DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.96 **中图分类号**：TM715 **文献标志码**：A

计及智能软开关的分布式电源优化配置研究

张 江，刘 谦，李毓林，陈义林，蒋 航
(三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002)

摘要：高渗透率分布式电源DG(distributed generation)的接入给主动配电网ADN(active distribution network)的运行带来了巨大挑战。考虑到智能软开关SOP(soft open point)在ADN中灵活高效的调节能力，提出了系统规划与运行优化相结合的DG与SOP三层协调规划模型。其中，上层以DG运营商单位容量年收益最大进行DG规划，中层以配电公司年综合成本最小进行SOP规划，下层以配电网络损耗最小优化系统运行状态。采用场景分析技术解决DG出力不确定性问题，提出改进灰狼算法与二阶锥规划混合算法求解模型。最后，以IEEE 33节点系统为例验证规划模型与求解算法的可行性。

关键词：主动配电网；智能软开关；分布式电源；改进灰狼算法

Research on Optimal Configuration of Distributed Generations Considering Soft Open Point

ZHANG Jiang, LIU Qian, LI Yulin, CHEN Yilin, JIANG Hang
(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The access of high-penetration distributed generations (DGs) poses significant challenges to the operation of active distribution network (ADN). With the consideration of the flexible and efficient regulation capability of soft open point (SOP) in ADN, a three-layer coordinated planning model of DG and SOP was proposed, which was combined with system planning and operation optimization. The planning of DG was determined by maximizing the annual revenue of a DG operator in the upper layer, the planning of SOP was determined by minimizing the annual comprehensive cost of distribution companies in the middle layer, and the system operation condition was optimized by minimizing the loss of distribution network in the lower layer. The scenario analysis technology was utilized to deal with the randomness of DG output, and a hybrid algorithm based on improved grey wolf optimization algorithm and second-order cone programming was put forward to solve the model. Finally, an IEEE 33-node system was taken as an example to verify the feasibility of the planning model and the corresponding solving algorithm.

Keywords: Active distribution network (ADN); soft open point (SOP); distributed generation (DG); improved grey wolf optimization algorithm

随着“双碳”目标的提出[1]，以清洁能源为主的分布式电源DG(distributed generation)在配电系统中的比重将会大幅度提升[2]。然而高比例间歇性DG接入配电网不仅会影响配电网络的潮流分布，还会产生电压波动和约束越限等问题[3-5]。

DG并入配电网后的被动管理模式严重制约其消纳能力，以主动控制、主动管理为核心的主动配电网ADN(active distribution network)相继被提出，并且针对DG在ADN中的规划问题进行了大量研究[6-7]。文献[8]采用配电网动态重构的方法改变系统拓扑结构以提高DG的接纳能力，然而受制于开关操作安全性的影响，不能够充分发挥动态重构的效果；文献[9]考虑主动管理模式分别以系统状态与DG出力构建联合优化模型，然而由于DG归属权

收稿日期：2022-09-22；**修回日期**：2022-12-10，2023-04-03；
录用日期：2023-05-08；**网络首发日期**：2023-06-13

问题难以作为提高 DG 渗透率的有效方法；文献[10]综合考虑光伏与负荷之间的相关性以及时序差异性提出了联合双层机会约束优化模型，该规划模型兼顾了短期系统运行优化与长期运行成本。

随着电力电子技术的不断成熟，以智能软开关 SOP(soft open point)为代表的新型智能配电装置为提高 DG 消纳率提供了新思路[11]。文献[12]详细分析了SOP 的运行原理、工作模式以及功率调控能力，表明SOP的功率控制能够有效提高配电系统运行潜力；文献[13]阐述了双端 SOP 基本原理和数学模型，并验证了SOP的运行优化能力以及均衡馈线负载能力；文献[14]同时考虑传统联络开关与 SOP，运用二阶锥规划与模拟退火算法求解大规模混合整数非线性优化问题，结果表明联络开关与SOP 的协调规划有效改善了配电系统电能质量，实现了配电投资与运行收益最大化；文献[15]运用遗传算法与锥优化技术对比分析了只规划 DG、先规划 DG 再规划 SOP 以及二者协调规划的 3 种方案，验证了 SOP 具有提高 DG 渗透率以及优化系统运行状态的能力。以上文献表明，以 SOP 为代表的电力电子器件作为 ADN 中的智能配电装置将成为重要研究方向，研究 SOP 与 DG 协调规划问题具有重要意义。

