

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250720

考虑 ESS 容量健康退化的山区柔性配电网光伏 承载能力鲁棒评估方法

王任之, 李培强, 刁涵彬, 刘康, 张益轩, 王硕

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)的大规模无序接入为山区配电网带来了过电压、功率倒送等问题, 影响配电网的稳定运行。如何准确计算山区配电网 DPV 承载能力已成为目前亟待研究和解决的重要问题。针对这一问题, 以山区配电网所能接入的 DPV 最大容量为目标函数, 构建考虑储能系统(energy storage system, ESS)容量健康退化和含有 ESS 的智能软开关(soft open point integrated with energy storage, E-SOP)的确定性模型。其次, 分析 DPV 出力曲线, 并在确定性模型的基础上构建山区柔性配电网 DPV 承载能力双层鲁棒模型。然后, 根据 KKT 条件将模型转化为混合整数线性规划问题, 并采用 Gurobi 求解器求得模型评估结果。最后, 通过改进的 IEEE33 节点山区柔性配电网进行算例分析, 研究 ESS 容量健康退化和 DPV 出力不确定性对 DPV 承载能力的影响。算例分析表明所提模型使 DPV 承载能力提高了 8.43%, 验证了该模型的可行性和有效性。

关键词: 山区配电网; E-SOP; ESS 健康退化; 鲁棒模型; 承载能力

A robust evaluation method for photovoltaic hosting capacity of flexible distribution networks in mountainous areas considering ESS health degradation

WANG Renzhi, LI Peiqiang, DIAO Hanbin, LIU Kang, ZHANG Yixuan, WANG Shuo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The large-scale and uncoordinated integration of distributed photovoltaic (DPV) systems has introduced issues such as overvoltage and reverse power flow in distribution networks in mountainous areas, adversely affecting their stable operation. Accurately determining the DPV hosting capacity of distribution networks in mountainous areas has therefore become an urgent research problem. To address this issue, a deterministic model is constructed with the objective of maximizing the DPV capacity that can be accommodated by a mountainous distribution network, while explicitly considering the capacity health degradation of energy storage systems (ESS) and smart soft open points integrated with energy storage (E-SOP). Subsequently, DPV output characteristics are analyzed, and on the basis of the deterministic model, a two-layer robust model for DPV hosting capacity evaluation in flexible distribution networks in mountainous areas is developed. Then, the model is transformed into a mixed-integer linear programming problem using the KKT conditions and solved with the Gurobi optimizer. Finally, case studies are conducted on an improved IEEE 33-node flexible distribution network in a mountainous area to investigate the impact of ESS capacity health degradation and DPV output uncertainty on DPV hosting capacity. The results show that the proposed model increases DPV hosting capacity by 8.43%, demonstrating its feasibility and effectiveness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377097).

Key words: distribution networks in mountainous areas; E-SOP; ESS health degradation; robust model; hosting capacity

0 引言

国家能源局发布的《2024 年能源工作指导意见

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377097)

见》^[1]指出, 要因地制宜加快推动分布式光伏发电开发, 在条件具备地区组织实施“千家万户沐光行动”。在此背景下, 以分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)为代表的清洁能源正逐步代替传统化石能源成为配电网大力推广的新型能源, 使得配电网由单

向流动、发电方式单一的传统配电网向源-网-荷-储融合互动的新型配电网转变^[2-3]。然而, DPV 的大规模无序接入也给配电网带来了电能质量降低^[4-6]、过电压^[7-8]、功率倒送^[9-10]等问题。因此, 如何准确评估配电网 DPV 承载能力尤为重要。

配电网 DPV 承载能力是指在满足配电网安全运行约束下所能接入的 DPV 最大容量^[11-12]。现有研究中配电网 DPV 承载能力评估方法主要可分为两种: 仿真模拟方法和数学优化方法。其中仿真模拟方法^[13-15]利用 MATLAB、PSCAD 等仿真软件实时分析 DPV 出力功率对配电网的影响, 通过大量的运行数据得到准确的承载能力结果, 尽管该类方法操作简单, 但由于需要反复校验系统运行状态导致工作量较大且难以精准评估最大容量。与之相比, 数学优化方法例如遗传算法^[16-17]、粒子群优化算法^[18-19]等, 能够以较短的计算时间得到更准确的承载能力评估结果, 且能够适应多种优化问题和约束条件。文献[20]分别采用遗传算法与灰狼优化算法对配电网 DPV 承载能力进行求解, 并将两者结果进行对比和分析; 文献[21]提出了一种改进的粒子群优化算法来求解 DPV 承载能力评估模型, 确保电网的高安全性和高稳定性。但以上研究仅考虑对配电网 DPV 承载能力进行评估, 均未考虑 DPV 承载能力提升技术。

目前 DPV 承载能力提升技术研究中, 国内外学者聚焦于储能系统(energy storage system, ESS)和智能软开关(soft open point, SOP)进行优化配置以提升 DPV 承载能力。ESS 由于具有高效蓄能和快速充放电的特性, 能够促进 DPV 的功率消纳从而提高配电网 DPV 承载能力。文献[22]分析了不同 ESS 配置方案对 DPV 承载能力的提升效果。文献[23]以经济性最优为目的建立 ESS 优化配置模型, 从而在保障经济效益的前提下最大化提升配电网新能源承载能力; 文献[24]分别从 ESS 的容量、额定功率和占比的变化等角度分析其对 DPV 承载能力的影响。SOP 具有潮流灵活调整的能力, 可实现配电网的柔性闭环运行^[25], 从而提高配电网 DPV 承载能力。文献[26]证明相较于其他主动管理措施 SOP 对配电网 DPV 最大准入容量的提升效果更佳; 文献[27]分析 SOP 位置和容量的选取对配电网 DPV 承载能力提升效果的影响; 文献[28]提出 SOP 不仅可以提高配电网 DPV 承载能力, 还可以显著降低 DPV 大规模接入带来的系统损耗。

需要指出的是, 尽管上述文献对配电网 DPV 承载能力提升研究已有所进展, 但仍存在以下不足。

1) 未考虑 DPV 出力不确定性。前述研究大多

围绕城市配电网进行, 鲜有关于山区配电网 DPV 承载能力的研究。相较于城市配电网, 山区配电网网架结构比较薄弱, DPV 大规模接入所带来的出力不确定性更容易导致功率倒送、变压器过载等问题。因此未考虑 DPV 出力不确定性将会导致山区配电网承载力评估结果过于乐观。

2) 未考虑 ESS 和 SOP 协调规划。前述研究大多仅考虑 ESS 或 SOP 作为单一资源进行配置, 可能会导致出现次优解。因此 ESS 和 SOP 协调规划能更好地提升山区配电网 DPV 承载能力。

3) 未考虑 ESS 容量健康退化。ESS 会随着使用年限的增加而发生健康退化的现象, 使得 ESS 的容量逐年降低, 而这无疑会影响 ESS 的性能, 从而导致 ESS 配置结果过于理想。

针对上述不足, 本文提出一种考虑 ESS 容量健康退化的山区柔性配电网光伏承载能力鲁棒评估方法。该方法首先分析 ESS 容量随使用寿命的变化规律, 构建 ESS 容量健康退化模型, 并建立含有 ESS 的智能软开关(E-SOP)模型, 实现山区配电网的柔性互联。其次, 在确定性模型的基础上, 刻画了 DPV 出力不确定性并构建山区柔性配电网 DPV 承载能力双层鲁棒模型, 采用 KKT 条件将双层鲁棒模型转化为混合整数线性规划问题。最后, 通过改进的 IEEE33 节点山区柔性配电网仿真结果验证本文方法的可行性和有效性。

