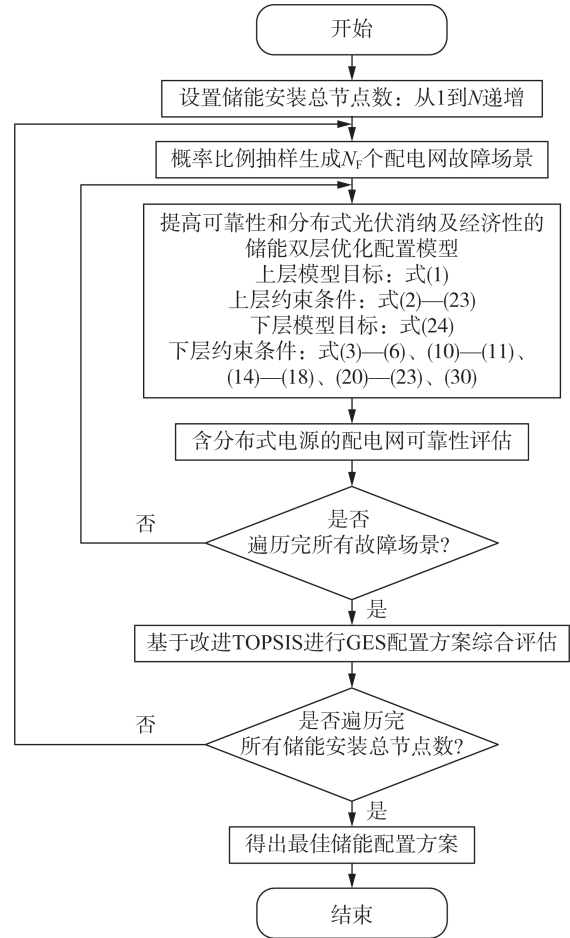


图 4 GES 优化配置步骤流程图

Fig. 4 Flowchart of GES optimisation configuration steps

## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

本文采用如图5所示的改进IEEE 33节点配电网算例模型,基础计算参数如表2所示。图5将配电网分为4类园区:医院、学校、工业和居民,按重要程度分为I类、II类和III类园区<sup>[39]</sup>。园区内部均设有分布式光伏。节点1为上级变压器源节点,剩余32个节点为负荷节点,均可作为GES安装候选节点。

配电网线路编号、线路故障率以及维修时间等

表 2 算例基础参数

Table 2 Parameters underlying the algorithm

参数	取值
电压等级/kV	10
光伏安装节点	17,21,24,27,32
单个光伏容量/MW	1.5
1-范数	0.5
$\infty$ -范数	0.5
弃光成本/(元/kWh)	0.6
购电成本/(元/kWh)	0.6
网损成本/(元/kWh)	0.4
单位储能容量投资成本/(元/kWh)	1600
折现系数	0.05
GES内电势幅值范围/p.u.	0.95~1.05
GES虚拟功角范围/(°)	0~10

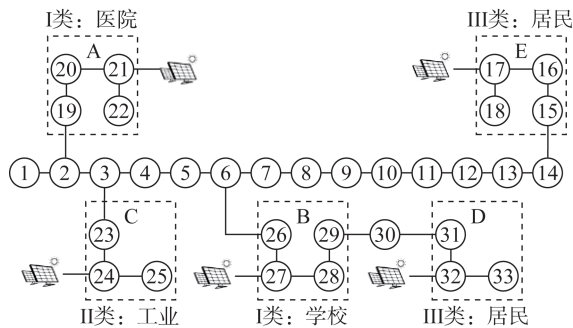


图 5 改进 33 节点算例系统

Fig. 5 Improvement of the 33-node arithmetic system

参数见附录 A 表 A1<sup>[40]</sup>,采用概率比例抽样生成 100 个典型故障场景,每个场景包含 1~4 条线路发生故障且被分段开关切断,形成孤岛,线路故障次数和概率如图 6 所示。可以看出 12 号、4 号、19 号、29 号以及 26 号线路故障次数最多。考虑天气因素,通过 LHS 生成 100 个光伏出力场景,利用 K-means 算法聚类得到 4 个典型场景,各场景概率如表 3 所示,光伏出力比例及负荷强度比例如图 7 所示。