目前，已有大量相关文献考虑 ADN 主动管理能力进行源-网-荷协调规划 DG 并网[16]。文献[17]考虑需求侧管理与网络重构建立 3 层优化模型，采用混合优化算法研究需求侧管理和网络重构对 DG 规划结果的影响；文献[18]提出了考虑需求侧响应的增量配电网 DG 规划-运行双层协调优化模型，结果表明DG规划中纳入需求响应机制有效改善了增量配电网负荷分布特性。然而，目前鲜有文献研究电力电子器件对DG规划以及配电网络运行状态的影响，针对 DG 与 SOP 的协调规划问题更是少有报道[19]。

综上所述，本文提出计及 SOP 并入的 ADN 协调规划方法，建立 DG、SOP 以及配电系统规划与运行的 3 层联合优化模型。上层考虑 DG 运营商利益对 DG 进行选址定容，中层考虑配电公司利益对 SOP 进行选址定容，下层优化配电系统运行状态，并将相应的规划-运行方案返回中上层。针对该模型中大规模整数非线性规划问题提出改进灰狼算法与锥优化技术。最后，以 IEEE 33 节点系统进行算例分析，并验证 SOP 优化配电系统的能力，以及提升 DG 消纳率的可行性。

1　主动配电网问题描述

1.1　典型日场景构建

本文基于某地风机与光伏的历史数据，采用拉丁超立方抽样与后向场景削减技术构建能够较为准确表征该地全年风-光功率变化特性的典型日场景[20]。其中，风速采用 Weibull 分布，其概率密度函数为

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

式中：v 为风速；k、c 分别为 Weibull 分布的形状参数与尺度参数，其计算公式见文献[21]，期望与方差见文献[22]中夏季某典型日数据。风机发电功率与风速之间的关系为

$$P_{\mathrm{WT}}=\begin{cases}0 & v<v_{\mathrm{ci}},v\geqslant v_{\mathrm{co}}\\ \dfrac{v-v_{\mathrm{ci}}}{v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{ci}}}P_{\mathrm{N}} & v_{\mathrm{ci}}\leqslant v<v_{\mathrm{r}}\\ P_{\mathrm{N}} & v_{\mathrm{r}}\leqslant v<v_{\mathrm{co}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：P_{WT}、P_{N} 分别为风机输出的有功功率与额定功率；v、v_{ci}、v_{r}、v_{co} 分别为风机实际风速、切入风速、额定风速、切出风速，其中切入风速取 3 m/s，额定风速取 8 m/s，切出风速取 25 m/s。

光伏功率概率密度模型采用 Beta 分布，其概率密度函数为

$$f(P_{\mathrm{PV}})=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)+\Gamma(\beta)}\left(\frac{P_{\mathrm{PV}}}{P_{\mathrm{m}}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{P_{\mathrm{PV}}}{P_{\mathrm{m}}}\right)^{\beta-1} \tag{3}$$

式中：P_{PV} 为光伏输出功率；Γ 为 gamma 分布函数；α、β 为光照强度 Beta 分布的形状参数、尺度参数；P_{m} 为光伏最大输出功率。

1.2　SOP 控制原理及数学模型

本文以背靠背电压源型变流器 B2B-VSC (back-

to-back voltage source converter)为例，采用 2 个相同的变流器对称分布构成一个典型的二端口电力电子装置，其基本的拓扑结构如图 1 所示。

