

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.03.005

基于主动调控的配电网分布式电源承载力提升方法研究

王冰¹, 周燕¹, 朱莉莉¹, 张江涛¹, 贾梦青¹, 王淦², 李江²

(1. 国网河南省电力公司洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着分布式电源在配电网中渗透率日益增高及各种自动化技术不断发展, 配电网的主动调控技术也日渐成熟。为了进一步增大分布式电源接入容量, 文章提出一种基于无功补偿装置和逆变器协同主动调控的配电网分布式电源承载力提升方法。采用 Weibull 分布、Beta 分布分别刻画风电、光伏出力的随机特性, 结合蒙特卡洛模拟与 K-means 聚类生成典型源-荷场景; 构建逆变器电压-无功下垂控制与无功补偿装置的九区图协同调控机制, 实现就地快速响应与连续优化的互补配合; 建立多目标机会约束规划模型, 协同优化分布式电源的接入容量与系统运行成本, 采用改进的 NSGA-II 算法与信息熵模糊综合评价法筛选出最优规划方案。最后, 对改进的 IEEE 33 节点配电网进行仿真, 结果表明: 所提协同调控方法可有效提高配电网对分布式电源的承载力, 在故障场景下仍可有效弥补承载力损失; 在规划分析中, 可根据电网的实际情况确定机会约束条件的置信水平值, 为新能源和配电网协同规划提供技术支撑。

关键词: 配电网; 分布式电源; 承载力; 机会约束规划; NSGA-II 算法

Research on Enhancement Methods for Distributed Generation Carrying Capacity in Distribution Networks Based on Active Regulation

WANG Bing¹, ZHOU Yan¹, ZHU Lili¹, ZHANG Jiangtao¹, JIA Mengqing¹, WANG Song², LI Jiang²

(1. Luoyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Henan Luoyang 471000, China; 2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: As the penetration rate of distributed generation in distribution networks continues to increase and various automation technologies keep evolving, the active regulation technology of distribution networks has also become increasingly mature. To further increase the carrying capacity of distributed generation, in this paper a method for enhancing the distributed generation carrying capacity in distribution networks based on coordinated active regulation of reactive power compensation devices and inverters is proposed. The Weibull and Beta distributions are adopted to respectively characterize the stochastic nature of wind and photovoltaic(PV) power outputs, and typical source-load scenarios are generated by combining Monte Carlo simulation with K-means clustering. A coordinated control mechanism integrating inverter voltage-reactive power(volt-var) droop control and a nine-zone diagram strategy for reactive power compensation devices is constructed so to achieve the complementary coordination of rapid local response and continuous optimization. Furthermore, a multi-objective chance-constrained programming model is set up to co-optimize the distributed generation carrying capacity and system operating costs. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II(NSGA-II) and an information entropy-based fuzzy comprehensive evaluation method are used to screen the optimal planning scheme. Finally, the modified IEEE 33-bus distribution system is simulated. The results show that the proposed coordinated regulation approach can effectively increase the distributed generation carrying capacity and successfully mitigate capacity loss even under fault conditions. In the planning analysis, the confidence level of the chance constraints can be determined in accordance

收稿日期:2025-12-01; 修回日期:2025-12-22

基金项目:国网河南省电力公司揭榜挂帅项目(5217A0240001)。

Project Supported by State Grid Henan Electric Power Company's Unveiling and Commanding Project(5217A0240001)。

with the actual grid conditions of the power grid, providing technical support for the collaborative planning of renewable energy and distribution networks.

Keywords: distribution system; distributed generation; carrying capacity; chance-constrained programming; NSGA-II algorithm

0 引言

随着我国“双碳”战略的持续推进,配电网中分布式电源(distributed generation, DG)渗透率持续攀升,但其出力的间歇性、随机性以及接入位置的分散性,给配电网的安全稳定运行带来了极大的挑战,如何有效提升配电网的DG承载力,已成为一个亟待攻克的核心问题。现阶段储能技术、备用发电、无功补偿和需求侧响应等是提升高比例分布式电源接入配电网承载力的关键方法^[1-4],具体可归纳为资源侧、电网侧、电源侧3个方面。

资源侧核心手段为储能系统与需求侧响应。储能可在DG发电高峰吸收盈余功率平抑波动^[5],现有研究已通过选址定容与充放电策略优化验证了其承载力提升效果^[6-9],但高昂的初始投资限制了其大规模应用。需求侧响应通过电价激励引导用户高峰消纳清洁能源以优化潮流^[10-12],但调控效果依赖用户参与度,不确定性强,难以作为承载力提升的核心刚性措施。

电网侧主动调控因实施成本低、调控效果显著而成为主流研究方向,核心措施包括有载调压变压器调节、网络重构、逆变器无功调控与无功补偿装置优化^[13-17]。其中,有载调压可实现全局电压优化,但对DG引发的局部电压越限治理效果有限^[18-19];网络重构可优化潮流分布提升DG接纳能力,但仅适用于小时级稳态优化,难以适配分钟级的DG出力随机波动特性^[20-21]。静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)等无功补偿装置可通过感性无功补偿抑制DG接入引发的节点电压抬升,从而拓展DG接入空间,文献[14-15]针对此类装置对配电网DG承载力的提升效果开展研究,建立了考虑装置鲁棒优化运行的承载力评估模型。然而单一无功补偿配置不能充分挖掘DG逆变器的就地无功调控潜力,存在投资成本高、全局调控与就地响应协同不足的问题。

电源侧主动调控的核心为DG并网逆变器的无功优化控制。DG并网逆变器可实现有功出力与无功调节的解耦控制,无需额外的一次设备即可完成节点电压就地调控,我国国家标准明确DG的功率因数可在0.95(超前)~0.95(滞后)区间内灵活调节^[22]。

文献[23]通过逆变器功率因数调节提升了分布式风电接入容量,文献[24-25]进一步考虑功率因数控制与有功削减约束,分析了配电网主动管理对DG接纳能力的影响。然而,单一逆变器无功调节能力受DG有功出力约束显著,发电高峰期剩余无功容量有限,难以应对高渗透率场景下的深度电压越限问题。

针对单一逆变器无功调控与单一无功补偿装置的局限性,国内外学者已围绕二者协同优化开展系列研究:文献[26]结合SVG、并联电容器与光伏逆变器无功特性,采用单纯形法完成配电网无功优化,验证了二者协同调控的可行性,但该方法仅适用于线性优化问题,难以适配配电网无功-电压的强非线性特性;文献[27]构建了三级无功优化架构,经工程实例验证了协同方案的治理成效,文献[28]建立了逆变器与磁控电抗器的无功电压协调控制模型,通过改进量子粒子群算法实现了网损与电压偏差的协同优化,但两者仅聚焦运行层面的优化控制,未从规划层面开展DG承载力提升的量化分析与多目标优化,无法直接支撑承载力提升的规划设计;文献[29]融合逆变器调控、无功补偿与网络重构,建立了光伏接入容量最大、经济性最优的多目标优化模型,实现了配电网光伏承载力45.62%的提升,但未考虑源荷时序不确定性与约束置信水平的影响,方案在随机运行场景中的适应性不足。