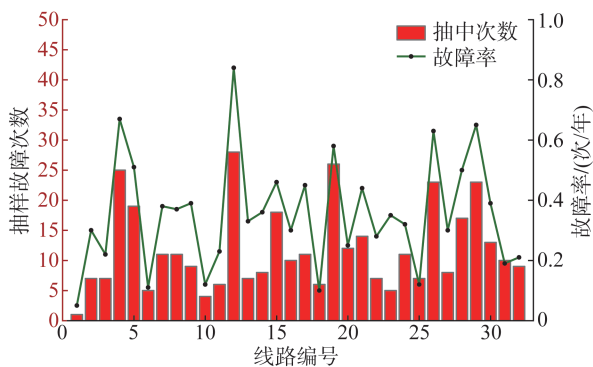


图 6 线路故障率和抽样次数

Fig. 6 Line failure rate and sampling times

表 3 四种场景概率

Table 3 Four scenario probabilities

场景	天气	概率
1	晴天	0.28
2	阴天	0.22
3	多云	0.23
4	多云	0.27

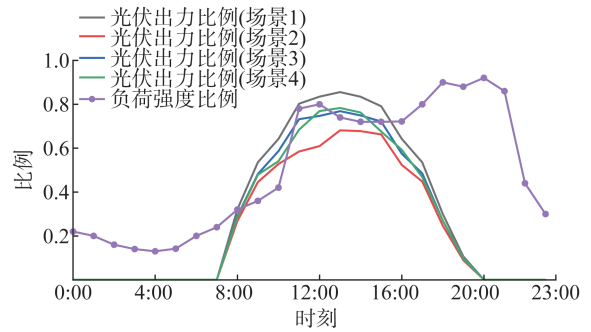


图 7 四种场景下光伏出力比例及负荷强度比例

Fig. 7 PV output ratio and load intensity ratio for four scenarios

### 3.2 储能优化配置结果

仿真设置 6 种分布式储能配置方式,储能安装的节点数从 1 依次递增,每种配置方式迭代 100 次,利用改进 TOPSIS 对各方案进行评估,结果如表 4 所示。

表 4 GES 优化配置结果

Table 4 Results of GES optimisation configuration

配置节点个数	储能接入节点(容量/MWh)	评估得分
1	14(11.55)	87.85
2	6(6.15),14(5.22)	88.88
3	7(1.49),14(4.67),30(6.47)	89.34
4	6(2.17),14(3.94),20(1.10),30(4.16)	93.79
5	3(1.10),6(1.11),13(3.95),20(1.12),30(4.09)	92.30
6	2(1.00),7(3.11),14(2.81),20(1.10),27(1.22),30(2.51)	90.91

从表 4 可以看出,配置 4 个节点 GES 方案最优,能有效提高可靠性和分布式光伏消纳率,且经济成本相对不高,综合评分最高。从安装节点来看,由于节点 6 距离电源节点近而节点 14 和 30 更远,故该方案最少需要在节点 6 安装 2.17 MWh 储能,最多在节点 30 安装 4.16 MWh 储能。此外,发生故障时,I 类负荷更可能成为上游负荷区,停电概率较小,而 III 类负荷停电概率更大,故末端节点储能需要配置更多容量。

在不同故障场景中迭代时,GES 在配电网中各节点选中的安装频次如图 8 所示。

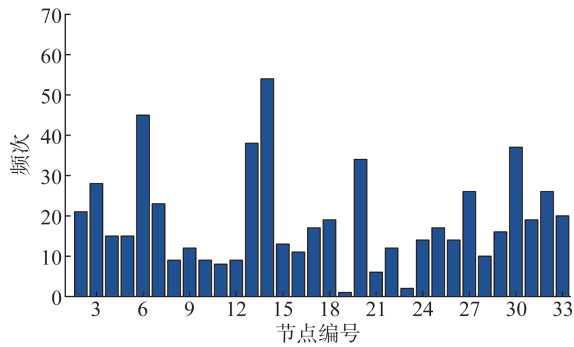


图 8 GES 安装节点频次

Fig. 8 Frequency of GES installation nodes

从图 8 可以看出,节点 3、6、14、20 以及 30 被选中次数较多,节点 3 可以保障园区 A 和园区 C 故障时的供电;节点 6 可以保障 4 号线路故障时园区 B 的供电;节点 14 则可以保障园区 E 的供电。节点 20 可以保障 19 号线路故障时园区 A 的供电;而节点 30 可以保障园区 B 和园区 D 故障时的供电。

最优储能配置方案下,设定三种故障情形:1)白天(10:00—16:00),光伏出力较大且负荷较高时;2)夜晚(17:00—23:00)没有光伏出力但负荷较高时;3)深夜(00:00—06:00),没有光伏出力且负荷较低时。三种情形下在发生故障后 6 h 内<sup>[41]</sup>,各个园区的最大负荷恢复率(负荷恢复量/原负荷量)如表 5 所示。

表 5 各个园区负荷恢复量  
Table 5 Load recovery by park

园区	类型	负荷恢复率(白天)/%	负荷恢复率(夜晚)/%	负荷恢复率(深夜)/%
A	I类:医院	99.98	87.00	90.76
B	I类:学校	99.96	82.37	89.07
C	II类:工业	98.91	79.93	85.43
D	III类:居民	94.91	75.49	74.33
E	III类:居民	94.24	66.60	82.92