1 考虑 ESS 容量健康退化的 E-SOP 模型

为了在山区配电网 DPV 承载能力评估过程中, 分析 E-SOP 对 DPV 承载能力的提升效果以及 ESS 容量健康退化对 DPV 承载能力的影响, 本节建立 E-SOP 模型和 ESS 容量健康退化模型。

1.1 E-SOP 模型

传统山区配电网普遍采用依赖传统联络开关(normally open point, NOP)进行潮流分布控制的辐射型网络结构, 其存在着潮流方向单一、响应迟缓, 和节点电压越限风险较高等问题。相比之下, 智能软开关(soft open point, SOP)凭借电力电子变流器的快速调控能力, 可实现有功/无功潮流的双向、实时优化。因此, 本文将 ESS 与 SOP 协同规划, 构建具备多端口 E-SOP 模型来取代 NOP, E-SOP 模型如图 1 所示。

观察图 1 可以看出, E-SOP 模型通过 AC/DC 换流器将多个馈线连接起来, 并将 ESS 通过 DC/DC 换流器接入 SOP 的直流部分, 以此实现多个端口之间潮流分布的快速控制^[29-30]。E-SOP 模型可视为由 SOP 和 ESS 两部分组成。

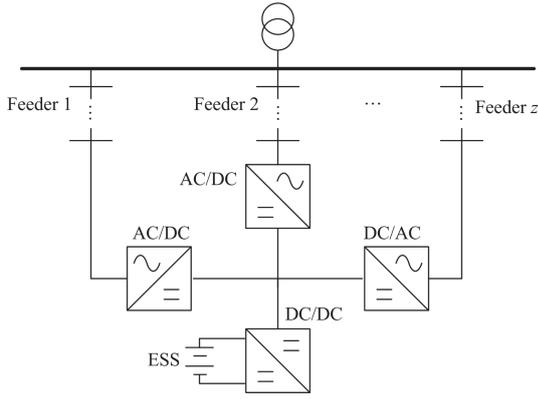


图 1 多端口 E-SOP 模型

Fig. 1 Multi-port E-SOP model

1) SOP 模型

$$\sum_{z \in Z} P_{i,t,z}^{SOP} = P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{i,t,z}^{SOP} \leq P_{i,max}^{SOP} \quad (2)$$

$$0 \leq Q_{i,t,z}^{SOP} \leq Q_{i,max}^{SOP} \quad (3)$$

$$(P_{i,t,z}^{SOP})^2 + (Q_{i,t,z}^{SOP})^2 \leq (S_z^{SOP})^2 \quad (4)$$

式中： Z 为端口 z 的集合； $P_{i,t,z}^{SOP}$ 和 $Q_{i,t,z}^{SOP}$ 分别为 t 时刻节点 i 流向 SOP 端口 z 的有功、无功功率； $P_{i,t}^{ch}$ 和 $P_{i,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻节点 i 处 ESS 充、放电功率； $P_{i,max}^{SOP}$ 、 $Q_{i,max}^{SOP}$ 分别为节点 i 处 E-SOP 端口允许流过有功、无功功率的极限值； S_z^{SOP} 为端口 z 处的换流器容量。

2) ESS 模型

$$0 \leq P_{i,t}^{ch} \leq B_{i,t}^{ch} P_{i,max}^{ch} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{dis} \leq B_{i,t}^{dis} P_{i,max}^{dis} \quad (6)$$

$$B_{i,t}^{ch} + B_{i,t}^{dis} \leq 1 \quad (7)$$

$$(E_{i,t+\Delta t} - E_{i,t}) C_i^{ESS} = (\eta_i^{ESS} P_{i,t}^{ch} - \frac{P_{i,t}^{dis}}{\eta_i^{ESS}}) \Delta t \quad (8)$$

$$E_{i,min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,max} \quad (9)$$

$$E_{i,0} = E_{i,24} \quad (10)$$

式中： $B_{i,t}^{ch}$ 和 $B_{i,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻节点 i 处 ESS 充、放电状态，其值为 0 或 1； $P_{i,max}^{ch}$ 、 $P_{i,max}^{dis}$ 分别为节点 i 处 ESS 充、放电功率的极限值； $E_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 处 ESS 的荷电状态； η_i^{ESS} 为节点 i 处 ESS 的充放电效率； C_i^{ESS} 为节点 i 处 ESS 的安装容量； $E_{i,max}$ 、 $E_{i,min}$ 分别为节点 i 处 ESS 荷电状态的最大、最小值。

1.2 ESS 容量健康退化模型

随着使用寿命的增加，ESS 中的储能电池不可避免地会出现健康退化，致使 ESS 容量逐渐减小，

进而削弱 E-SOP 的潮流调节能力^[31]。山区地质条件复杂、气候环境多变且基础设施薄弱，导致配电网节点巡检与维护难以常态化，所以 ESS 容量健康退化对系统运行的不利影响更为显著。对此，本文引入已被广泛应用的 Wiener 退化模型^[32-34]刻画 ESS 容量健康退化规律，如式(11)所示。

$$X(t) = X(0) + \nu A(t) + \sigma B(t) \quad (11)$$

式中： $X(t)$ 和 $X(0)$ 分别表示 t 时刻和初始时刻元器件健康退化的程度， $X(0)$ 通常为 0； ν 为漂移速率，表示元器件健康退化的平均速率； $A(t)$ 为一个确定函数，本文设定 $A(t) = t^2$ ； σ 为扩散系数，表示元器件健康退化过程波动的幅度； $B(t)$ 为标准布朗运动。

基于 Wiener 退化模型，本文将 ESS 容量健康退化程度表示为

$$K_i^{ESS}(t + \Delta t) = K_i^{ESS}(t) + 2\nu t \Delta t + \sigma N \sqrt{\Delta t} \quad (12)$$

式中： $K_i^{ESS}(t)$ 为 t 时刻 ESS 容量健康退化的程度； N 为满足标准正态分布的随机性参数； Δt 为两个相邻时刻的时间差。

此时，通过式(12)可以得到不同时刻 ESS 容量健康退化程度。为了便于评估承载能力，需要根据式(12)得出不同时刻的 ESS 容量，如式(13)所示。

$$C_{i,hd}^{ESS} = \sum_{i \in \Omega^{ESS}} C_i^{ESS} (1 - K_i^{ESS}(t)) \quad (13)$$

式中： $C_{i,hd}^{ESS}$ 为经过健康退化后 ESS 的容量； Ω^{ESS} 为 ESS 可接入节点集。

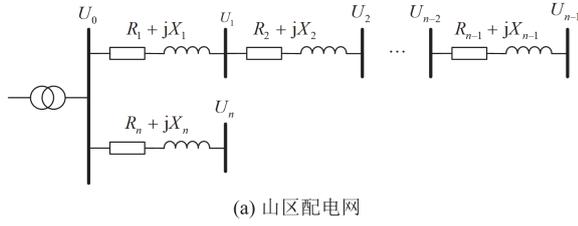
2 山区柔性配电网承载能力鲁棒评估模型

为构建山区柔性配电网承载能力鲁棒评估模型，本节分析山区配电网特点，构建含有潮流方程、安全约束、无功补偿约束以及第 1 节所提出的考虑 ESS 容量健康退化的 E-SOP 模型的确定性模型。刻画 DPV 出力的不确定性，提出双层鲁棒模型并采用 KKT 条件将其转化为混合整数线性规划问题。