逆变器与无功补偿协同优化可有效解决反向潮流引发的电压安全问题,释放新能源并网空间,针对现有研究中二者控制机制缺乏精细化设计、运行侧调控策略与规划环节脱节、源荷不确定性处理不足等问题,本文提出一种基于主动调控的配电网DG承载力提升方法,在计及源荷时空随机波动并构建多维典型场景的基础上,创新性构建了基于“九区图”的逆变器与无功补偿双维协同调控机制,实现就地快速响应与连续优化的互补配合。为兼顾承载力与运行经济性,将该协同调控机制嵌入规划优化环节,建立多目标机会约束规划模型,设计融合正态分布交叉与自适应变异策略的改进NSGA-II算法,结合信息熵模糊综合评价法完成最优方案筛选,有效破除了高维非线性寻优的收敛瓶颈。此外,本文进一步揭示了多维安全约束置信水平对承

载力边界的非线性驱动机制,为配电网精细化、差异化的源网协同规划提供了关键的量化理论依据。

1 分布式电源接入限制因素

1.1 分布式电源接入容量

含分布式电源接入的配电网的典型结构如图1所示。

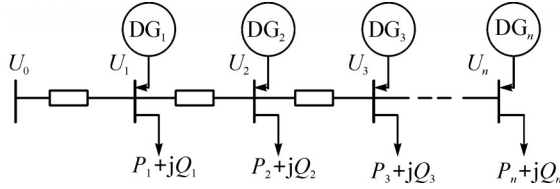


图1 含DG接入的配电网
Fig. 1 Distribution network with DG integration

系统中任意节点 k 的电压公式为

$$U_k = U_0 - \sum_{i=1}^k \frac{r l_i \sum_{j=1}^N (P_j - P_{DG,j}) + x l_i \sum_{j=1}^N (Q_j - Q_{DG,j})}{U_{i-1}} \quad (1)$$

式中: U_0 为配电网平衡节点的电压值; U_{i-1} 为节点 $i-1$ 的电压值; P_j 和 Q_j 分别为节点 j 上接入的有功负荷和无功负荷; $P_{DG,j}$ 和 $Q_{DG,j}$ 为节点 j 上接入的DG容量大小; r 和 x 为系统线路单位长度的电阻和电抗; l_i 为节点 i 和节点 $i-1$ 之间的线路长度。

根据式(1)可知,当DG输出的有功功率超过本地负荷需求时,将引发配电网潮流的反向流动,导致接入节点电压升高,DG容量增大至系统允许临界值时,会引起节点电压越限及线路过载。因此,配电网对分布式电源的承载力可由其所能接纳的分布式电源最大容量表示。

1.2 配电网负荷裕度及源-荷场景生成

配电网负荷固有的时序波动性与分布式电源出力的随机间歇性,会改变系统的潮流分布与电压稳定边界,因此需要根据配电网的运行要求保持一定的负荷裕度^[30-35]。本文采用连续潮流法研究DG接入后对负荷裕度的影响,通过逐步增加系统负荷,追踪系统运行状态至电压稳定极限,负荷裕度即为电压崩溃点对应负荷与初始负荷的差值。不同DG接入容量下的负荷裕度如图2所示。由图可知,DG的接入可为系统提供额外有功功率,提高临界崩溃功率,从而提高整体负荷裕度,且在满足各项约束的条件下,接入容量越大,提升效果越显著。

为精准量化风光出力的随机波动特性,本文分别采用两参数Weibull分布与Beta分布构建风电与光伏的出力概率模型。对于风电出力,采用两参数Weibull分布进行描述,其概率密度函数为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中: v 为风机叶轮处的风速; k 为形状参数,描述概率密度分布的偏斜度; c 为尺度参数,描述风电场的平均风速。对于分布式光伏电源出力,采用Beta分布来描述,其概率密度函数为

$$f_r\left(\frac{r}{r_{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中: r 为实际的太阳辐射强度; $r_{\max}$ 为太阳辐射强度最大值; α 、 β 为分布的形状参数; $\Gamma(g)$ 为Gamma函数。

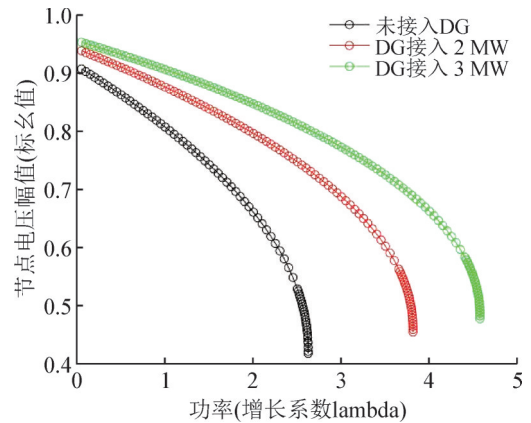


图2 不同DG接入容量下负荷裕度
Fig. 2 Load margin under different DG integration capacities

基于风光出力概率分布模型,本文采用蒙特卡洛法生成5000组包含风电、光伏出力与负荷需求的24h时序源-荷场景,为降低优化求解的计算复杂度,采用K-means聚类算法进行冗余场景削减,生成典型场景集,为后续机会约束规划模型的求解提供场景支撑。

1.3 逆变器及无功补偿的控制策略

1.3.1 逆变器电压-无功下垂控制

DG并网逆变器采用电压-无功下垂控制(volt-var control, VVC),无需额外一次设备即可实现节点电压的就地连续无功调控,电压-无功曲线如图3所示,控制数学表达式为

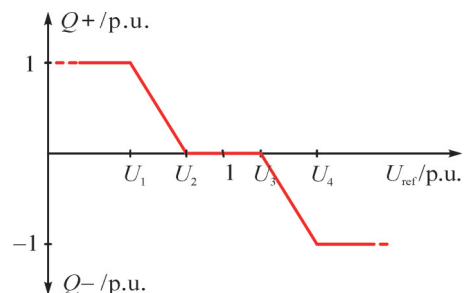


图3 电压-无功曲线
Fig. 3 Volt-var curve

$$Q = \begin{cases} Q_{\text{inv}}, & U < U_1 \\ \frac{U - U_2}{U_1 - U_2} Q_{\text{inv}}, & U_1 \leq U \leq U_2 \\ 0, & U_2 < U < U_3 \\ \frac{U - U_3}{U_3 - U_4} Q_{\text{inv}}, & U_3 \leq U \leq U_4 \\ -Q_{\text{inv}}, & U > U_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q 为逆变器输出的无功功率; Q_{inv} 为逆变器可输出最大无功功率; U 为逆变器端口实时电压; U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为电压分段阈值, 分别取 0.93、0.98、1.02、1.07。

1.3.2 九区图协同调控机制

为充分发挥逆变器快速就地响应与无功补偿装置的协同优势, 本文构建基于节点电压与无功功率的双维度九区图协同调控机制。该机制将节

点运行状态划分为 9 个区域, 如图 4 所示。针对不同区域的运行特性制定差异化控制策略, 核心调控原则为优先保障节点电压安全, 优先采用响应速度更快的逆变器进行就地调控, 再通过网侧无功补偿装置进行补充优化, 具体协同调控机制如表 1 所示。

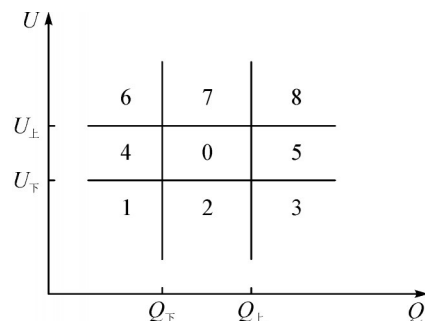


图4 九区图区域划分

Fig. 4 Zone division of nine-zone diagram

表1 逆变器与无功补偿装置协同调控机制

Table 1 Coordinated control mechanism of inverters and reactive power compensation devices