从表 5 可以看出,储能优化配置结果按照负荷的重要程度,保障 I 类园区的负荷恢复量高于 II 类和 III 类。白天分布式光伏和储能共同承担孤岛负荷,负荷恢复率较高;夜晚只有储能供电,且夜晚负荷强度更大,故负荷恢复率更低。

### 3.3 储能与配电网可靠性提升分析

以系统平均停电时间和供电可靠率指标为可靠性指标,表 4 中 6 种 GES 配置方案的供电可靠性如图 9 所示。其中,方案 I 表示无分布式光伏和储能;方案 II 表示只有分布式光伏;方案 1—6 表示 GES 配置的节点数为 1~6。可以看出,分布式光伏和储能对系统可靠性的提升均有显著作用;当 GES 配置节点个数为 4 时,储能对可靠性的提升趋于稳定,继续增加

GES 配置节点数反而会增加经济成本。

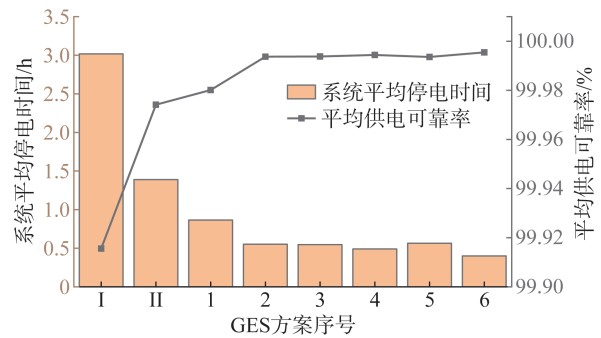


图 9 GES 对系统可靠性的影响

Fig. 9 Impact of GES on system reliability

GES 可以调节其内电势的幅值和相位来调节储能的充放电功率,以系统平均停电时间指标为可靠性指标,6 种方案下 GES 与传统储能的可靠性如图 10 所示。

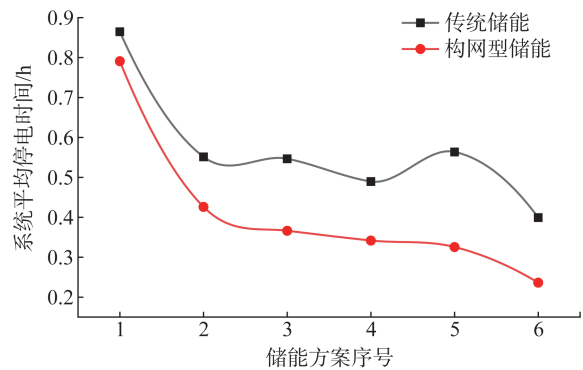


图 10 传统储能与 GES 对可靠性的影响比较

Fig. 10 Comparison of the impact of conventional energy storage and GES on reliability

从图 10 可以看出,调节构网型储能内电势的幅值和相位后,6 种分布式储能方案下的 SAIDI 都大幅降低。其中,优化幅度最大的方案 5 相比传统储能 SAIDI 减少了 42%,最小的方案 1 减少了 10%,可靠性大幅提高。通过公式(12)和(13)可以看出,增大构网型储能内电势的幅值和相位大小可以增加储能的有功和无功输出;增加有功能扩大储能供电范围从而减少系统平均停电时间;同时,相较于更侧重有功功率充放的传统储能,构网型储能在一定程度上能更好满足负荷的无功需求。

在最优储能配置方案下,逐步调节构网型储能内电势的幅值和相位,系统平均供电可靠率变化如图 11 所示。从图 11 可以看出,增大构网型储能内电势幅值和相角可以提高系统供电可靠率;在本算例中,增大内电势幅值可靠性提升相对较缓,而在内电势相角可调范围的中段(4°~8°),增大相角时可靠性提升较明显。