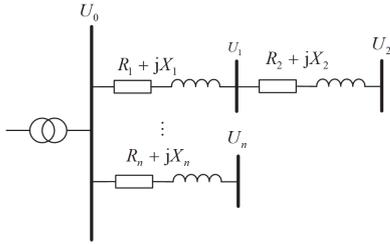
2.1 山区配电网特点

相较于人口密集、地质条件优越的城市配电网，山区配电网因电力用户分布分散、经济水平相对滞后，存在着供电半径长、线路损耗大以及电能质量低等问题，其等效模型如图 2 所示。为了满足偏远山区的用电需求，山区配电网往往采用依赖长馈线输电的辐射型网络结构，导致线路阻抗显著增加，山区配电网末端节点电压进一步下降。针对以上问题，本文在山区配电网电压薄弱节点就近接入 DPV，通过就地消纳来提高节点电压幅值。然而，DPV 的大规模接入又会带来功率倒送、变压器过载等新问题。为此，本文进一步部署 E-SOP，利用其

潮流调控能力实现多馈线柔性互联与双向潮流优化, 从而降低 DPV 大规模并网带来的不利影响。



(a) 山区配电网



(b) 城市配电网

图 2 山区与城市配电网等效模型

Fig. 2 Equivalent model of mountainous and urban distribution networks

2.2 配电网运行模型

2.2.1 潮流方程

配电网运行需要满足线性潮流方程, 如式(14)一式(18)所示。

$$P_{i,t} = P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{dis}} - P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{L}} \quad (14)$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^{\text{SVC}} - Q_{i,t}^{\text{L}} \quad (15)$$

$$\sum_{l:(l,i) \in L^{\text{to}}} P_{l,t} - \sum_{l:(l,i) \in L^{\text{from}}} P_{l,t} + P_{i,t} = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{l:(l,i) \in L^{\text{to}}} Q_{l,t} - \sum_{l:(l,i) \in L^{\text{from}}} Q_{l,t} + Q_{i,t} = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i:(l,i) \in L^{\text{to}}} V_{i,t} - \sum_{i:(l,i) \in L^{\text{from}}} V_{i,t} = (P_{l,t} r_l + Q_{l,t} x_l) / V_N \quad (18)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 处的有功、无功功率; $P_{i,t}^{\text{L}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{L}}$ 分别为 t 时刻节点 i 处负荷的有功、无功功率; $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 为 t 时刻节点 i 处的光伏出力; $Q_{i,t}^{\text{SVC}}$ 为 t 时刻节点 i 处的无功补偿功率; l 为支路; L 为配电网支路集合; L^{to} 为支路到首端节点的映射; L^{from} 为支路到末端节点的映射; $P_{l,t}$ 、 $Q_{l,t}$ 分别为 t 时刻支路 l 上通过的有功、无功功率; $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 处电压幅值; V_N 为额定电压; r_l 、 x_l 分别为支路 l 的电阻和电抗。

2.2.2 安全约束

为避免电压约束和支路过载, 配电网运行模型需要符合安全约束, 包括节点电压约束和支路电流

约束, 如式(19)一式(20)所示。

1) 节点电压约束

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max}, \forall i \in \Omega \quad (19)$$

式中: $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 处电压幅值上、下限; Ω 为配电网所有节点集合。

2) 支路电流约束

$$|I_{l,t}| \leq I_{\max} \quad (20)$$

式中: $I_{l,t}$ 、 I_{\max} 分别为 t 时刻支路 l 上所通过的电流值及其极限值。

2.2.3 无功补偿约束

为减少因无功功率传输带来的线路损耗, 配电网中需要接入静止无功补偿设备(static var compensator, SVC)来提高功率因数, 无功补偿约束如式(21)所示。

$$Q_{\min}^{\text{SVC}} \leq Q_{i,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{\max}^{\text{SVC}} \quad (21)$$

式中: Q_{\max}^{SVC} 、 Q_{\min}^{SVC} 分别为 SVC 的无功补偿的上、下限。

2.3 配电网承载能力评估模型

2.3.1 确定性模型

确定性模型是指不考虑 DPV 不确定性的配电网承载能力评估模型, 即满足潮流配电网运行模型、SOP 模型、ESS 模型等相关约束时的配电网承载能力最大化问题, 如式(22)和式(23)所示。

$$\max C^{\text{PV}} = \max \left(\sum_{i \in \Omega^{\text{PV}}} S_i^{\text{PV}} \right) \quad (22)$$

$$\text{s.t. 式(1)一式(21)} \quad (23)$$

式中: C^{PV} 为 DPV 可接入容量; Ω^{PV} 为 DPV 可接入节点集; S_i^{PV} 为节点 i 处可安装 DPV 的额定功率。

2.3.2 DPV 出力不确定性模型

作为清洁能源, DPV 可将太阳能转化为电能以满足人们生产生活的需求, 其出力大小由光照强度决定。然而, 受光照角度、气候变化等因素影响, DPV 所接收到的光照强度难以预测, 导致 DPV 出力具有不确定性, 将会影响承载能力评估结果的准确性。因此, 本文基于对 DPV 出力曲线的研究构建 DPV 不确定性模型, 如式(24)一式(27)所示。其中, $\bar{\alpha}_{i,t}$ 和 $\underline{\alpha}_{i,t}$ 为本文引入的二进制变量, 其值为 1 时分别代表 DPV 出力功率达到波动区间的上限和下限。DPV 出力功率无法同时达到波动区间的上限和下限, 则 $\bar{\alpha}_{i,t}$ 、 $\underline{\alpha}_{i,t}$ 不可能同时取到 1, 如式(27)所示。

$$P_{i,t}^{\text{PV}} = P_{i,t}^{\text{PVE}} + \tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}} \quad (24)$$

$$\tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}} = \Delta \tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}} (\bar{\alpha}_{i,t} - \underline{\alpha}_{i,t}) \quad (25)$$

$$\Delta \tilde{P}_{i,\min}^{\text{PV}} \leq \Delta \tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}} \leq \Delta \tilde{P}_{i,\max}^{\text{PV}} \quad (26)$$

$$\bar{\alpha}_{i,t} + \underline{\alpha}_{i,t} \leq 1 \quad (27)$$

式中： $P_{i,t}^{PVE}$ 为 t 时刻节点 i 处 DPV 的出力功率期望值； $\tilde{P}_{i,t}^{PV}$ 、 $\Delta\tilde{P}_{i,t,max}^{PV}$ 、 $\Delta\tilde{P}_{i,t,min}^{PV}$ 分别为 t 时刻节点 i 处 DPV 的出力功率偏差及其上、下限。

需要注意的是,上述模型仅研究了 DPV 出力功率波动带来的不确定性,但 DPV 出力功率波动的的时间和位置同样无法预测,这又为模型带来了新的不确定性。为进一步研究 DPV 出力功率波动在时间和空间上的不确定性,本文引入时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 和空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 对 $\bar{\alpha}_{i,t}$ 和 $\underline{\alpha}_{i,t}$ 进行约束,如式(28)所示。具体约束如下: 1) 整个周期 T 内 DPV 出力出现波动的次数不能超过时间鲁棒预算 Ψ_{Time} ; 2) DPV 节点集合 Ω^{PV} 中的 DPV 在同一时刻出现波动的个数不能超过空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 。

$$\begin{cases} \sum_{t \in T} (\bar{\alpha}_{i,t} + \underline{\alpha}_{i,t}) \leq \Psi_{Time} \\ \sum_{i \in \Omega^{PV}} (\bar{\alpha}_{i,t} + \underline{\alpha}_{i,t}) \leq \Psi_{Space} \end{cases} \quad (28)$$