运行区域	运行状态	控制策略
0区	正常运行	不动作
1区	电压越下限, 无功越下限	逆变器优先升压, 再投入无功补偿装置
2区	电压越下限, 无功正常	逆变器升压
3区	电压越下限, 无功越上限	逆变器优先升压, 无功补偿装置辅助(可牺牲无功合格)
4区	电压正常、无功越下限	投入无功补偿装置
5区	电压正常、无功越上限	切除无功补偿装置
6区	电压越上限、无功越下限	逆变器优先降压, 无功补偿装置辅助(可牺牲无功合格)
7区	电压越上限、无功正常	逆变器降压
8区	电压越上限、无功越上限	逆变器优先降压, 再切除无功补偿装置

2 配电网 DG 承载力提升机会约束规划模型

2.1 目标函数

本文将同时考虑 DG 接入容量和运行成本, 构建配电网 DG 承载力提升的多目标机会约束规划模型, 目标函数具体如下:

1) DG 接入容量最大。公式为

$$f_1 = \max(\sum_{i \in D} P_{\text{DG},i}) \quad (5)$$

式中: D 为系统中接入 DG 的节点集合; $P_{\text{DG},i}$ 为节点 i 接入 DG 的容量。

2) 运行成本最小。公式为

$$f_2 = \min(f_{\text{cost}} + f_{\text{loss}} + f_{\text{oml}}) \quad (6)$$

$$f_{\text{cost}} = c_1 \sum_{i \in S_c} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} Q_i^{\text{SVC}} \quad (7)$$

$$f_{\text{oml}} = c_2 \sum_{i \in S_c} Q_i^{\text{SVC}} \quad (8)$$

$$f_{\text{loss}} = c_3 \sum_{l=1}^L Z_l |I_l|^2 \quad (9)$$

式中: f_{cost} 为无功补偿设备安装总成本; f_{loss} 为系统运行损耗成本; f_{oml} 为无功补偿设备运维成本; r 为设备的贴现率; y 为设备使用年限; c_1 、 c_2 和 c_3 分别为无功补偿装置单位容量投资成本、单位容量运行维护成本和单位有功网损成本; Q_i^{SVC} 为无功补偿设备安装容量。

2.2 约束条件

约束条件主要分为两部分: 配电网的安全稳定约束和 DG 承载力提升措施的设备约束, 具体表达如下:

1) 潮流功率平衡约束, 公式为

$$\begin{cases} P_{G,i} + P_{\text{DG},i} - P_{L,i} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{G,i} + Q_{\text{DG},i} - Q_{L,i} + Q_i^{\text{SVC}} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{G,i}$ 和 $Q_{G,i}$ 为节点 j 的发电机发出的有功和无功功率; $P_{DG,i}$ 和 $Q_{DG,i}$ 为节点 j 的 DG 发出的有功和无功功率; $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 为节点负荷所需有功和无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 为支路 ij 的电导和电纳; θ_{ij} 为节点 ij 的相角差。

2) 节点电压约束

采用机会约束的具体表示形式为

$$\Pr\{V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max}\} \geq \beta_V \quad (11)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 为事件发生的概率; β_V 为系统节点电压约束的置信空间; V_i 为节点 i 的电压值, 其可行域为 $[V_{i,\min}, V_{i,\max}]$, 下标 $\max$ 与 $\min$ 分别表示相应变量允许的上、下限。

3) 线路载流量约束

采用机会约束的具体公式为

$$\Pr\{|I_l| \leq I_{l,\max}\} \geq \beta_l \quad (12)$$

式中: I_l 为线路 l 流过的电流; $I_{l,\max}$ 为线路允许流过的最大电流; β_l 为系统支路载流量约束的置信空间。

4) 变压器反向负载率约束

若电网潮流反送容量超过变压器设备额定容量的 80%, 则系统不能增加新能源容量, 采用机会约束的具体公式为

$$\Pr\left\{\frac{P_{\text{wind}} + P_{\text{pv}} - P_L}{S_T} \leq \lambda_{\max}\right\} \geq \beta_T \quad (13)$$

式中: P_{wind} 、 P_{pv} 为 t 时刻分布式风机和分布式光伏的输出功率; P_L 为配电网的等效负荷; $\lambda_{\max}$ 为系统最大的反向负载率, 取 80%; β_T 为变压器设备约束的置信空间。

5) 无功补偿装置约束

无功补偿装置主要采用连续型无功补偿装置 SVC, 其接入位置和容量的不同对节点电压的影响程度也不同, 本文采用基于网损灵敏度方法^[36]确定无功补偿装置的最佳接入位置, 无功功率约束公式为

$$Q_{i,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_i^{\text{SVC}} \leq Q_{i,\max}^{\text{SVC}} \quad (14)$$

式中, Q_i^{SVC} 为节点 i 的补偿容量, 其可行域为 $[Q_{i,\min}^{\text{SVC}}, Q_{i,\max}^{\text{SVC}}]$ 。

6) 分布式电源调控约束

分布式电源的调控措施分为有功功率调节和无功功率调节, 其约束公式为

$$P_{\text{DG}}/P_{\text{DG}}^N \leq \alpha \quad (15)$$

$$-Q_{\max} \leq Q_{\text{DG},i} \leq Q_{\max} \quad (16)$$

式中: P_{DG} 为分布式电源的实际输出功率; P_{DG}^N 为分布式电源的额定输出功率; α 为国家能源局规定的

弃能率大小; $Q_{\max}$ 为分布式电源无功功率的最大调节容量。

3 配电网承载力提升模型求解方法

本文构建的数学优化模型属于多目标约束规划问题, 采用改进的 NSGA-II 算法与基于信息熵的模糊综合评价法相结合对模型进行求解。

3.1 Pareto 解集的生成

NSGA-II 算法通过融合快速非支配排序、精英保留策略和动态拥挤度评估解决了传统遗传算法在多目标优化问题中收敛性与多样性难以协同的问题, 本文针对配电网 DG 承载力优化的模型特征, 对 NSGA-II 算法的交叉与变异环节进行改进, 提升算法全局搜索能力与收敛性能。

算法中每个个体对应一组完整规划方案, 染色体由各节点 DG 接入容量、无功补偿装置安装容量两类决策变量编码构成。为提升 NSGA-II 算法空间搜索的能力, 在交叉环节引入正态分布交叉算子。将父代种群记为 p_1 、 p_2 , 利用正态分布交叉算子产生子代 o_1 、 o_2 , 对于第 i 个变量, 首先生成一个随机数 $r \in (0, 1]$ 。

当 $r \leq 0.5$ 时, 子代计算公式为

$$\begin{cases} o_{1,i} = \frac{p_{1,i} + p_{2,i}}{2} + \frac{1.481(p_{1,i} - p_{2,i})|N(0, 1)|}{2} \\ o_{2,i} = \frac{p_{1,i} + p_{2,i}}{2} - \frac{1.481(p_{1,i} - p_{2,i})|N(0, 1)|}{2} \end{cases} \quad (17)$$