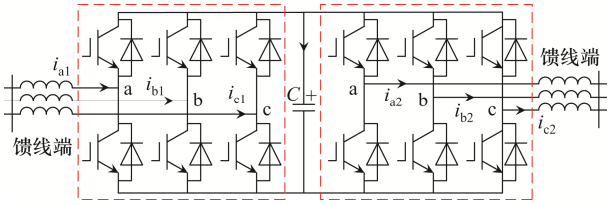


图 1 B2B-VSC 拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of B2B-VSC

SOP 工作原理及其控制模式见文献[23]，本文选取 *PQ-VQ* 控制模式。其中，一端 VSC 用于控制直流电压，另一端 VSC 用于控制功率传输，当一端 VSC 向网络注入有功功率时另一端向网络吸收有功功率，两者输送的无功功率相互独立。正常工作模式下 SOP 运行需要满足功率约束(规定向网络注入功率为正)，其 SOP 有功功率约束为

$$\begin{cases} P_i^{\text{sop}} + P_j^{\text{sop}} + P_{i,\text{loss}}^{\text{sop}} + P_{j,\text{loss}}^{\text{sop}} = 0 \\ P_{i,\text{loss}}^{\text{sop}} = A_i^{\text{sop}} \sqrt{(P_i^{\text{sop}})^2 + (Q_i^{\text{sop}})^2} \\ P_{j,\text{loss}}^{\text{sop}} = A_j^{\text{sop}} \sqrt{(P_j^{\text{sop}})^2 + (Q_j^{\text{sop}})^2} \end{cases} \tag{4}$$

式中：P_i^{sop}、P_j^{sop} 与 Q_i^{sop}、Q_j^{sop} 分别为两端 VSC 注入的有功功率与无功功率；$P_{i,\text{loss}}^{\text{sop}}$、$P_{j,\text{loss}}^{\text{sop}}$ 分别为两端 VSC 的传输损耗；A_i^{sop}、A_j^{sop} 分别为两端 VSC 的损耗系数，均取 0.02。SOP 无功功率约束为

$$\begin{cases} Q_{i,\min}^{\text{sop}} \leqslant Q_i^{\text{sop}} \leqslant Q_{i,\max}^{\text{sop}} \\ Q_{j,\min}^{\text{sop}} \leqslant Q_j^{\text{sop}} \leqslant Q_{j,\max}^{\text{sop}} \end{cases} \tag{5}$$

式中，$Q_{i,\min}^{\text{sop}}$、$Q_{j,\min}^{\text{sop}}$、$Q_{i,\max}^{\text{sop}}$、$Q_{j,\max}^{\text{sop}}$ 分别为两端 VSC 无功功率输出的上、下限。SOP 容量约束为

$$\begin{cases} \sqrt{(P_i^{\text{sop}})^2 + (Q_i^{\text{sop}})^2} \leqslant S_i^{\text{sop}} \\ \sqrt{(P_j^{\text{sop}})^2 + (Q_j^{\text{sop}})^2} \leqslant S_j^{\text{sop}} \end{cases} \tag{6}$$

式中，S_i^{sop}、S_j^{sop} 分别为两端 VSC 的接入容量。

2 DG 与 SOP 三层协调优化模型

2.1 上层规划模型

上层从 DG 运营商的角度出发，以年收益最大为目标函数确定 DG 选址定容方案。其上层模型的目标函数 f_{U} 为

$$\min f_{\text{U}} = -b_{\text{DG}} = C_{\text{opr}} + C_{\text{inv}} - B_{\text{tra}} - B_{\text{sub}} \tag{7}$$

$$C_{\text{opr}} = 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} p_s e_{\text{opr}} P_{i,t}^{\text{DG}}(s) \Delta t \tag{8}$$

$$C_{\text{inv}} = \frac{r(1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} e_{\text{inv}} P_{i,\text{rated}} \tag{9}$$

$$B_{\text{tra}} + B_{\text{sub}} = 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} \Delta t (e_{\text{DG}} + e_{\text{sub}}) \cdot P_{i,t}^{\text{DG}}(s) p_s \tag{10}$$