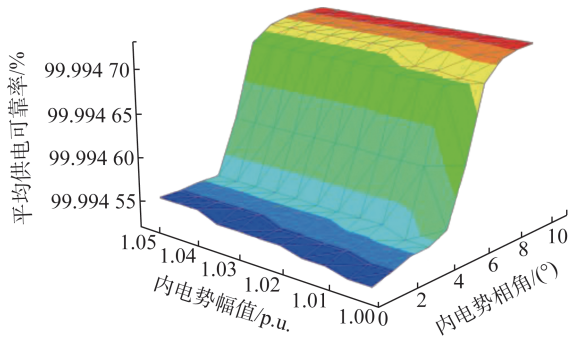


图 11 GES对可靠性的影响

Fig. 11 Impact of GES on reliability

### 3.4 储能提升配电网分布式光伏消纳效果分析

为分析不同储能方案对分布式光伏消纳水平的提升效果,图 12 展示了在确定性优化模型(不考虑天气等因素)和鲁棒优化模型下的优化结果。

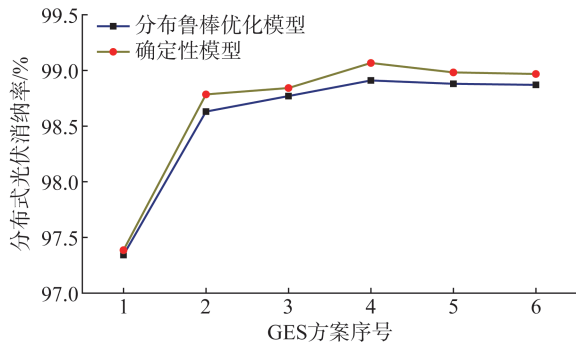


图 12 GES方案对分布式光伏消纳水平的提升

Fig. 12 Improvement in the level of distributed PV consumption by the GES programme

从图 12 可以看出,分布式光伏消纳水平随着储能配置节点数的递增而增大,但当节点数超过 4 以后分布式光伏消纳率会趋于稳定。同时,相比于确定性模型,分布鲁棒模型在最恶劣场景的概率分布下寻优,具有一定的保守性,消纳水平较低。

无储能、最优 GES 方案以及传统储能方案下各时段的平均弃光率以及日平均弃光率如图 13 和表 6 所示,其中传统储能方案与最优 GES 方案配置的位置和容量相同。

由图 13 可知,相比传统储能,GES 能够更大幅度减小弃光率;其中,弃光率在 09:00 最大,由图 7 可以看出,09:00 光照强度已经较高但负荷水平较低,而在 09:00—13:00 时段,随着负荷水平增加,弃光率逐渐减小。通过表 6 可以看出,构网型方案相比传统方案弃光率减少了 7.44%,相比于无储能时减少了 34.1%。

此外,增加 GES 容量能直接提升分布式光伏消

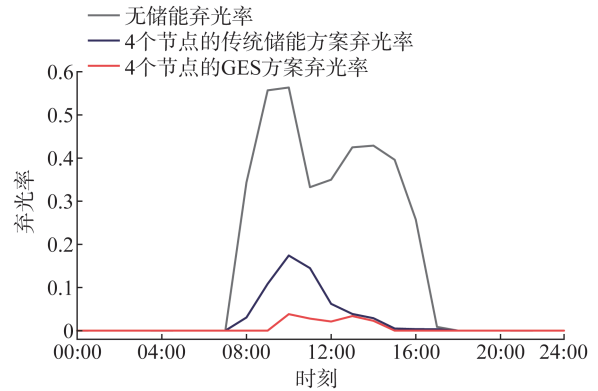


图 13 储能方案弃光率比较

Fig. 13 Comparison of the abandonment rate of energy storage solutions

表 6 储能方案日平均弃光率计算结果

Table 6 Calculation results of average curtailment rate of energy storage scheme

方案	日平均弃光率/%
无储能	36.61
传统储能方案	9.98
构网型储能方案	2.54

纳水平,在最优储能配置方案下,若增大投资成本,即增加各节点上 GES 的配置容量,分布式光伏消纳率提升效果如图 14 所示。

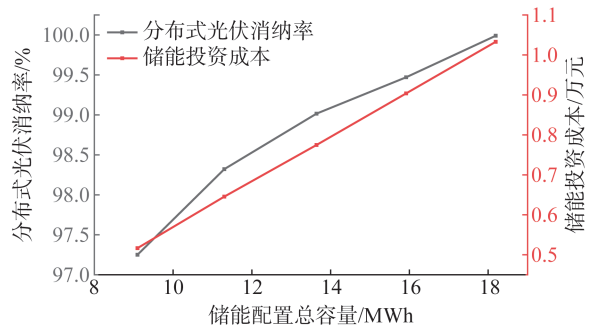


图 14 分布式光伏消纳率与储能投资关系

Fig. 14 Distributed PV consumption rate in relation to energy storage investment

### 3.5 储能配置的经济性分析

本节分析 GES 提高可靠性和分布式光伏消纳率带来的经济成本,图 15 展示了表 4 中 6 种 GES 配置方案及无储能方案(方案 0)下的弃光成本、购电成本、网损成本、储能配置成本和总成本,各类成本计算参考公式(24)~(29)。可以看出,随着 GES 安装节点数的递增,储能装置成本和总成本同步增加,其中,最优储能配置方案下的各装置功率如图 16 所示。可见,储能能够跟踪分布式光伏出力时序特性,降低了系统购电成本和弃光成本。