当 $r \geq 0.5$ 时, 子代计算公式为

$$\begin{cases} o_{1,i} = \frac{p_{1,i} + p_{2,i}}{2} - \frac{1.481(p_{1,i} - p_{2,i})|N(0, 1)|}{2} \\ o_{2,i} = \frac{p_{1,i} + p_{2,i}}{2} + \frac{1.481(p_{1,i} - p_{2,i})|N(0, 1)|}{2} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $N(0, 1)$ 为正态分布的随机变量。

变异环节采用自适应调整变异策略, 平衡算法收敛性与种群多样性从而得到分布更佳的 Pareto 边界。种群中每个个体的变异概率及每个个体的适应度表达式为

$$P_n(X_i) = 2 \cdot \bar{P}_n - e(X_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

$$e(X_i) = \frac{E(X_i)}{\sum_{j=1}^N E(X_j)} \bar{P}_n \cdot N, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

由上述两个式子可得平均变异概率表达式为

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_n(X_j) = \bar{P}_n \quad (21)$$

式中: $e(X_i)$ 为种群中每个个体的适应度; $E(X_i)$ 为种

群中每个个体 X_i 的适应度评价函数; $P_n(X_i)$ 为个体变异概率; $\bar{P}_n$ 为平均变异概率, N 为个体数。

3.2 基于信息熵的模糊综合评价指标

基于生成的 Pareto 解集,采用基于信息熵的模糊综合评价方法进行决策,输出最终的实施方案。首先,针对 DG 接入容量最大化、系统运行成本最小化两个量纲与优化方向不同的目标函数,分别构建模糊隶属度函数量化单目标满意度;其次,采用信息熵权重法对各目标函数进行客观赋权,信息熵值越小,对应目标包含的判别信息越充分,分配权重越高。最后,结合模糊满意度矩阵与客观权重向量,计算第 j 个解的综合标准化满意度。具体求解步骤见附录 A₁。

3.3 模型求解流程

针对 DG 接入配电网承载力提升机会约束规划模型,采用改进的 NSGA-II 算法与信息熵模糊综合评价法的具体流程如图 5 所示。

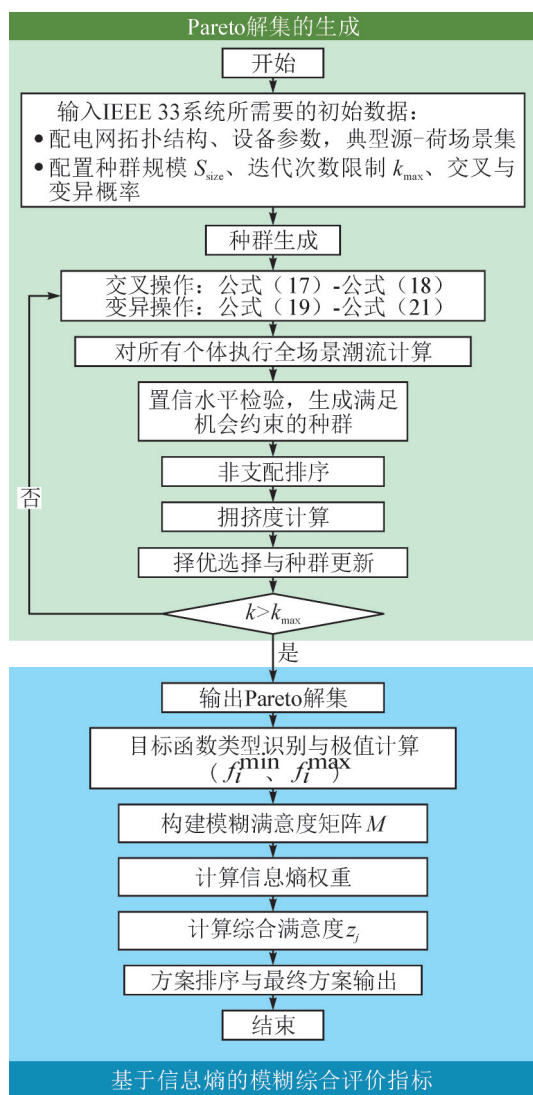


图5 配电网承载力提升模型求解流程图

Fig. 5 Solution flowchart of the distribution network carrying capacity enhancement model

4 算例分析

4.1 算例设置及参数说明

本文采用商业求解器 CPLEX 对上述所提数学模型进行求解,仿真模型采用改进的 IEEE 33 节点配电网系统进行仿真分析,详见附录 B₁图 B₁。

基准电压为 12.66 kV,基准容量为 100 MVA;节点 1 为平衡节点,幅值为 1.0 p.u.;配电网节点电压的安全限值范围为 [0.93, 1.07];配电网线路采用 LGJ-240 线型,允许流过的最大电流为 340 A;配电网变压器传输容量 6 MVA;负荷为 3.75+j2.3 MVA;鉴于风光出力的强随机性,采用 100% 的刚性约束会导致极大的投资冗余,为权衡配电网安全性与经济性,各机会约束的置信水平取 0.95^[37-38]。在节点 7、13 接入分布式风机,在节点 19、32 接入分布式光伏,功率因数限值设置为 0.95;基于某地历史风速、光照数据,拟合得到风电 Weibull 分布的形状参数 $k=2.1$ 、尺度参数 $c=8.2$ m/s,光伏 Beta 分布的形状参数 $\alpha=0.82$ 、 $\beta=0.63$ 。同时基于网损灵敏度法将无功补偿装置的选址设为节点 15 和节点 30,补偿容量区间为 [-0.6, 0.6] Mvar,经济成本参数详见附录 B₂表 B₁,典型场景下的风电出力曲线、光伏出力曲线、负荷曲线详见附录 B₃图 B3-1、图 B3-2、图 B3-3。NSGA-II 中,将种群规模设置为 80,迭代次数为 80,交叉概率设定为 0.7,变异概率设定为 0.3。

4.2 调控措施对 DG 承载力提升效果

4.2.1 改进的 NSGA-II 算法性能验证

本小节首先分别采用无偏最优解、基于模糊理论的 Pareto 最优解与本文方法进行配电网 DG 承载力计算对比,结果如附录 B₄表 B4-1 所示,证实了本文所提多目标决策框架的有效性;进而,通过将标准 NSGA-II 算法与本文改进 NSGA-II 算法进行综合性能对比(见附录 B₄表 B4-2 和图 B4-1),从收敛速度、寻优精度及 Pareto 解集分布 3 个维度,量化分析了改进策略对提升算法全局搜索能力与解集多样性的积极作用。综合结果表明,改进算法能更高效地收敛于全局最优,有效拓宽承载力寻优上限,为配电网规划提供了极端边界更广的候选方案库,具备良好的工程适用性。

4.2.2 配电网承载力优化提升效果对比

本小节主要研究配电网主动管理调控措施对分布式电源接入配电网承载力大小提升的影响,分析如下几种场景的分布式电源承载力提升效果:

场景 1:不采取任何调控措施;

场景 2:仅考虑分布式电源逆变器调节;

场景 3:仅考虑投入无功补偿设备;

场景 4:协同利用分布式电源逆变器调节与无功补偿设备。

图 6 比较了 4 种场景下,采用本文所提改进 NSGA-II 算法与信息熵模糊综合评价法求解得到的各节点分布式电源接入容量。

表 2 则给出了不同场景下,系统网损、分布式电源的承载力大小及提升结果。

仿真结果表明,各类主动调控措施均可有效提升配电网 DG 承载力、降低系统网损,且协同调控方案综合性能最优。场景 2,DG 承载力较基准场景提升 19.04%,网损下降 2.63%,但提升效果受逆变器无功容量约束显著。场景 3,DG 承载力提升 29.12%,网损下降 29.61%,调压降损效果更优,但未充分挖掘 DG 侧就地调控潜力。本文协同调控方案充分发挥两类措施的互补优势,DG 承载力提升至 12.00