式中：b_{DG} 为 DG 的年收益；C_{opr}、C_{inv} 和 B_{tra}、B_{sub} 分别为DG的年运营成本、年投资成本和售电收益、政策补贴收益；N 为典型场景数；N_{DG} 为 DG 在节点系统中的安装节点数；p_s 为场景 s 的概率；$P_{i,t}^{\text{DG}}(s)$ 为 t 时段内节点 i 场景 s 下所有 DG 上网有功功率；Δt 为时间步长，取 1 h；e_{opr}、e_{inv} 和 e_{DG}、e_{sub} 分别为 DG 单位运行维护成本、投资成本和 DG 上网电价，政府补贴电价；r 为 DG 贴现率，取 0.08；L 为 DG 使用年限，取 20 a。

约束条件为

$$\begin{cases} \sum\limits_{i \in \Omega_{\text{DG}}} P_{i,\text{rated}} \leqslant \rho P_{\text{load}} \\ 0 \leqslant P_{i,\text{rated}} \leqslant P_{i,\text{rated}}^{\max} \\ P_{i,\text{rated}} = a_i P_{\text{DG}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$P_{i,\text{rated}}$ 为节点 i 处 DG 安装容量；ρ 为配电网允许的 DG 最大渗透率，取 35%；P_{load} 为系统总有功负荷；$P_{i,\text{rated}}^{\max}$ 为节点 i 允许安装的最大 DG 容量；P_{DG} 为 DG 单位额定容量；a_i 为节点 i 处 DG 的安装数量。

2.2 中层规划模型

中层以配电公司年运行成本最小为目标函数确定 SOP 规划方案。其中层模型的目标函数 f_{M} 为

$$\min f_{\text{M}} = C_{\text{inv}}^{\text{sop}} + C'_{\text{opr}} \tag{12}$$

$$C_{\text{inv}}^{\text{sop}} = \left[\frac{q(1+q)^m}{(1+q)^m - 1} + \eta \right] \sum_{(i,j) \in \Omega_{\text{sop}}} e_{\text{inv}}^{\text{sop}} S_{ij}^{\text{sop}} \tag{13}$$

$$C'_{\text{opr}} = 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} \Delta t \left[e_{\text{grid}} P'_{\text{grid}}(s) + (e_{\text{DG}} - e_{\text{emi}}) \cdot P_{i,t}^{\text{DG}}(s) + e P'_{\text{Loss}}(s) \right] p_s \tag{14}$$

式中：$C_{\text{inv}}^{\text{sop}}$、$C'_{\text{opr}}$ 分别为 SOP 年投资成本和配电公司年运营成本；q 为 SOP 贴现率，取 0.08；m 为 SOP 使用年限，取 20 a；η 为年运行维护费用系数，取 0.01；$e_{\text{inv}}^{\text{sop}}$、$e_{\text{grid}}$、$e_{\text{emi}}$ 和 e 分别为 SOP 投资成本、向上级电网购电电价、上级电网排放成本和配电公司售电电价；$P_{\text{grid}}^{t}(s)$ 和 $P_{\text{Loss}}^{t}(s)$ 分别为时段 t 场景 s 下向上级电网购电量和配电系统运行损耗。

约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leqslant S_{ij}^{\text{sop}} \leqslant S_{ij,\max}^{\text{sop}} \\ S_{ij}^{\text{sop}} = b_{ij} S_{\text{sop}} \end{cases} \tag{15}$$

式中：b_{ij} 为联络线安装的 SOP 数量；S_{sop}、S_{ij}^{sop} 和 $S_{ij,\max}^{\text{sop}}$ 分别为单位 SOP 容量、联络线 ij 安装的 SOP 容量和允许安装的最大容量。

2.3 下层规划模型

在给定 DG 与 SOP 选址定容的方案下，以网络损耗最小为目标优化系统运行状态，其下层模型的目标函数 f_{L} 为

$$\min f_{\text{L}} = \sum_{i,j \in \Omega_{\text{Branch}}} [I_{ij}^{t}(s)]^2 R_{ij} \tag{16}$$