基于分布鲁棒优化原理,调节 1 范数和无穷范数

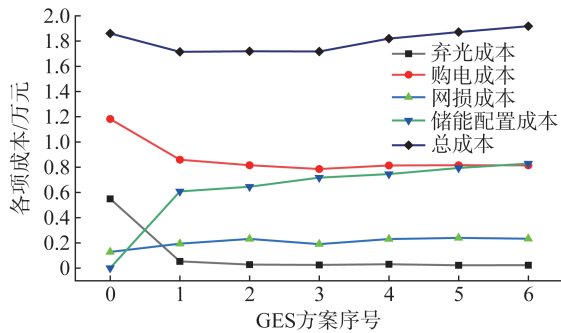


图 15 各项成本关系

Fig. 15 Cost relationships

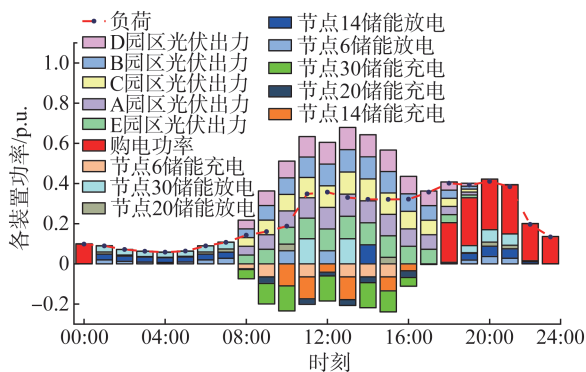


图 16 各项装置功率

Fig. 16 Power of each device

可调节模型的保守性,得到不同的经济成本。最优配置方案下,设置不同 1 范数和无穷范数的值,求解得到的总成本如表 7 所示。可以看出,1 范数和无穷范数越大,总成本越高;通过公式(35)—(37)可以看出,  $a_1$  和  $a_\infty$  的值越大,模型的置信区间越大,对应不确定性概率分布的范围也越大,模型越保守,求解的总成本越高。

表 7 不同 1 范数和无穷范数下系统运行总成本

Table 7 Total cost of system operation for different 1-paradigm and infinite-paradigm numbers

$a_1$	总成本/万元		
	$a_\infty=0.30$	$a_\infty=0.70$	$a_\infty=0.99$
0.30	1.810 2	1.820 4	1.824 1
0.70	1.818 6	1.821 2	1.827 7
0.99	1.819 9	1.823 2	1.830 2

## 4 结 论

本文建立了一种考虑配电网分布式光伏消纳和可靠性与经济性的构网型储能优化配置模型,并将所提方法应用在改进 IEEE 33 节点算例系统上验证其可行性。得出如下主要结论:

1) 针对本文研究案例,在 4 个节点配置 GES 的方案评估得分最高,能较好地平衡配电网的供电可靠性、分布式光伏消纳能力与投资的经济性。在故障

时,能优先保障 I 类和 II 类重要园区的供电。

2) 分布式储能配置的节点数越多,配电网的可靠性提升越强,但经济成本越高。相较于侧重有功功率充放的传统储能,构网型储能通过虚拟同步机控制等方式调节内电势的幅值和相位,实现有功和无功功率的双向灵活调整,可靠性提高幅度超过 10%。

3) 相对于集中式储能,分布式储能消纳光伏资源的能力更强,且 GES 方案相比传统储能的光伏弃光率减小了 7.44%;分布鲁棒优化模型在随机优化的基础上考虑光伏出力场景的概率分布置信区间,增加了系统保守性,相比确定性求解方案,分布式光伏消纳能力较低,经济成本更高。

### 利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献声明 (Authors' Contributions):

胥德玉、黄媛进行了研究设计、完成实验并分析数据和撰写论文;唐志远、刘俊勇、孙增杰、郝志方参与了论文写作指导。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

## 5 参考文献

- [1] LI J Y, LIU C Y, KHODAYAR M E, et al. Distributed online VAR control for unbalanced distribution networks with photovoltaic generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11 (6): 4760-4772.
- [2] 刘杨华, 杨悦荣, 林舜江. 含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 22-33.  
LIU Yanghua, YANG Yuerong, LIN Shunjiang. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 22-33.
- [3] 孙东磊, 王耀, 张惠雯, 等. 基于矩差分析的配电网分布式储能优化配置 [J]. 中国电力, 2023, 56(12): 31-40.  
SUN Donglei, WANG Yao, ZHANG Huiwen, et al. Optimal configuration of distributed energy storage in distribution networks based on moment difference analysis [J]. Electric Power, 2023, 56 (12): 31-40.
- [4] SAHU S K, KUMARI S, GHOSH D, et al. Estimation of photovoltaic hosting capacity due to the presence of diverse harmonics in an active distribution network [J]. IEEE Access, 2024, 12: 47868-47879.
- [5] 苏向敬, 张传坤, 符杨, 等. 考虑多场景运行的不平衡主动配电网电池储能系统两阶段优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 88-97.  
SU Xiangjing, ZHANG Chuankun, FU Yang, et al. Two-stage optimal placement of BESS in an unbalanced active distribution network considering multi-scenario operation [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 88-97.
- [6] 李建林, 邸文峰, 李雅欣, 等. 含高渗透光伏区域配网储能分区