MW,较基准场景提升 32.89%,网损降幅达 33.55%,实现了承载力提升与降损增效的协同优化。

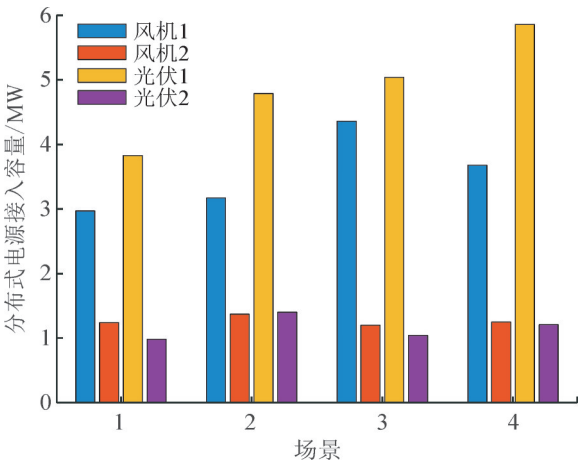


图 6 不同场景下的分布式电源承载力大小
Fig. 6 Distributed generation carrying capacity in different scenarios

表 2 不同管理调控措施对配电网 DG 承载力提升大小
Table 2 DG carrying capacity enhancement in distribution networks through different control measures

场景	逆变器调控	无功补偿	风机接入容量/MW		光伏接入容量/MW		网损/MW	承载力大小/MW	承载力提升/%
			7	13	19	32			
1	×	×	2.97	1.24	3.83	0.98	1.52	9.03	—
2	√	×	3.17	1.37	4.79	1.40	1.48	10.75	19.04
3	×	√	4.36	1.20	5.04	1.04	1.07	11.66	29.12
4	√	√	3.68	1.25	5.86	1.21	1.01	12.00	32.89

表 3 展示了不同管理调控措施经济性对比,由表 3 可知,场景 2 在配电网运行周期内的有功损耗较场景 1 下降了 2.6%,有功功率损耗成本为 2.22 万元;场景 3 有功功率损耗较场景 1 下降了 29.6%,有功功率损耗成本为 1.61 万元;场景 4 有功功率损耗较场景 1 下降了 33.55%,有功功率损耗成本为 1.52 万元,其核心经济性优势来源于两方面:一是协同调控实现了无功资源的最优配置;二是网损的大幅下降带来持续的运行成本节约,形成长期稳定的经济效益。

表 3 不同管理调控措施经济性对比
Table 3 Economic comparison of different management, regulation and control measures

场景	系统有功损耗成本/万元	无功补偿设备安装成本/万元	无功补偿设备运维成本/万元
1	2.28	0	0
2	2.22	0	0
3	1.61	3.60	0.04
4	1.52	3.60	0.04

4.2.3 故障条件下配电网承载力优化提升效果对比

实际配电网运行过程中,线路短路、设备故障等频发,为验证本文所提协同调控策略在故障工况下的

适用性与有效性,选取配电网末端支路故障这一典型故障场景开展仿真分析。设定节点 31 发生永久性单相接地故障,切除节点 31、32、33 所在的末端支路,基于该故障拓扑,分析如下 3 种场景的 DG 承载力:

场景 1:正常运行条件不采取任何调控措施(基准工况);

场景 2:故障运行条件下不采取任何调控措施;

场景 3:故障运行条件下协同调控分布式电源逆变器调节与无功补偿设备。

故障条件下配电网 DG 承载力提升大小见表 4。根据表 4 计算结果可知,系统发生故障后,无任何调控措施的条件下,一方面由于末端支路切除后,原节点 32 的光伏失去并网条件,直接损失可接入容量;另一方面故障后网络阻抗特性改变,潮流分布恶化,节点电压越限风险加剧,电压约束成为限制 DG 接入容量的核心约束,DG 承载力从正常工况的 9.03 MW 降至 8.52 MW,降幅达 5.65%。采用本文所提的逆变器与无功补偿协同调控策略后,系统 DG 承载力从 8.52 MW 提升至 8.74 MW,较故障无调控场景提升 2.58%,可有效弥补故障引发的承载力损失。

表4 故障条件下配电网DG承载力提升大小
Table 4 DG carrying capacity enhancement in distribution networks through different control measures

场景	逆变器调控	无功补偿	风机接入容量/MW		光伏接入容量/MW		承载力大小/MW	承载力提升/%
			7	13	19	32		
1	×	×	2.97	1.24	3.83	0.98	9.03	—
2	×	×	3.30	1.27	3.95	0	8.52	—
3	√	√	3.36	1.40	3.98	0	8.74	2.58

4.2.4 不同置信水平下的承载力

本小节采用控制变量法,分析节点电压、线路载流量、变压器反向负载率3类机会约束的置信水平(取值区间为[0.80,1.00])对DG承载力的影响,令某一约束的置信水平自1.00逐步降低,同时将其余两个约束的置信水平固定于0.95。基于此设置,对不同场景下的分布式电源承载力进行量化评估,结果汇总于表5。

表5 不同置信水平下的DG承载力大小
Table 5 DG carrying capacity at various confidence levels

置信水平	分布式电源承载力/MW		
	节点电压	线路载流量	变压器反向负载率
1.00	9.97	10.63	10.66
0.98	11.05	11.29	11.31
0.95	12.00	12.00	12.00
0.90	12.14	12.10	12.12
0.85	12.58	12.11	12.13
0.80	13.04	12.13	12.14

以正常工况下不采取任何调控措施时的承载力计算结果作为基准值,由表5中的结果可知,各约束的置信水平与DG承载力呈显著负相关,其中节点电压约束的置信水平变化对承载力的影响最为敏感:将其置信水平从1.00放宽至0.80,DG承载力由9.97 MW提升至13.04 MW,增幅达30.79%,显著高于线路载流量、变压器反向负载率约束的影响。

不同参数置信水平下配电网的分布式电源承载力如图7所示。

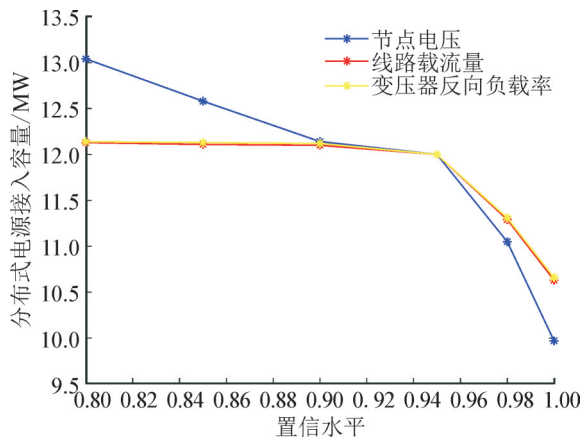


图7 不同置信水平下分布式电源承载力
Fig. 7 DG carrying capacity at various confidence levels

由图7可知,随着置信水平从1.00降至0.95,DG承载力呈快速跃升趋势;置信水平跌破0.95后,承载力增幅显著降低、曲线趋于平缓。由此可知,0.95置信水平是风光出力极端尾部场景与主体概率分布的核心分界点,置信水平高于0.95时,承载力受到发生概率不足5%的DG满发、负荷低谷等极端越限场景的限制,降低置信水平可直接剔除极端场景约束,快速释放DG接入空间;置信水平低于0.95时,约束已覆盖源荷出力的主体概率区间,可放松的仅为占比极低的边缘运行场景,承载力提升效果骤降。该结果为配电网规划阶段结合实际工况差异化、精细化设定约束置信水平提供了量化依据。