式中：$I_{ij}^{t}(s)$ 为支路(i,j)电流幅值；R_{ij} 为支路电阻；Ω_{Branch} 为网络支路集合。下层模型在考虑系统运行状态时还需满足功率平衡约束、节点电压约束、支路电流约束和潮流倒送约束，则有

$$\begin{aligned} P_i^t(s) = & \sum_{j \in N_i} U_i^t(s) U_j^t(s) [G_{ij} \cos\theta_{ij}^t(s) + \\ & B_{ij} \sin\theta_{ij}^t(s)] + G_{ii} [U_i^t(s)]^2 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} Q_i^t(s) = & -\sum_{j \in N_i} U_i^t(s) U_j^t(s) [B_{ij} \cos\theta_{ij}^t(s) - \\ & G_{ij} \sin\theta_{ij}^t(s)] - B_{ii} [U_i^t(s)]^2 \end{aligned} \tag{18}$$

$$U_{i,\min} \leqslant U_i^t(s) \leqslant U_{i,\max} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} [I_{ij}^t(s)]^2 = & (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \{ [U_i^t(s)]^2 + [U_j^t(s)]^2 - \\ & 2U_i^t(s) U_j^t(s) \cos\theta_{ij}^t(s) \} \leqslant I_{ij,\max}^2 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{cases} P_{\text{sub}}^t(s) \geqslant 0 \\ Q_{\text{sub}}^t(s) \geqslant 0 \end{cases} \tag{21}$$

式中：$U_i^t(s)$、$U_j^t(s)$、$\theta_{ij}^t(s)$ 分别为 t 时段场景 s 下节点电压幅值和相角差；G_{ii}、B_{ii} 和 G_{ij}、B_{ij} 分别为节点 i、j 自导纳和互导纳；N_i 为与节点 i 相连接的节点集合；$U_{i,\min}$、$U_{i,\max}$ 分别为节点的电压幅值下限和上限，取 0.95 和 1.05；$I_{ij,\max}$ 为支路电流幅值上限。$P_{\text{sub}}^t(s)$、$Q_{\text{sub}}^t(s)$ 分别为时段 t 场景 s 下联络变电站低压侧注入有功功率、无功功率。

3　模型求解方法

SCOP 为 1 种特殊的线性化处理方式，锥规划已在电力系统中广泛应用于最优潮流问题，限于篇幅，其优化模型与相关约束条件具体线性化方式见文献[24]。灰狼算法 GWO(grey wolf optimization algorithm)具有收敛速度快、收敛性强、易于实现等优点，其算法详细原理见文献[25]，本文主要对该算法做以下改进：

(1)GWO 算法中收敛因子由 2 线性递减至 0，在迭代过程中容易陷入局部最优的情况。针对该问题，本文采取控制收敛因子递减方式，具体为

$$a = 2 - \frac{4n}{N_{\max}} + 2\left(\frac{n}{N_{\max}}\right)^2 \tag{22}$$

式中：a 为收敛因子；n 为当前迭代次数；$N_{\max}$ 为最大迭代次数。

(2)为进一步提升寻优效率，位置更新时考虑 α、β 和 δ 狼位置的权重，以平衡该算法的局部搜索能力与全局搜索能力，具体公式为

$$\begin{cases} w_1 = \dfrac{|X_1|}{|X_1 + X_2 + X_3|} \\ w_2 = \dfrac{|X_2|}{|X_1 + X_2 + X_3|} \\ w_3 = \dfrac{|X_3|}{|X_1 + X_2 + X_3|} \end{cases} \tag{23}$$

$$X(n+1) = \frac{w_1 X_1 + w_2 X_2 + w_3 X_3}{w_1 + w_2 + w_3} \tag{24}$$

式中：X_1、X_2、X_3 分别为 α、β 和 δ 狼的位置；w_1、w_2、w_3 分别为 α、β 和 δ 狼的权重系数；$X(n+1)$为灰狼下一次迭代的位置更新方向。