2.3.3 双层鲁棒模型

基于 2.3.1 节介绍的确定性模型,双层鲁棒模型进一步考虑了 DPV 不确定性变量对配电网承载能力的影响,构成内外两层模型: 1) 内层模型是山区柔性配电网中的灵活资源使 DPV 承载能力最大化问题; 2) 外层模型是 DPV 不确定性变量使 DPV 承载能力最小化问题。

$$\min_{\alpha \in A} \max_{x \in X} C^{PV} = \min_{\alpha \in A} \max_{x \in X} \left(\sum_{i \in \Omega^{PV}} S_i^{PV} \right) \quad (29)$$

$$x \in X = \{P_{i,t,z}^{SOP}, Q_{i,t,z}^{SOP}, P_{i,t}^{dis}, P_{i,t}^{ch}, E_{i,t}, P_{i,t}, Q_{i,t}, P_{i,t}^{PV}, P_{i,t}^L, Q_{i,t}^{SVC}\} \quad (30)$$

$$\alpha \in A = \{\bar{\alpha}_{i,t}, \underline{\alpha}_{i,t}\} \quad (31)$$

式中： α 、 x 分别为外层和内层模型的决策变量； A 和 X 分别为决策变量 α 、 x 的集合。

2.4 模型求解

由于双层鲁棒模型无法被求解器直接求解,本文采用 KKT 条件将内层模型转化为 KKT 方程,再作为约束与外层模型结合为单层模型。首先,需要将内层模型转化为紧凑形式,如式(32)和式(33)所示。

$$\max_{x \in X} (C^T x) \quad (32)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} Kx \leq D \\ Gx = M \end{cases} \quad (33)$$

式中： C 为决策变量 x 的系数矩阵； K 、 D 为内层模型不等式约束的系数矩阵； G 、 M 为内层模型等式约束的系数矩阵。

其次,通过 KKT 条件,双层鲁棒模型的内层模型可被转化为 KKT 方程,如式(34)一式(40)所示。

$$C + K^T \omega + G^T \delta = 0 \quad (34)$$

$$Kx \leq D \quad (35)$$

$$0 \leq \omega \quad (36)$$

$$\omega^T (Kx - D) = 0 \quad (37)$$

$$Gx = M \quad (38)$$

式中： ω 、 δ 分别为内层模型不等式约束和等式约束的拉格朗日乘子矩阵。

此时,式(37)中为非线性约束,需要采用大 M 法将其转化为线性约束,如式(39)。

$$\begin{cases} 0 \leq \omega \leq M(E - N) \\ -MN \leq Kx - D \leq 0 \end{cases} \quad (39)$$

式中： M 为任意无穷大的数； N 、 ω 为同型矩阵,矩阵中的元素都为二进制变量,其值只能为 1 或 0； E 为单位矩阵。

最后,将 KKT 条件与外层模型结构,可得到如式(40)所示的混合整数线性规划问题,其可被商业求解器 Gurobi 直接求解。

$$\begin{cases} \min_{\alpha \in A} \sum_{i \in \Omega^{PV}} S_i^{PV} \\ \text{s.t. 式(24)一式(28),式(34)一式(39)} \end{cases} \quad (40)$$

3 算例分析

3.1 参数设置

本文以改进的 IEEE33 节点山区柔性配电网为例来验证本文方法的有效性和优越性,配电网拓扑结构如图 3 所示,配电网负荷和 DPV 数据来自贵州山区配电网实际数据。基准电压为 12.66 kV,节点电压安全范围为 0.95~1.05 p.u.。功率基准值为 10 MW。尖峰负荷为 4.49 MW 和 1.92 Mvar。变压器容量为 10 MVA。时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 和空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 均设为 1 p.u.。E-SOP 的 AC/DC 换流器端口分别连接在节点 17、21、24、32,额定容量均为 1 MVA。0.5 MW/2 MWh 的储能电池接入 E-SOP 的直流母线。配电网 DPV 承载能力评估节点分别为节点 4、12、16、21、23 和 31,每个节点的最大可接入容量为 3 MW。DPV 出力和负荷的时序曲线如图 4 所示。根据文献[31],ESS 容量健康退化模型中的漂移速率和扩散系数分别设置为 $\nu_0 \sim N(0.0043, 0.0005)$ 和 $\sigma_0 = 0.0045$ 。

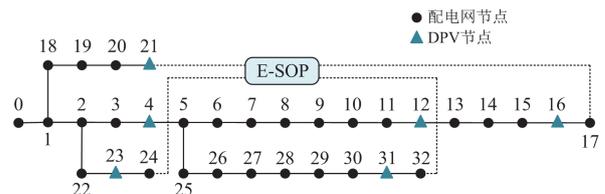


图 3 改进的 IEEE33 节点配电网
Fig. 3 Improved IEEE 33-node distribution network

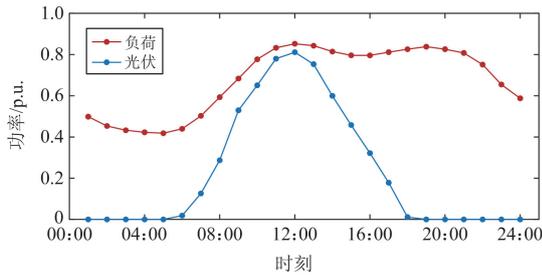


图4 DPV 出力 and 负荷需求时序曲线

Fig. 4 DPV output and load demand timing curves

3.2 ESS 容量健康退化对承载能力结果分析

E-SOP 是由 SOP 和 ESS 两个部分组成, 两者分别实现山区配电网空间和时间层面的潮流灵活调整。而 ESS 容量健康退化将会削弱 E-SOP 的潮流调节能力进而影响山区配电网 DPV 承载能力。因此, 本节首先根据式(12)和式(13)的 Wiener 退化模型绘制了 ESS 容量健康退化程度及 ESS 容量随使用寿命变化的曲线, 如图 5 所示。观察图 5 可知, 随着使用寿命的增加, ESS 容量健康退化程度单调上升, ESS 容量逐渐降低, 直至衰减至 0 MWh, 这与 1.2 节所建模型的描述基本吻合。

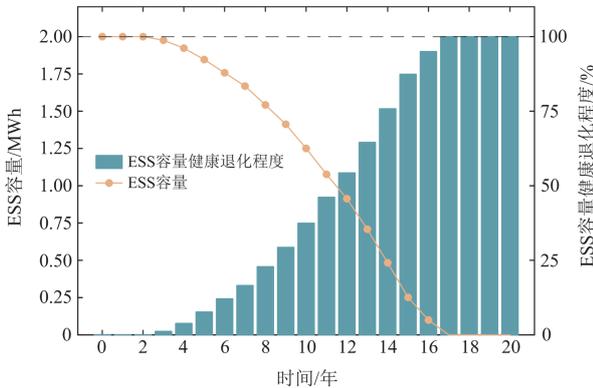


图5 ESS 容量健康退化程度和 ESS 容量随寿命增加的变化曲线

Fig. 5 ESS capacity health degradation level and the curve of ESS capacity changes over its lifespan

基于图 5 对 ESS 容量健康退化程度和 ESS 容量变化的刻画, 本节分别研究 3 种场景下配电网承载能力的变化曲线, 如图 6 所示。场景一: 仅考虑 E-SOP 模型; 场景二: 不考虑 E-SOP 模型; 场景三: 考虑 E-SOP 模型及 ESS 容量健康退化模型。

由图 6 可见, 引入 E-SOP 后, 场景一山区配电网 DPV 承载能力相较于未考虑 E-SOP 的场景提升了 8.43%。这是因为 E-SOP 快速潮流控制能力可实现有功/无功的时空再分配, 提高了 DPV 就地消纳

水平进而提升山区配电网 DPV 承载能力。进一步对比 3 种场景曲线可知: 在同时考虑 E-SOP 与 ESS 容量健康退化的场景下, DPV 承载能力随 ESS 使用寿命的增加呈单调递减趋势; 然而, 即便 ESS 容量衰减至 0 MWh, 场景三下的 DPV 承载能力仍高于未考虑 E-SOP 场景的结果, 这是因为 SOP 自身可提供一定的潮流调节能力, 从而维持对山区配电网 DPV 承载能力的提升效果。