5 结语

针对高比例DG接入配电网带来的安全稳定运行挑战,本文提出了一种基于逆变器与无功补偿装置协同调控的配电网DG承载力提升方法,经算例仿真验证得到以下结论:

1)采用改进NSGA-II算法与基于信息熵的模糊综合评价法,可高效完成多目标优化模型求解与最优方案筛选,同时规避传统方法主观赋权偏差。相较传统无偏最优解与常规模糊决策方法,该方法求解得到的DG总接入容量分别提升2.38%、1.23%,系统负荷裕度分别提升8.17%、5.34%,求解时长可控制在5 s以内,满足配电网规划层面的工程计算需求。

2)通过将基于“九区图”的逆变器与无功补偿协同调控机制嵌入多目标机会约束规划模型,可实现配电网DG承载力的有效提升。相较无调控措施的基准场景,该方案使DG承载力提升32.89%,同步实现系统网损降低33.55%,破解了传统规划中承载力提升与运行经济性难以兼顾的固有矛盾,实现了二者的协同优化,在配电网故障场景下,该机制仍可有效弥补网络拓扑突变引发的承载力损失。

本文方法适用于10~35 kV辐射型中压配电网的DG规划与运行优化,工程应用中可按供电可靠性等级差异化设置置信水平,融合多维度调控手段同步开展协同优化。但本研究尚未纳入储能、网络

重构等多类调控资源,也未考虑三相不平衡、复杂环网拓扑的影响,后续将围绕上述内容开展深入研究。

参考文献

- [1] 牟晓明,李卫星. 基于节点电压强弱性辨识的风电接纳能力评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 130-135.
MU Xiaoming, LI Weixing. Wind power accommodation capability evaluation based on bus voltage strength index identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 130-135.
- [2] HASHEMI S, ØSTERGAARD J, DEGNER T, et al. Efficient control of active transformers for increasing the PV hosting capacity of LV grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 270-277.
- [3] CHEN Lijuan, DENG Zhenli, XU Xiaohui. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1021-1032.
- [4] ZIEGLER M S, MUELLER J M, PEREIRA G D, et al. Storage requirements and costs of shaping renewable energy toward grid decarbonization[J]. Joule, 2019, 3(9): 2134-2153.
- [5] 董雷,明捷,于汀,等. 分布式电源高渗透率交直流主动配电网运行控制策略[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 57-62.
DONG Lei, MING Jie, YU Ting, et al. AC/DC active power distribution network operation control strategy of distributed generation with high permeability[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 57-62.
- [6] 王俊,肖辉,陈湘元,等. 谐振接地配电网单相接地故障保护复合启动及选线方法[J]. 电瓷避雷器, 2025(2): 98-108.
WANG Jun, XIAO Hui, CHEN Xiangyuan, et al. Single-phase fault protection compound launch of resonant ground distribution grid and line selection method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(2): 98-108.
- [7] SANTOS S F, FITIWI D Z, SHAFIE-KHAH M, et al. New multistage and stochastic mathematical model for maximizing RES hosting capacity—Part I: problem formulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 304-319.
- [8] SANTOS S F, FITIWI D Z, SHAFIE-KHAH M, et al. New Multi-stage and stochastic mathematical model for maximizing RES hosting capacity—Part II: numerical results[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 320-330.
- [9] HASHEMI S, ØSTERGAARD J. Efficient control of energy storage for increasing the PV hosting capacity of LV grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2295-2303.
- [10] JAYASEKARA N, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 250-261.
- [11] 王洪坤,王守相,潘志新,等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 86-93.
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93.
- [12] 赵美超. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式电源并网规划研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018.
- [13] WONG P, KALAM A, BARR R. Modelling and analysis of practical options to improve the hosting capacity of low voltage networks for embedded photo-voltaic generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(5): 625-632.
- [14] WANG Shouxiang, CHEN Sijia, GE Leijiao, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1111-1123.
- [15] ASTERO P, SÖDER L. Improving PV dynamic hosting capacity using adaptive controller for STATCOMs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 415-425.
- [16] YAO Yiyun, DING Fei, HOROWITZ K, et al. Coordinated inverter control to increase dynamic PV hosting capacity: a real-time optimal power flow approach[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 1933-1944.
- [17] 王守相,王瀚樟,赵倩宇,等. 面向配电网光伏接纳能力提升的分时电价优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 38-46.
WANG Shouxiang, WANG Hanzhang, ZHAO Qianyu, et al. Optimization method of time-of-use electricity price for improving photovoltaic hosting capacity of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 38-46.
- [18] 丁明,刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 922-926.
DING Ming, LIU Sheng. Calculation of maximum penetration level of multi PV generation systems based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 922-926.
- [19] AL KAABI S S, ZEINELDIN H H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 785-793.

- [20] ESSALLAH S, KHEDHER A. Optimization of distribution system operation by network reconfiguration and DG integration using MPSO algorithm[J]. Renewable Energy Focus, 2020, 34: 37-46.
- [21] CAPITANESCU F, OCHOA L F, MARGOSSIAN H, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 346-356.
- [22] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 17-22.
- AI Xin, LIU Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2011, 38(3): 17-22.
- [23] CHEN Xin, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [24] ALKAABI S S, KHADKIKAR V, ZEINELDIN H H. Incorporating PV inverter control schemes for planning active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1224-1233.
- [25] SIANO P, CHEN P, CHEN Z, et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(5): 598-608.
- [26] OCHOA L F, DENT C J, HARRISON G P. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 87-95.
- [27] 陈全超. 分布式光伏并网逆变器无功补偿技术的设计与应用研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(21): 98-100.
- CHEN Quanchao. Research on design and application of reactive power compensation technology for distributed photovoltaic grid-connected inverters[J]. Automation Application, 2025, 66(21): 98-100.
- [28] 王海云, 陈茜, 张琳钰, 等. 基于电压分区权重自适应的光伏逆变器和磁控电抗器的配电网无功电压协调控制[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(6): 136-146.
- WANG Haiyun, CHEN Qian, ZHANG Linyu, et al. Coordinated reactive voltage control of distribution network with photovoltaic inverter and magnetically controlled reactor based on adaptive voltage partition weights[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(6): 136-146.
- [29] 李黄强, 赵发金, 舒征宇, 等. 考虑多种调控手段的分布式光伏承载力提升优化模型[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(2): 82-87.
- LI Huangqiang, ZHAO Fajin, SHU Zhengyu, et al. Enhancement optimization model for distributed photovoltaic hosting capacity considering multiple adjustment methods[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(2): 82-87.
- [30] 崔娇, 苏冀, 张峻诚, 等. 考虑合环电流约束的新型配电网负荷均衡分布鲁棒优化[J]. 电测与仪表, 2026, 63(1): 123-131.
- CUI Jiao, SU Ji, ZHANG Juncheng, et al. Distributionally robust optimization of load balancing in new distribution network considering loop closing current constraints[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(1): 123-131.
- [31] 郭嘉雨, 杨祺铭, 丁苒苒, 等. 高比例可再生能源配电网两阶段自适应鲁棒弹性提升策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 174-182.
- WU Jiayu, YANG Qiming, DING Ranran, et al. Two stage adaptive robust resilience enhancement strategy for distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 174-182.
- [32] 王振中, 汤赐, 周诗卉. 基于多场景典型日的配电网光储选址定容[J]. 电池, 2025, 55(6): 1299-1306.
- WANG Zhenzhong, TANG Ci, ZHOU Shihui. Location and capacity determination for photovoltaic storage in distribution networks based on multi scenario typical days[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(6): 1299-1306.
- [33] 杨再欣, 阿敏夫, 刘小恺, 等. 电池储能在电力系统中的应用进展[J]. 电池, 2025, 55(6): 1418-1423.
- YANG Zaixin, A Minfu, LIUXiaokai, et al. Location and capacity determination for photovoltaic storage in distribution networks based on multi scenario typical days[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(6): 1418-1423.
- [34] 葛磊蛟, 郑轶文, 李小平, 等. 高比例分布式光伏接入下配电网多类型储能优化配置技术综述[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 1-11.
- GE Leijiao, ZHENG Yiwen, LI Xiaoping, et al. A review of optimal allocation technologies for multi-type energy storage in distribution networks with high penetration of DPV[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 1-11.
- [35] 樊安洁, 高正平, 张文嘉, 等. 应对多重不确定性的交直流混合配电网概率规划方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 12-22.
- FAN Anjie, GAO Zhengping, ZHANG Wenjia, et al. A probabilistic planning method for hybrid high-voltage AC/DC distribution networks under multi-dimensional uncertainties[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 12-22.
- [36] 王强强, 姚良忠, 盛万兴, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J]. 电力系统自动化,