(3)引入 Levy 飞行策略有助于算法及时跳出局部最优，进一步提高算法的全局搜索能力。Levy 飞行步长服从一个带有尾重的概率分布

$$\text{Levy}(\beta) = \frac{\mu}{|v|^{-\beta}} \tag{25}$$

式中：Levy(β)为服从参数为β的Levy分布，0<β<2；v为服从$N(0, 1)$的正态分布；μ为服从$N(0, \sigma^2)$的正态分布，其中σ的计算式为

$$\sigma=\frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\beta\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right)2^{\frac{\beta-1}{2}}} \tag{26}$$

式中，β取1.5。

4 算例分析

4.1 算例概况与参数设置

IEEE 33节点算例的系统拓扑结构如图2所示。该系统基准电压为12.66 kV，基准容量为10 MV·A，总有功负荷为3 715 kW，总无功负荷为2 300 kvar，节点1为电源节点，系统节点负荷与具体线路参数见文献[26]。

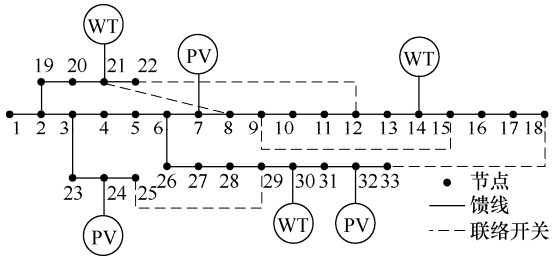


图2 IEEE 33节点系统拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of IEEE 33-node system

本文选取节点14、21、30为风机待选安装节点，选取节点7、24、32为光伏待选安装节点。DG单位额定容量为100 kW，节点7、14、32最大允许安装容量为500 kW，节点21、24、30最大允许安装容量为1 000 kW。SOP的单位额定容量为100 kV·A，待选安装支路最大允许安装容量为500 kV·A。DG单位投资费用为5 600元/kW，DG单位运行维护费用为0.032元/kW，SOP单位投资费用为1 000元/(kV·A)，购售电采用分时电价制度，其电价参数见表1。表1中，峰时段：10:00—12:00，17:00—20:00；平时段：06:00—09:00，13:00—16:00，21:00—24:00；谷时段：01:00—05:00。IGWO初始种群数量为40，最大迭代次数为50。测试系统硬件环境为12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700 CPU，主频2.10 GHz，内存16 GB，操作系统为Win11 64 bit，开发环境为MATLAB R2020a。

表1 电价参数

Tab. 1 Parameters of electricity price

参数	电价/[元/(kW·h)]		
	峰时段	平时段	谷时段
配电公司售电电价	0.58	0.42	0.32
向传统电网购电电价	0.90	0.60	0.30
DG上网电价	0.55	0.55	0.55
政策补贴电价	0.25	0.25	0.25
火电排放成本	0.25	0.25	0.25

4.2 规划结果与分析

本文拟定以下3种规划方案：

方案1：只规划DG不考虑SOP，仅以DG规划与配电系统优化构成双层优化模型；

方案2：分别改变SOP安装位置与安装容量，验证SOP优化DG规划方案与配电系统运行状态的有效性；

方案3：DG与SOP协调规划，验证3层优化模型的可行性。

表2给出了从DG运营商和配电公司的利益出发的DG规划方案。由表2可知，前者的DG年收益为306.88万元，配电系统网损成本46.40万元。后者的DG年收益为352.35万元，网损成本为35.63万元。结果表明，从配电公司角度出发规划DG更具有效性。

表2 方案1规划结果

Tab. 2 Planning result under Scheme 1

参数	数值	
	DG运营商	配电公司
DG节点7容量/kW	100	0
DG节点14容量/kW	300	500
DG节点21容量/kW	0	100
DG节点24容量/kW	600	200
DG节点30容量/kW	100	300
DG节点32容量/kW	200	200
C_{DG}/万元	90.00	91.95
b_{DG}/万元	306.88	352.35
C_{opr}/万元	1 354.80	1 332.70
网损成本/万元	46.40	35.63