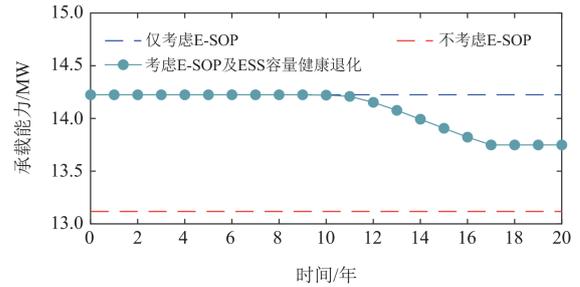


图6 3种场景下山区配电网承载能力变化曲线

Fig. 6 Load capacity variation curves of mountain distribution networks in three scenarios

进一步对比图 5 与图 6 可知, 在运行初期(0—10 年)内, 尽管 ESS 容量已显著衰减, 山区配电网 DPV 承载能力却基本保持恒定。其原因为运行初期内 E-SOP 对 ESS 的利用率较低, ESS 容量下降尚未对承载能力产生影响; 而在运行后期(10—20 年), 随着 ESS 容量健康退化程度的加剧, ESS 容量逐渐无法满足山区配电网的潮流调节需求, DPV 承载能力也就随之下降。

3.3 E-SOP 对山区配电网的影响

1) E-SOP 对配电网节点电压的影响

3.2 节结论表明, E-SOP 可以显著提升山区配电网 DPV 承载能力。为了探究 E-SOP 对山区配电网节点电压的影响, 本节绘制了“考虑 E-SOP”与“不考虑 E-SOP”两种场景下的 24 h 节点电压平均值曲线, 并进一步分析不同 ESS 容量健康退化程度下 E-SOP 对配电网节点电压的影响, 如图 7 所示。观察图 7 可以看出, 在未考虑 E-SOP 时, 配电网部分末端节点电压已跌落至安全运行下限以下; 引入 E-SOP 后, 配电网节点平均电压整体抬升, 其中末端节点改善最为显著。原因在于 E-SOP 通过有功/无功功率的实时潮流调节, 实现功率向末端节点的定向输送, 有效补偿线路压降。此外, 无论 ESS 容量健康退化程度为多少, 配电网末端节点电压水平相较于未考虑 E-SOP 时都有所提升。综上所述, E-SOP 能够提高末端节点电压幅值, 缓解山区配电网末端节点电压越限的问题, 同时 ESS 容量健康退

化对这种提升效果的影响几乎可以忽略不计。

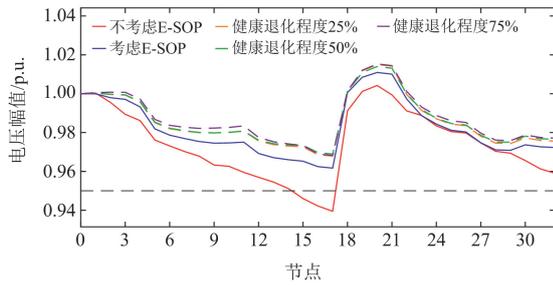
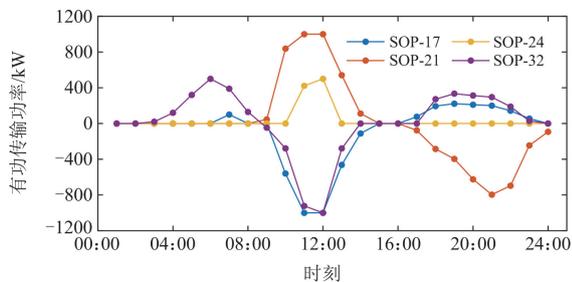


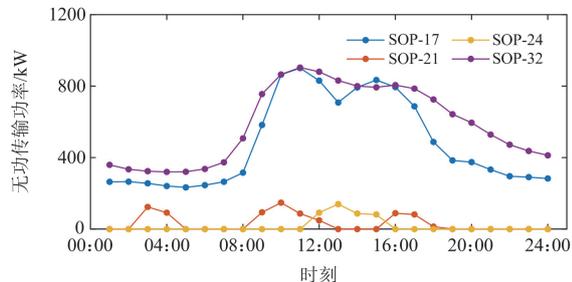
图7 山区配电网节点电压曲线

Fig. 7 Voltage curves of distribution network nodes in mountainous areas

为进一步研究 E-SOP 对配电网末端节点电压治理效果,本节将 E-SOP 各端口的有功和无功传输功率绘制成时序曲线,如图 8 所示。观察图 4 和图 8(a)可以看出, E-SOP 的有功传输功率与 DPV 出力和负荷需求时序曲线的情况相一致。在 08:00—16:00 时段, DPV 出力曲线达到最高值,产生的有功功率无法完全就地消纳,所以 E-SOP 将有功功率注入节点 21、24 以及 ESS。而在 16:00—24:00 时段, DPV 有功功率无法满足配电网末端节点电力需求,所以 E-SOP 通过 ESS 放电向节点 17、32 传输有功功率。此外,观察图 4 和图 8(b)可知,在 08:00—24:00 时段,负荷需求过大, E-SOP 向节点



(a) E-SOP各端口有功传输功率曲线



(b) E-SOP各端口无功传输功率曲线

图8 E-SOP 各端口有功、无功传输功率曲线

Fig. 8 Active and reactive transmission power curves of each port of the E-SOP

17、32 传输无功功率来提高末端节点的电压幅值。

2) E-SOP 配置方案对 DPV 承载能力的影响

E-SOP 的潮流调节能力是由 ESS 和 SOP 两者共同决定的,所以 ESS 的容量和 SOP 的接入节点必然会影响配电网 DPV 承载能力。为了探究 E-SOP 配置方案对配电网承载能力的影响,本节将 SOP 的接入节点分为 3 个方案。(1) 方案 1: SOP 接入节点分布在配电网前段,即节点 11、18、22 和 26; (2) 方案 2: SOP 接入节点分布在配电网中段,即节点 13、20、23 和 29; (3) 方案 3: SOP 接入节点分布在配电网末段,即节点 17、21、24 和 32。3 种方案在不同 ESS 容量下所得的配电网 DPV 承载能力如图 9 所示。

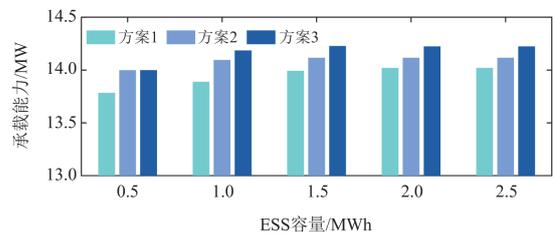


图9 不同 E-SOP 配置方案对 DPV 承载能力的影响

Fig. 9 Impact of different E-SOP configuration schemes on DPV load capacity

由图 9 可知,随着 ESS 容量的增加,配电网 DPV 承载能力也随之提高,但当 ESS 容量达到 2 MWh 后, DPV 承载能力达到极限。因此,选取 ESS 容量并非越大越好,而应该选取合适的 ESS 容量来平衡经济性和提升效果之间的关系。进一步观察可知,无论 ESS 容量如何变化,配电网 DPV 承载能力随着 SOP 接入节点向末端靠近而逐渐上升,且方案 3(即 SOP 接入节点分布在配电网末段)的 DPV 承载能力始终最高。这一现象的根本原因在于:山区配电网的 DPV 承载能力受限于末端节点的电压越限风险,而方案 3 将 SOP 接入末端节点,可最大限度发挥 E-SOP 的潮流调节潜力,缓解末端节点电压越限问题,从而有效提高 DPV 承载能力。