- 优化配置[J]. 电气工程学报, 2024, 19(4): 13-23.
- LI Jianlin, DI Wenfeng, LI Yaxin, et al. Optimized allocation of energy storage zones in distribution networks containing high-permeability photovoltaic regions [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(4): 13-23.
- [7] 翁利国, 练德强, 张阳辉, 等. 考虑网络重构的多园区储能多目标优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 54-64.
- WENG Ligu, LIAN Deqiang, ZHANG Yanghui, et al. Multi-objective optimal configuration of multi-park energy storage considering network re-configuration [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 54-64.
- [8] 段晓磊, 王宇飞, 魏云峰, 等. 考虑新能源消纳的配电网中分布式光伏及储能联合优化配置[J/OL]. 现代电力, 2024: 1-14. (2024-12-03) [2025-01-12]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0441>.
- DUAN Xiaolei, WANG Yufei, WEI Yunfeng, et al. Joint optimal allocation of distributed photovoltaic and energy storage in distribution network considering new energy consumption [J/OL]. Modern Electric Power, 2024: 1-14. (2024-12-03) [2025-01-12]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0441>.
- [9] 叶琳浩, 申展, 许峰, 等. 考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 132-143.
- YE Linhao, SHEN Zhan, XU Feng, et al. Distributionally robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 132-143.
- [10] SABERI H, ZHANG C, DONG Z Y. Capacity of virtual energy storage system for frequency regulation services via a data-driven distributionally robust optimization method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2134-2147.
- [11] 郭峰, 王悦, 陆鑫, 等. 含高比例风电的新型电力系统的经济运行及储能配置[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 76-82.
- GUO Feng, WANG Yue, LU Xin, et al. Economic operation and energy storage configuration of new power system with high penetration of wind power [J]. Smart Power, 2023, 51(11): 76-82.
- [12] 赵宇, 李谦, 张云晓, 等. 含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 25-32, 49.
- ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy [J]. Smart Power, 2024, 52(8): 25-32, 49.
- [13] WANG S, HUI H X, DING Y, et al. Operational reliability evaluation of urban multi-energy systems with equivalent energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2): 2186-2201.
- [14] 张晋铭, 欧阳森, 吴晗, 等. 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 62-68, 85.
- ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 62-68, 85.
- [15] 孙雨潇, 朱俊澎, 袁越. 基于动态孤岛混合整数线性规划模型的主动配电网可靠性分析[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 90-97.
- SUN Yuxiao, ZHU Junpeng, YUAN Yue. Reliability evaluation based on dynamic island MILP model of active distribution network [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 90-97.
- [16] 黄兴华, 吴涵, 陈石川, 等. 考虑新能源出力的孤岛微网储能配置优化方法[J]. 中国电力, 2024, 57(12): 132-138.
- HUANG Xinghua, WU Han, CHEN Shichuan, et al. An optimization method for energy storage configuration of isolated island microgrid considering new energy output [J]. Electric Power, 2024, 57(12): 132-138.
- [17] LI C P, WANG Y L, CHEN Y M, et al. Multi-objective optimal allocation strategy for distributed energy storage in distribution networks adapted to high penetration distributed photovoltaics [C]//2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). IEEE, 2024: 1583-1589.
- [18] DONG W, DIAO H X, XU J M, et al. Analysis and parameters design of grid-forming converter for enhancing the stability of photovoltaic storage system under weak grid [J]. IEEE Access, 2024, 12: 134273-134284.
- [19] 胡顺全, 刘通, 王明月, 等. 构网型级联H桥储能变流器自适应功率解耦策略[J/OL]. 电源学报, 2025: 1-13. (2025-03-26) [2025-04-06]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1623.016>.
- HU Shunquan, LIU Tong, WANG Mingyue, et al. Adaptive power decoupling strategy for grid cascaded H-bridge energy storage converter [J/OL]. Journal of Power Supply, 2025: 1-13. (2025-03-26) [2025-04-06]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1623.016>.
- [20] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
- WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [21] 郭佳俊, 徐志, 翟保豫, 等. 构网型新能源-储能联合并网系统LVRT控制策略研究[J]. 电气传动, 2024, 54(7): 58-65, 72.
- GUO Jiajun, XU Zhi, ZHAI Baoyu, et al. Research on LVRT control strategy of combined grid-connected system with new energy storage based on grid-forming converters [J]. Electric Drive, 2024, 54(7): 58-65, 72.
- [22] 张硕, 陈媛丽, 李英姿, 等. 计及电力现货机会成本的构网型储能电站调频辅助服务竞价出清双层博弈模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 146-158.
- ZHANG Shuo, CHEN Yuanli, LI Yingzi, et al. Double-layer game model of bidding clearing for FM auxiliary service of grid-type energy storage power station considering spot opportunity cost of electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 146-158.
- [23] LI Z W, ZHANG Y C, CHENG Z P, et al. Virtual inertia control of grid-forming energy storage system and adaptive power control of grid-supporting PV system for voltage regulation of DC microgrid [J]. Solar Energy, 2024, 275: 112625.
- [24] LIU L Y, YANG X T, LONG C, et al. Research on the strategy on improving power supply capability and reliability with grid-forming energy storage for remote areas [C]//2024 6th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). IEEE, 2024: 750-754.
- [25] GERINI F, ZUO Y H, GUPTA R, et al. Optimal grid-forming control of battery energy storage systems providing multiple services: modeling and experimental validation [J]. Electric Power