表 3 分别给出了改变 SOP 安装位置与容量的联合规划结果。仅改变 SOP 安装位置时，DG 收益提升了 22.73 万元，配电系统网损成本降低了 0.69 万元。仅改变 SOP 安装容量时，DG 收益提升了 45.47 万元，配电系统网损成本降低了 3.57 万元。与方案 1 规划结果相比，考虑 SOP 的 DG 收益增加了 113.69 万元，网损成本降低了 21.64 万元。结果验证了考虑 SOP 协调规划的科学性，为下文 DG 与 SOP 协调规划提供了依据。

表 3　方案 2 规划结果

Tab. 3 Planning result under Scheme 2

参数	数值		
	标准 SOP	改变 SOP 安装位置	改变 SOP 安装容量
DG 节点 7 容量/kW	400	300	100
DG 节点 10 容量/kW	100	300	500
DG 节点 21 容量/kW	400	400	500
DG 节点 24 容量/kW	0	100	100
DG 节点 30 容量/kW	300	100	0
DG 节点 32 容量/kW	100	100	100
C_{DG}/万元	94.80	95.74	96.68
b_{DG}/万元	420.57	443.30	466.04
SOP 支路 8-21 容量/(kV·A)	200	200	400
SOP 支路 9-15 容量/(kV·A)	0	200	0
SOP 支路 12-22 容量/(kV·A)	200	200	400
SOP 支路 18-33 容量/(kV·A)	0	0	0
SOP 支路 25-29 容量/(kV·A)	200	0	400
C_{SOP}/万元	6.114	6.114	12.228
C_{opr}/万元	1 319.20	1 315.90	1 315.50
网损成本/万元	28.33	27.64	24.76

表 4 给出了 DG 与 SOP 联合规划仿真结果，其中配电系统网损成本为19.248 万元，配电公司运行成本为 1 288.00 万元。配电系统损耗成本和配电公司运行成本与规划前相比，分别降低了 81.75%、16.12%，与方案 1 相比分别降低了 58.50%、4.87%。结果表明，合理规划 DG 并入配电系统能够一定程度上促进双方利益以及优化配电系统潮流分布，而计及 SOP 的协调规划方法能够进一步提高其优化系统的能力。

表 4　方案 3 规划结果

Tab. 4 Planning result under Scheme 3

参数	数值	
	原系统	IGWO-SCOP
DG 节点 7 容量/kW	—	100
DG 节点 14 容量/kW	—	400
DG 节点 21 容量/kW	—	0
DG 节点 24 容量/kW	—	400
DG 节点 30 容量/kW	—	400
DG 节点 32 容量/kW	—	0
C_{DG}/万元	—	91
B_{DG}/万元	—	420.63
SOP 支路 8-21 容量/(kV·A)	—	0
SOP 支路 9-15 容量/(kV·A)	—	300
SOP 支路 12-22 容量/(kV·A)	—	100
SOP 支路 18-33 容量/(kV·A)	—	400
SOP 支路 25-29 容量/(kV·A)	—	100
C_{SOP}/万元	—	9.17
C_{opr}/万元	1 535.48	1 288.00
网损成本/万元	105.500	19.248

图 3 给出了 3 种方案在同一场景下节点电压幅值情况。从结果可以看出，方案 1 明显改善了节点电压分布，然而还有少部分节点仍存在电压越限的情况；方案 2 在考虑 SOP 之后，各节点电压已经