3) E-SOP 对山区配电网经济性的影响

为进一步分析 E-SOP 对山区配电网经济性的影响,本节依据文献[35-36]对 E-SOP、分布式光伏(DPV)的投资-运维成本及 DPV 收益进行计算,结果如表 1 所示。由表 1 可见, E-SOP 的接入虽然增加了系统的初始投资与运维费用,却显著提升了 DPV 的发电量及售电收益。尽管净收益因 E-SOP 成本而有所折减,但由此换取的 DPV 容量利用率提升、节点电压质量改善以及对上级电网购电需求的削减,在技术和经济层面均具有合理性与可接受性。

表 1 E-SOP 对山区配电网经济性的影响
Table 1 Effect of E-SOP on DPV revenue in mountain distribution network

	投资成本	运维成本	DPV 收益	净收益
未考虑 E-SOP	173.70	761.09	1467.82	533.03
考虑 E-SOP	300.39	833.27	1591.59	456.93

3.4 模型参数对承载能力结果分析

1) 漂移速率 ν 和扩散系数 σ

在 ESS 容量健康退化模型中, 漂移速率 ν 和扩散系数 σ 被分别用来刻画 ESS 容量健康退化过程的平均速率和波动幅度。3.2 节的算例表明, 该退化过程会降低配电网承载能力。为进一步研究漂移速率 ν 和扩散系数 σ 对配电网承载能力的影响, 本节将不同漂移速率 ν 和扩散系数 σ 时配电网承载能力的时序变化曲线进行对比, 如图 10 所示。

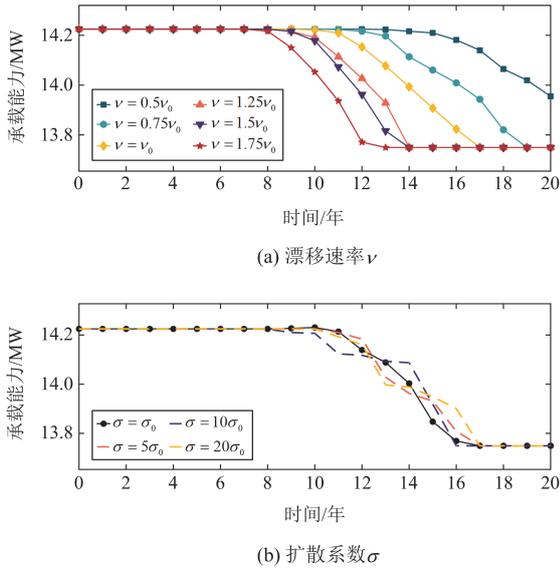


图 10 ESS 容量健康退化模型参数对山区配电网承载能力的影响

Fig. 10 Effect of drift rate on the carrying capacity of distribution network in mountainous areas

观察图 10 可以得到, 漂移速率 ν 越大, 曲线下降低越陡峭, 且起始跌落及达到最低点的时刻均提前。这是因为漂移速率 ν 的提高将加快 ESS 容量退化过程, 进而削弱 E-SOP 的潮流调节能力并影响配电网承载能力。与此同时, 扩散系数 σ 的变化未影响曲线的下降趋势以及曲线起始跌落及达到最低点的时刻, 但扩散系数 σ 越大, 曲线的波动幅度也就越大, 配电网承载能力评估的难度也就越大, 系统运行风险也随之攀升。因此, 在山区配电网规划中, 需要

采取措施尽量降低漂移速率 ν 和扩散系数 σ , 例如选用使用寿命更长的储能系统、将配电网布设于气候环境较为温和的区域等, 本文所提方法可为电网规划人员制定配置方案提供量化依据。

2) 鲁棒预算 Ψ_{Time} 和 Ψ_{Space}

为了构建双层鲁棒模型, 本文在 2.3.2 节通过分析 DPV 出力时序曲线, 构建了 DPV 出力不确定性模型, 并引入时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 和空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 来约束不确定性变量 $\bar{\alpha}_{i,t}$ 和 $\alpha_{i,t}$ 。为了分析鲁棒预算对配电网承载能力的影响, 本文将采取不同鲁棒预算时配电网承载能力进行比较, 如图 11 所示。

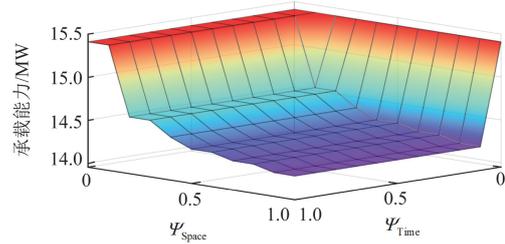


图 11 鲁棒预算对山区配电网承载能力的影响

Fig. 11 Impact of robust budgeting on the carrying capacity of distribution networks in mountainous areas

观察图 11 可以看出, 随着空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 的增加, 配电网承载能力也随之降低, 但时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 的变化并未引起配电网承载能力的变化。这是因为本文所提出的双层鲁棒模型是计算评估场景最恶劣时配电网的承载能力, 即一天中 DPV 出力最大的时刻。因此, 无论时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 取何值, 本文所提出的双层鲁棒模型所得的结果都会是一天中 DPV 出力最大时配电网的承载能力评估结果。需要注意的是, 当时间鲁棒预算 Ψ_{Time} 或空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 为 0 p.u. 时, 配电网承载能力结果最大且都为 15.4098 MW, 这是因为当两者任意一个为 0 p.u. 时, 配电网中允许出现的 DPV 出力波动的次数都为 0, 即配电网中不存在 DPV 出力波动。

此外, 观察图 11 还可以注意到, 当空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 由 0 p.u. 变为 0.1 p.u. 时, 配电网承载能力未发生变化。这是因为, 算例分析中配电网所采用的 DPV 节点个数为 6 个, 所以空间鲁棒预算 Ψ_{Space} 为 0.1 p.u. 时, 配电网允许出现的 DPV 出力波动次数为 0.6 个, 当配电网规模足够大且 DPV 节点个数足够多时, 将不会出现上述情况。

3.5 方法对比

为验证本文所提方法的优越性, 本节将所提方法、确定性模型、传统方法在不同 ESS 容量健康退

化程度下所得到的配电网承载能力结果与实际承载能力结果(从一年内的 DPV 和负荷数据中选取 100 天的数据作为典型数据, 并通过蒙特卡罗法计算得出)进行对比, 如图 12 所示。其中, 传统方法^[37]以一年中 DPV 出力最大的一天作为典型日来计算承载能力。根据 ESS 容量健康退化程度分为 4 种评估场景: I) ESS 健康退化程度为 0%; II) ESS 健康退化程度为 25%; III) ESS 健康退化程度为 50%; IV) ESS 健康退化程度为 75%。不同 ESS 健康退化程度下不同方法的评估结果如表 2 所示。

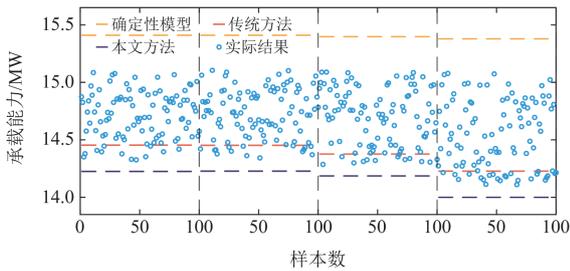


图 12 3 种方法所得承载能力结果与实际承载能力结果对比
Fig. 12 Carrying capacity results obtained by the three methods are compared with the actual carrying capacity results

图 12 表明, 随着 ESS 容量健康退化程度的加剧, 本文方法、传统方法和实际结果均呈下降趋势, 而确定性模型的结果几乎保持不变。这是因为: 1) ESS 可为配电网提供时间层面的潮流调节能力, 可有效削弱 DPV 不确定性引发的随机潮流, 实现功率实时平衡与互补, 从而提高配电网承载能力; 2) 确定性模型未计入 DPV 出力波动, 故 ESS 容量变化对其影响甚微。此外, 无论 ESS 容量健康退化程度如何, 确定性模型与传统方法的结果均存在高于实际结果的情况, 而本文方法始终低于实际结果。在工程实践中, 过高的评估结果易导致 DPV 渗透率过高从而引发安全隐患, 因而本文方法在准确性与鲁棒性方面更具优势。