- Systems Research, 2022, 212: 108567.
- [26] 王聪, 葛景, 汪莹, 等. 构网型储能提升系统电压稳定作用研究[J]. 电工技术, 2023(12): 183-185, 189.  
WANG Cong, GE Jing, WANG Ying, et al. Research on grid-forming BESS in improving voltage stability [J]. Electric Engineering, 2023(12): 183-185, 189.
- [27] 李成, 张婕, 石轲, 等. 面向风电场的主动支撑电网型分散式储能控制策略与优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 238-247.  
LI Cheng, ZHANG Jie, SHI Ke, et al. Control strategy and optimal configuration of active-support-grid type decentralized energy storage system for wind farms[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 238-247.
- [28] 胡伟, 杨硕. 考虑配电网脆弱性的储能双层优化配置模型[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 1-8.  
HU Wei, YANG Shuo. Dual-tiered optimization configuration model for energy storage considering distribution network vulnerability[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 1-8.
- [29] 吴雄, 贺明康, 何雯雯, 等. 考虑储能寿命的风-光-火-储打捆外送系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 66-75.  
WU Xiong, HE Mingkan, HE Wenwen, et al. Optimal capacity of a wind-solar-thermo-storage-bundled power transmission system considering battery life [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 66-75.
- [30] 高海淑, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 32-41.  
GAO Haishu, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Scenario clustering based distributionally robust comprehensive optimization of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 32-41.
- [31] 刘佳, 罗惠雄, 张小华, 等. 考虑停电损失及可中断负荷的有源配电网鲁棒孤岛划分策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 141-149.  
LIU Jia, LUO Huixiong, ZHANG Xiaohua, et al. Robust islanding strategy for active distribution network considering outage loss and interruptible load [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 141-149.
- [32] 解良彬, 向月, 王世谦, 等. 计及经济性与可靠性的台区储能优化配置[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 56-66, 87.  
XIE Liangbin, XIANG Yue, WANG Shiqian, et al. Optimization configuration of energy storage in distribution feeders considering economy and reliability [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 56-66, 87.
- [33] YIN H, WANG Z Q, LIU Y B, et al. Operational reliability assessment of distribution network with energy storage systems [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 629-639.
- [34] 熊小萍, 杨露, 李宁, 等. 基于仿射最小路法的含分布式电源配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 43-50.  
XIONG Xiaoping, YANG Lu, LI Ning, et al. Reliability analysis of distribution network with distributed generators based on affine minimal path method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 43-50.
- [35] AHADI A, MIRYOUSEFI AVAL S M, HAYATI H. Generating capacity adequacy evaluation of large-scale, grid-connected photovoltaic systems [J]. Frontiers in Energy, 2016, 10(3): 308-318.
- [36] 巨云涛, 周伟鹏, 于宗民. 考虑移动储能车提升系统供电可靠性的配电网规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 128-138.  
JU Yuntao, ZHOU Weipeng, YU Zongmin. A distribution network planning approach considering mobile energy storage vehicles to enhance system power supply reliability [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 128-138.
- [37] 吴龙腾, 朱卓文, 邱泽坚. 分布式电源接入配电网可靠性评估[J]. 光源与照明, 2024(3): 165-167.  
WU Longteng, ZHU Zhuowen, QIU Zejian. Reliability evaluation of distributed power supply connected to distribution network [J]. Lamps & Lighting, 2024(3): 165-167.
- [38] MAHMOUD A, YUAN X H, KHEIMI M, et al. An improved multi-objective particle swarm optimization with TOPSIS and fuzzy logic for optimizing trapezoidal labyrinth weir [J]. IEEE Access, 2021, 9: 25458-25472.
- [39] 杜向阳, 熊小伏, 王建, 等. 基于负荷有序聚类的主动配电网储能规划方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 187-197.  
DU Xiangyang, XIONG Xiaofu, WANG Jian, et al. Energy storage planning method of active distribution network based on load ordered clustering [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 187-197.
- [40] 胡邦安, 刘友波, 许立雄, 等. 考虑重构策略的配电网可靠性增值服务双层博弈模型及其求解[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9496-9509.  
HU Bang'an, LIU Youbo, XU Lixiong, et al. Solution of reliability value-added service based on two-level game model considering distribution system reconfiguration strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9496-9509.
- [41] 国家能源局. 国家能源局召开 2025 年电力可靠性指标发布会 [EB/OL]. (2025-03-26) [2025-04-07]. <https://www.nea.gov.cn/20250326/d3475c788eac4c2f985999257fe02b14/c.html>.