2023, 47(18):132-141.

WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, SHENG Wanxing, et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 132-141.

[37] 龚禹生, 伍晓丽, 吴晋波, 等. 计及源-荷不确定性的主动配电网光储运行分布鲁棒机会约束优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(2): 98-106.

GONG Yusheng, WU Xiaoli, WU Jinbo, et al. Distributionally robust chance-constrained optimization method for operation of photovoltaic and energy storage in active distribution network considering source-load uncertainty[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(2): 98-106.

[38] 李景丽, 王俊诚, 张建宾, 等. 中压配电网小电流接地系统熄弧与选线方法综述[J]. 电瓷避雷器, 2025(4): 81-99.

LI Jingli, WANG Juncheng, ZHANG Jianbin, et al. Review of arc extinguishing and fault line selection methods for small current grounding systems in medium voltage distribution networks[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(4): 81-99.

作者简介:

王冰(1991—), 女, 高级工程师, 从事电气工程师工作。

周燕(1988—), 女, 高级工程师, 从事电气工程师工作。

朱莉莉(1977—), 女, 高级工程师, 从事电气工程师工作。

张江涛(1989—), 男, 高级工程师, 从事电气工程师工作。

贾梦青(1984—), 女, 高级工程师, 从事电气工程师工作。

王淦(1997—), 女, 博士, 研究方向为电力系统优化调度。E-mail: 1599364432@qq.com。

李江(1979—), 男, 教授, 研究方向为大规模电网经济调度与主动控制、电力系统同步量测技术与应用等。

附录 A₁: 基于信息熵的模糊综合评价指标

对于第 i 个目标函数和第 j 个 Pareto 解, 其满意度 μ_{ij} 计算如下:

针对分布式电源接入容量最大化目标, 采用偏大型目标函数, 表达式为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0, & f_{ij} \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_{ij} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\min} \leq f_{ij} \leq f_i^{\max} \\ 1, & f_{ij} \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (A_1-1)$$

针对设备运行成本最小化目标, 采用偏小型目标函数, 表达式如式(2)为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0, & f_{ij} \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_{ij}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\min} \leq f_{ij} \leq f_i^{\max} \\ 1, & f_{ij} \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (A_1-2)$$

式中: μ_{ij} 为第 j 个解在第 i 个目标函数上的满意度 ($i=1, 2$); f_{ij} 为第 i 个目标函数在第 j 个解处的实际值; $f_i^{\min}$ 为该目标函数在 Pareto 解集中的最小值; $f_i^{\max}$ 为该目标函数在 Pareto 解集中的最大值。当 $\mu_{ij}=1$ 时, 表示该解在此目标上达到最理想状态; $\mu_{ij}=0$ 则表示最不理想。基于此, 构建模糊满意度矩阵 M , 公式为

$$M = \begin{bmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{1,2} & \cdots & \mu_{1,m} \\ \mu_{2,1} & \mu_{2,2} & \cdots & \mu_{2,m} \end{bmatrix} \quad (A_1-3)$$

式中, m 为 Pareto 解的总数。

信息熵能够有效反映数据的不确定性, 其值越小所包含的判别信息越充沛, 应被分配更高的权重。本文采用信息熵权法对目标函数进行客观赋权以量化其在最终决策中的相对重要性。

第 i 个目标函数的信息熵 E_i 公式为

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m \mu_{ij} \ln(\mu_{ij}) \quad (A_1-4)$$

为保证公式有意义, 规定当 $\mu_{ij}=0$ 时, $\mu_{ij} \ln(\mu_{ij})=0$ 。根据信息熵值推导第 i 个目标函数的差异系数 d_i , 公式为

$$d_i = 1 - E_i \quad (A_1-5)$$

通过归一化处理获得第 i 个目标函数的权重 ω_i , 公式为

$$\omega_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (A_1-6)$$

式中, n 为目标函数的总数。最终得到归一化的客观权重向量 $W=(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$, 满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i=1$ 。结合模糊满意度矩阵与客观权重向量, 计算第 j 个解的综合标准化满意度 z_j , 公式为

$$z_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_{ij} \quad (A_1-7)$$

该指标 $z_j \in [0, 1]$ 综合表征了解 j 在所有优化目标上的整体表现, 其值越高, 表明该解的综合性能越优, 越接近决策者的理想偏好。

附录 B₁: 改进 IEEE 33 节点系统

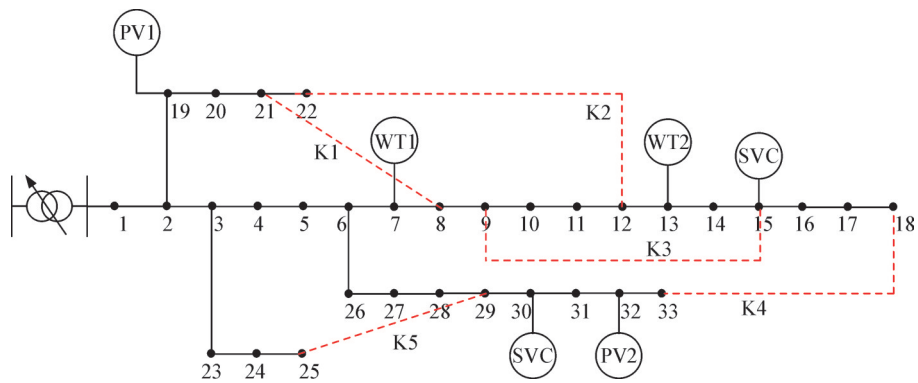


图 B1 改进 IEEE 33 节点系统
Fig. B1 Modified IEEE 33-bus system

附录 B₂: 各设备的经济成本参数

表 B1 各设备的经济成本参数
Table B1 Economic cost parameters of each equipment

参数	设备	数值
投资成本	风机	370 万元/MW
	光伏	600 万元/MW
运行寿命	无功补偿设备	2.5 万元/Mvar
	无功补偿设备	20 年
运行维护成本	无功补偿设备	0.03 万元/(Mvar·年)
贴现率	—	0.1
单位有功网损单价	—	1.5 万元/MW