表 2 不同 ESS 健康退化程度下 3 种方法的评估结果

Table 2 Evaluation results of three methods under different levels of ESS health degradation

MW			
评估方法	确定性模型	传统方法	本文方法
I	15.4098	14.4541	14.2249
II	15.4098	14.4521	14.2274
III	15.3975	14.3761	14.1857
IV	15.3784	14.2271	13.9996

为进一步验证本文所提方法与其他方法的差别, 本节将 3 种方法的计算时间进行对比, 如表 3 所示。观察表 3 可知, 本文所提方法与传统方法的

计算时间相近, 都大于确定性模型的计算时间。这是因为, 传统方法采用蒙特卡罗法对典型数据进行分析, 需要大量的计算才能够达到所需的计算精度。本文方法则构建了考虑 DPV 出力不确定性的双层鲁棒模型, 而双层鲁棒模型需要采用 KKT 条件将双层模型转化为单层模型, 这无疑大大增加了模型求解的复杂程度。虽然本文所提方法在计算时间上并未体现其优越性, 但在实际运用中, 为了获得准确性和鲁棒性更高的承载能力结果, 牺牲一定的计算时间是能够接受的。需要注意的是, 根据求解精度和不确定性模型刻画程度的实际需求, 可以选择适当的优化模型和求解方法来提高模型的求解效率。

表 3 3 种方法的计算时间

Table 3 Calculation time of three methods

s			
	确定性模型	传统方法	本文方法
计算时间	15.3338	21.5571	20.0354

3.6 本文方法的普适性分析

为验证本文所提方法的普适性, 本节构建含有多个电压等级的 98 节点配电网, 并采用 3.5 节所提出的 3 种方法对多电压等级 98 节点配电网 DPV 承载能力进行评估, 评估结果如表 4 所示。多电压等级 98 节点配电网拓扑结构如图 13 所示。其中, E-SOP 的 AC/DC 换流器端口分别连接在节点 25、50、68、97, 配电网 DPV 承载能力评估节点分别为节点 11、20、35、49、66 和 98, 每个 DPV 节点的

表 4 多电压等级配电网下 3 种方法的评估结果

Table 4 Evaluation results of three methods under multi-voltage level distribution network

MW			
	确定性模型	传统方法	本文方法
评估结果	33.3965	31.6471	30.9936

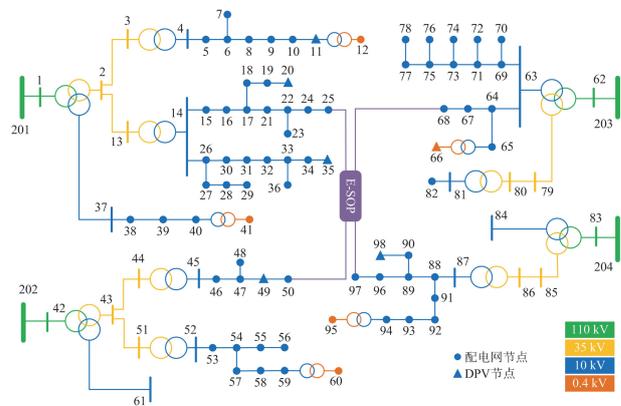


图 13 多电压等级 98 节点配电网

Fig. 13 Multi-voltage level 98-node distribution network

最大可接入容量为 8 MW。

观察表 4 可以看出, 确定性模型和传统方法所得出的结果都会高于本文方法的结果, 这一现象与 3.5 节中 IEEE33 节点配电网的评估结果分析相同。证明本文所提方法不仅适用于结构简单的小规模配电网, 同样适用于含有多电压等级的大规模配电网。

4 结论

本文基于山区配电网的特征分析, 构建考虑 ESS 容量健康退化的山区柔性配电网 DPV 承载能力双层鲁棒模型, 并在算例中采用改进 IEEE33 节点配电网进行验证。通过算例分析可以得到以下结论。

1) E-SOP 可通过主动潮流调节实现功率和负荷的时空再平衡, 显著提升了 DPV 就地消纳水平。算例分析表明, E-SOP 的引入使得山区配电网 DPV 承载能力提高了 8.43%。此外, E-SOP 可将无功功率注入末端节点, 有效抬升末端电压, 缓解电压越限问题。

2) 针对山区运行环境恶劣、运维困难的特点, 本文在 E-SOP 模型中引入基于 Wiener 退化理论的 ESS 容量健康退化模型, 刻画容量随使用寿命的变化规律。算例分析表明, 考虑 ESS 容量健康退化模型后, 山区配电网承载能力呈现逐年递减的特征, 直到 ESS 容量衰减至 0 MWh。该评估结果较未考虑 ESS 容量健康退化情形更接近工程实际, 可为电网规划人员提供更精确的决策依据。

3) 本文在确定性模型基础上, 进一步考虑 DPV 出力不确定性, 构建双层鲁棒模型, 并采用 KKT 条件将其转化为混合整数线性规划。算例分析表明, 确定性模型及传统方法存在评估结果高于实际结果的情况, 可能引发安全隐患, 而本文所建模型在准确性与鲁棒性方面均显著优于前两者。

此外, 本文为了保证所提方法所得结果的准确性和高效性, 采用了研究成果较为成熟的 Wiener 退化理论来刻画 ESS 容量健康退化过程, 但对 SOP 使用寿命以及其他 ESS 容量健康退化模型的研究还不够全面。后续工作将围绕 SOP 使用寿命以及多种 ESS 容量健康退化模型对承载能力的差异化影响展开深入研究。

参考文献

[1] 国家能源局. 《2024 年能源工作指导意见》[R]. 2024.
 [2] 文贤旭, 周科, 张俊玮, 等. 基于单端口降阶模型的分布式光伏接入配电网交互影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(4): 187-196.
 WEN Xiankui, ZHOU Ke, ZHANG Junwei, et al.

Interaction effect analysis of distributed photovoltaic access to distributed network based on single-port reduced model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(4): 187-196.
 [3] 冯德品, 徐兵, 沈涛, 等. 多利益主体互动下光储系统联合配置的优化方法[J]. 山东电力技术, 2025, 52(6): 22-32.
 FENG Depin, XU Bing, SHEN Tao, et al. Optimal method for joint configuration of photovoltaic storage systems under multi-stakeholder interaction[J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(6): 22-32.
 [4] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.
 GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
 [5] 陈鑫, 王果, 闵永智, 等. 计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 1-15.
 CHEN Xin, WANG Guo, MIN Yongzhi, et al. A source-network-load-storage collaborative planning model for a distribution network considering low carbon and economy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 1-15.
 [6] PRASTIO G C, BANJAR-NAHOR K M, HARIYANTO N. Impact of load and PV unbalance on rooftop PV hosting capacity in low-voltage networks: an indonesian case study[C]// 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), June 11-13, 2025, Bochum, Germany: 635-640.
 [7] 蒋春容, 朱博汶, 周旭峰, 等. 基于分布式光伏集群控制的主动配电网电压优化策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 188-200.
 JIANG Chunrong, ZHU Bowen, ZHOU Xufeng, et al. Voltage optimization strategy for active distribution network based on distributed photovoltaic cluster control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 188-200.
 [8] 钱乙卫, 田浩, 刘财华, 等. 考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 273-281.
 QIAN Yiwei, TIAN Hao, LIU Caihua, et al. Droop control strategy of distributed photovoltaic reactive power considering probability distribution[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 273-281.
 [9] 谢芮芮, 徐铭铭, 陈薇如, 等. 配电网新能源承载力多