收稿日期: 2025-03-10 修回日期: 2025-05-26

作者简介:

胥德玉(2001),男,硕士研究生,研究方向为新型配电网优化与调度,E-mail: 454447101@qq.com;

黄媛(1974),女,博士,副教授,通信作者,研究方向为配电网规划与运行、电力系统稳定与控制,E-mail: yuanhuang@scu.edu.cn;

唐志远(1992),男,博士,副研究员,研究方向为电力系统运行控制,E-mail:tangzhiyuan@scu.edu.cn;

刘俊勇(1963),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为能源互联网、电力市场、智能配电网,E-mail: liujy@scu.edu.cn;

孙增杰(1972),男,本科,高级工程师,研究方向为电网调度自动化与科技管理,E-mail: 445182015@qq.com;

郝志方(1996),男,硕士,助理工程师,研究方向为智能配电网优化运行与规划,E-mail: hzf0132@163.com。

(编辑 张小飞)

## 附录 A

表 A1 33 节点网络参数  
Table A1 33 node network parameters

线路编号	连接节点	故障率/ (次/年)	维修时间/ h	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$	节点 编号	负荷类型	用户数	有功典型 值/kW	无功典型 值/kW
1	1-2	0.05	1.28	0.092 2	0.047 0	2	其他	10	100	60
2	2-3	0.30	1.05	0.493 0	0.251 1	3	其他	5	90	40
3	3-4	0.22	1.10	0.366 0	0.186 4	4	其他	5	120	80
4	4-5	0.67	1.82	0.381 1	0.194 1	5	其他	2	60	30
5	5-6	0.51	1.69	0.819 0	0.707 0	6	其他	5	60	20
6	6-7	0.11	1.32	0.187 2	0.618 8	7	其他	15	200	100
7	7-8	0.38	1.95	0.711 4	0.235 1	8	其他	15	200	100
8	8-9	0.37	1.03	1.030 0	0.740 0	9	其他	2	60	20
9	9-10	0.39	1.44	1.044 0	0.740 0	10	其他	2	60	20
10	10-11	0.12	1.38	0.196 6	0.065 0	11	其他	3	45	30
11	11-12	0.23	1.77	0.374 4	0.123 8	12	其他	2	60	35
12	12-13	0.84	1.80	1.468 0	1.155 0	13	其他	20	60	35
13	13-14	0.33	1.19	0.541 6	0.712 9	14	其他	30	120	80
14	14-15	0.36	1.49	0.591 0	0.526 0	15	III类居民	40	60	10
15	15-16	0.46	1.45	0.746 3	0.545 0	16	III类居民	15	60	20
16	16-17	0.30	1.65	1.289 0	1.721 0	17	III类居民	15	60	20
17	17-18	0.45	1.71	0.732 0	0.574 0	18	III类居民	40	90	40
18	2-19	0.10	1.75	0.164 0	0.156 5	19	I类医院	15	90	40
19	19-20	0.58	1.28	1.504 2	1.355 4	20	I类医院	15	90	40
20	20-21	0.25	1.68	0.409 5	0.478 4	21	I类医院	20	90	40
21	21-22	0.44	1.66	0.708 9	0.937 3	22	I类医院	20	90	40
22	3-23	0.28	1.16	0.451 2	0.308 3	23	II类工业	120	90	50
23	23-24	0.35	1.12	0.898 0	0.709 1	24	II类工业	120	420	200
24	24-25	0.32	1.50	0.896 0	0.701 1	25	II类工业	100	420	200
25	6-26	0.12	1.96	0.203 0	0.103 4	26	I类学校	10	60	25
26	26-27	0.63	1.34	0.284 2	0.144 7	27	I类学校	30	60	25
27	27-28	0.30	1.59	1.059 0	0.933 7	28	I类学校	25	60	20
28	28-29	0.50	1.22	0.804 2	0.700 6	29	I类学校	50	120	70
29	29-30	0.65	1.75	0.507 5	0.258 5	30	其他	10	200	600
30	30-31	0.39	1.26	0.974 4	0.963 0	31	III类居民	35	150	70
31	31-32	0.19	1.51	0.310 5	0.361 9	32	III类居民	25	210	100
32	32-33	0.21	1.70	0.341 0	0.530 2	33	III类居民	20	60	40