附录 B₃: 典型场景下的风电出力曲线、光伏出力曲线、负荷曲线

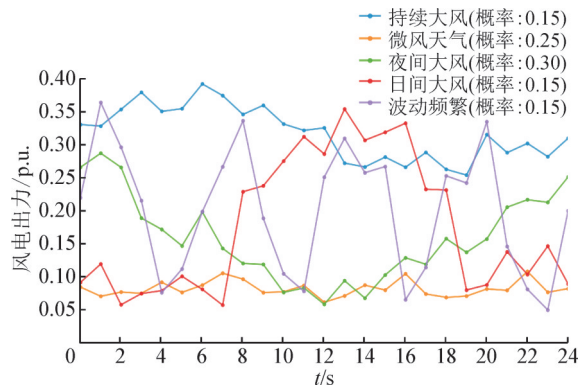


图 B3-1 风电出力典型场景曲线
Fig. B3-1 Typical scenario curves of wind power output

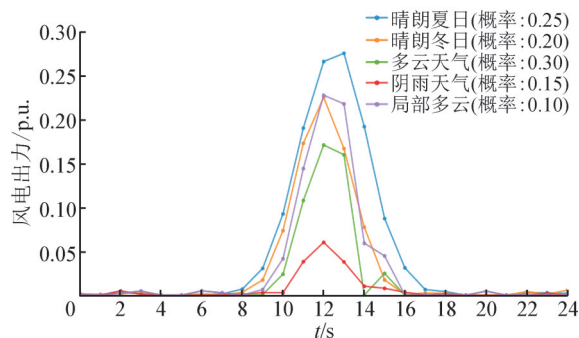


图 B3-2 光伏出力典型场景曲线
Fig. B3-2 Typical scenario curves of pv power output

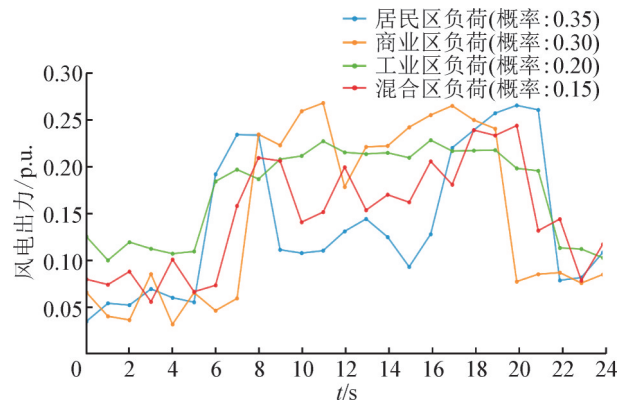


图 B3-3 典型负荷场景曲线
Fig. B3-3 Typical scenario curves of power load

附录 B₄: 本文所提算法的有效性与收敛性

本小节分别采用无偏最优解、基于模糊理论的 Pareto 最优解求解和本文所提方法进行配电网 DG 承载力计算对比,验证所提算法的有效性与收敛性,结果如表 B4-1 所示。

表 B4-1 不同算法下配电网 DG 承载力计算结果
Table B4-1 DG Hosting capacity calculation results of distribution network under different algorithms

方法	无偏最优解 接入容量/ MW	模糊理论的 Pareto 最优解 接入容量/MW	本文方法 接入容量/ MW
节点 7	2.91	2.95	2.97
节点 13	1.21	1.22	1.24
节点 19	3.75	3.79	3.83
节点 32	0.95	0.96	0.98
DG 总容量/MW	8.82	8.92	9.03
负荷裕度/p.u	8.56	8.79	9.26

由表 B4-1 可知,本文所提方法得到的配电网 DG 最优接入总容量为 9.03 MW,其中节点 7、13 分别接入分布式风机 2.97 MW 和 1.24 MW,节点 19、32 分别接入分布式光伏 3.83 MW 和 0.98 MW。较无偏

最优解方法、模糊理论 Pareto 最优解方法分别提升 2.38%、1.23%;系统负荷裕度达 9.26 p.u,较上述两种方法分别提升 8.17%、5.34%,验证了本文所提方法的有效性。

表 B4-2 标准与改进 NSGA-II 算法的综合性能对比
Table B4-2 Performance comparison between standard and improved NSGA-II algorithms

参数	组别1		组别2		组别3		组别4		组别5	
	标准	改进	标准	改进	标准	改进	标准	改进	标准	改进
种群规模	60	60	70	70	80	80	90	90	100	100
迭代次数	60	60	70	70	80	80	90	90	100	100
平均求解时长	3.548	3.235	3.776	3.564	4.223	3.861	4.651	4.173	5.138	4.416
承载力计算结果/MW	8.342	8.533	8.566	8.786	8.692	9.030	8.872	9.031	8.873	9.034

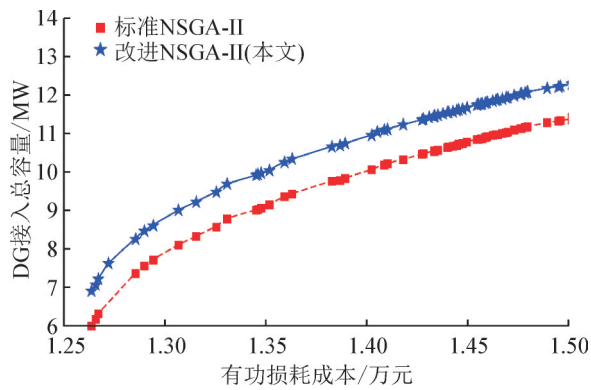


图 B4-1 标准与改进 NSGA-II 算法 Pareto 前沿分布对比
Fig. B4-1 Comparison of Pareto Front Distributions between Standard and Improved NSGA-II Algorithms

表 B4-2 与图 B4-1 分别展示了标准与改进 NSGA-II 算法的综合性能及 Pareto 前沿分布对比。

分析可知,在寻优精度方面,当种群规模为 80、迭代次数为 80 次时,改进 NSGA-II 算法的承载力计算结果已稳定在 9.030 MW,继续增大参数至 100 次迭代时,结果仅微升 0.04%,证实已收敛至全局最优;而标准算法在 100 次迭代下承载力上限仅为 8.883 MW,改进策略有效提升了极值寻优能力。在收敛速度方面,当种群规模与迭代次数均为 80 次时,改进算法已稳定收敛,且其在各测试场景下的求解时长均低于标准算法,最大参数下仍可控制在 5 s 以内,充分满足配电网规划的工程时效性需求。结合图 B4-1 可见,改进算法生成的 Pareto 前沿整体向外侧延展,在同等运行成本下可实现更高的 DG 接入容量。综上,改进 NSGA-II 算法在多目标求解的收敛性、解集分布质量及运算效率上均实现显著提升,具备优异的工程实用性。