- 目标决策评估方法[J]. 供用电, 2024, 41(7): 99-108.
- XIE Ruirui, XU Mingmin, CHEN Weiru, et al. Multi-objective decision-making evaluation method for new energy hosting capacity of distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(7): 99-108.
- [10] 赵阳, 郝志方, 王聪, 等. 基于 SARIMA 预测的含分布式光伏主动配电网日前-日内协同优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(5): 46-58.
- ZHAO Yang, HAO Zhifang, WANG Cong, et al. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling for photovoltaic active distribution networks based on SARIMA prediction model[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(5): 46-58.
- [11] 李响, 张丹, 李秋燕, 等. 计及随机性的多分布式电源接入中压配电网承载能力评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 150-160.
- LI Xiang, ZHANG Dan, LI Qiuyan, et al. Hosting capacity evaluation of distributed generators accessing a medium voltage distribution network considering randomness[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(17): 150-160.
- [12] 赵洪山, 胡滨, 魏伟, 等. 考虑相关性的配电网分布式光伏承载能力提升方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(1): 37-46.
- ZHAO Hongshan, HU Zhen, WEI Wei, et al. A method to improve the carrying capacity of a distributed photovoltaic power distribution network considering correlation[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(1): 37-46.
- [13] 王守相, 尹孜阳, 赵倩宇. 考虑多供电层级耦合的中低压配电网分布式光伏承载力一体化精细评估方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(6): 1930-1944.
- WANG Shouxiang, YIN Ziyang, ZHAO Qianyu. A precise distributed PV hosting capability evaluation method for MV and LV distribution network considering the coupling of multiple power supply layers[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(6): 1930-1944.
- [14] HOKE A, BUTLER R, HAMBRICK J, et al. Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 350-357.
- [15] HOKE A, TUTLER R, HAMBRICK J et al. Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 350-357.
- [16] 邓美玲, 陈永进, 白振毅. 基于静态电压稳定裕度的配电网分布式光伏承载能力量化方法[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-25[2025-11-19]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.357>
- DENG Meiling, CHEN Yongjin, BAI Zhenyi. Quantification method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution networks based on static voltage stability margin[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*: 1-25[2025-11-19]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.357>
- [17] 李继宇, 江修波, 李功新. 考虑用户期望及低碳效益的分布式电源优化配置[J]. *电气技术*, 2019, 20(8): 11-17.
- LI Jiyu, JIANG Xiubo, LI Gongxin. Optimal distributed power supply configuration considering user expectations and low carbon benefits[J]. *Electrical Engineering*, 2019, 20(8): 11-17.
- [18] LAKSHMI S, GANGULY S. Simultaneous optimisation of photovoltaic hosting capacity and energy loss of radial distribution networks with open unified power quality conditioner allocation[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(12): 1382-1389.
- [19] ZULU E, HARA R, KITA H. An efficient hybrid particle swarm and gradient descent method for the estimation of the hosting capacity of photovoltaics by distribution networks: energies[Z]. 2023.
- [20] KHARAYAT P S, SEMWAL G, SHARMA S, et al. Multiple distributed PV locations and hosting capacity determination using GA and GWO algorithm[C] // 2023 International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology (ICSEIET), September 14-15, 2023, Ghaziabad, India: 351-356.
- [21] SHEN Xiaojun, FENG Jun, WANG Yidan, et al. An improved particle swarm optimization-based method for assessing distributed photovoltaic hosting capacity in power grids[C] // 2025 2nd International Conference on Smart Grid and Artificial Intelligence (SGAI), March 21-23, 2025, Changsha, China: 617-620.
- [22] 李翠萍, 王艳丽, 朱星旭, 等. 基于二阶锥松弛最优潮流的 Copula 函数与鲁棒加权 K-Means 方法的光伏承载能力评估[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(2): 74-88.
- LI Cuiping, WANG Yanli, ZHU Xingxu, et al. Copula function based on second-order cone relaxation optimal power flow and robust weighted K-Means method for PV carrying capacity evaluation[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(2): 74-88.
- [23] 龚锐, 李华强, 许立雄. 面向配电网综合承载力提升的储能优化配置方法[J]. *电网技术*, 2025, 49(9): 3860-3869.
- GONG Rui, LI Huaqiang, XU Lixiong. Optimal allocation method of energy storage systems for improving the comprehensive carrying capacity of distribution network[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(9): 3860-3869.

- [24] RAWAT T, GARG A, PANDEY V C, et al. Coordinating storage and demand response to increase photovoltaic hosting capacity in distribution grid[C] // 2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems (ISTEMS), April 26-27, 2024, Dehradun, India.
- [25] 方一晨, 张沈习, 程浩忠, 等. 含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 8-17.
FANG Yichen, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Robust optimization of distributed photovoltaic hosting capacity of active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 8-17.
- [26] 姚天宇, 李勇, 乔学博, 等. 计及安全边界和智能软开关协同配置的配电网分布式光伏准入容量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 63-70.
YAO Tianyu, LI Yong, QIAO Xuebo, et al. Hosting capacity optimization of distributed photovoltaic in distribution network considering security boundary and coordinate configuration of SOP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 63-70.
- [27] TIAN Xu, HUANG Cunqiang, AN Juan, et al. Optimal SOP configuration for improving the carrying capacity of DG in distributed network[C] // 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), May 10-12, 2024, Harbin, China.
- [28] ZHANG J, WANG T, LIAO Z, et al. Optimal operation strategy for distribution network with high-penetration distributed PV based on soft open point and multi-device collaboration[J]. Energy, 2025, 325.
- [29] 颜湛, 邢海军, 郑真, 等. 考虑电压稳定的含 E-SOP 配电系统分布式电源双层规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(8): 28-37, 48.
YAN Zhan, XING Haijun, ZHENG Zhen, et al. Two-layer planning for distributed power supply in distribution system with E-SOP considering voltage stability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(8): 28-37, 48.
- [30] QIAN Tao, MING Wenlong, SHAO Chengcheng, et al. An edge intelligence-based framework for online scheduling of soft open points with energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(3): 2934-2945.
- [31] LENG Ruoxuan, LI Zhengmao, XU Yan. Joint planning of utility-owned distributed energy resources in an unbalanced active distribution network considering asset health degradation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(4): 3768-3781.
- [32] GUO Gan, LI Junhui, MU Gang, et al. Energy loss optimization method considering the time-varying characteristics of battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(6): 176-197.
- [33] HOU Yandong, DU Yuhang, PENG Yu, et al. An improved random effects wiener process accelerated degradation test model for lithium-ion battery[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [34] HOU Yandong, LIU Datong, PENG Yu. Accelerated degradation wiener model for lithiumion battery considering individual difference[C] // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 25-28, 2020, Dubrovnik, Croatia.
- [35] WANG Jian, ZHOU Niancheng, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning of converter-based dg units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.
- [36] ZHOU N, TAO A, WANG J, et al. Coordinated allocation of soft open point and converter-based energy storage systems in PV penetrated active distribution networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 17: 400-412.
- [37] CeYLAN O, PAUDYAL S, BHATTARAI B P, et al. Photovoltaic hosting capacity of feeders with reactive power control and tap changers[C] // 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), September 26-29, 2017, Turin, Italy: 1-6.

收稿日期: 2025-07-02; 修回日期: 2025-11-18

作者简介:

王任之(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网与规划技术; E-mail: wrzwrz0616@163.com

李培强(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源预测、电力系统运行分析与控制、智能电网与分布式发电和负荷建模。E-mail: lpqcs@hnu.edu.cn

(编辑 张颖)