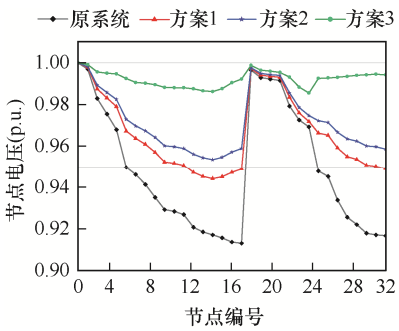
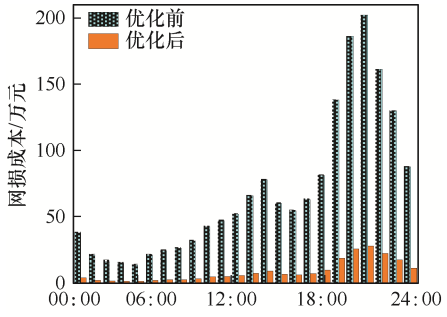


图 3　节点电压幅值

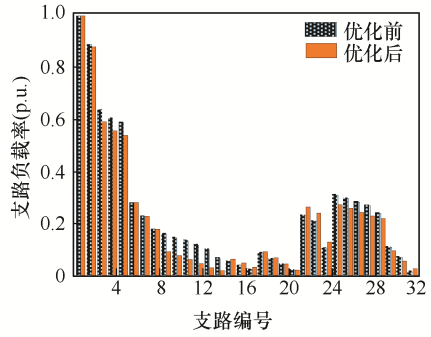
Fig. 3 Amplitude of nodal voltage

符合系统基本要求；方案 3 在联合规划 DG 与 SOP 后，配电系统各节点电压优化效果更加明显。

图 4 给出了优化前、后配电网络运行状态。图 4(a)为优化前、后典型日内的网络损耗成本，可见优化后大幅度降低了配电系统损耗产生的成本，有效改善了配电网络电能质量。图 4(b)给出了优化前、后系统中各支路线路负载率的优化情况，可见优化后线路负载率得到了有效改善，其系统潮流调度能力进一步增强。



(a) 网损成本



(b) 负载率

图 4 优化前、后网络运行状态

Fig. 4 Operating status of network before and after optimization

5 结论

本文以 IEEE 33 节点系统为例，对规划方案与网络运行状态进行了详细分析，所得结论如下：

(1)方案 1 与原系统相比，配电公司运行成本降低了 11.76%，网络损耗产生的成本降低了 66.23%。DG 并网在带来收益的同时一定程度上优化了系统运行状态，因此 DG 并网规划对 DG 运营商和配电公司均具有必要性。

(2)仅改变 SOP 安装位置，DG 收益增加了 22.73 万元，配电公司运行成本减少了 3.3 万元，网损成本减少了 0.69 万元；仅改变 SOP 安装容量，DG 收益增加了 45.47 万元，配电公司运行成本减少了 3.7 万元，网损成本减少了 3.57 万元。因此方案 2 规划结果证明了考虑 SOP 的必要性与科学性。

(3)SOP 与 DG 协调规划后无论是运行成本还是配电系统运行状态均得到进一步优化，与方案 1 相比，其 DG 收益增加了 113.75 万元，配电公司运行成本减少了 44.7 万元，配电系统网损成本降低了 16.382 万元，规划结果进一步证明 SOP 与 DG 协调规划的有效性。

目前，大量研究学者已开始运用对抗网络进行场景生成。本文采用的场景生成方法已研究得较为成熟，运用的双端 SOP 研究也较为成熟，并且 SOP 安装位置是在已有研究成果的基础上进行规划。因此，运用更为有效的深度学习方法构建典型场景，研究多端 SOP 在配电系统中应用前景，以及研究更广泛的 SOP 规划方案，是接下来亟待完善的工作。

参考文献：

[1] 董璐, 边晓燕, 周波, 等. 计及调频备用效益的主动配电网分层分布式协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 55-63.
Dong Lu, Bian Xiaoyan, Zhou Bo, et al. Hierarchical distributed coordinated optimal dispatch of active distribution network considering frequency regulation reserve benefits [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 55-63. (in Chinese)

[2] 董骁翀, 张姝, 李烨, 等. 电力系统中时序场景生成和约简方法研究综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 709-721.
Dong Xiaochong, Zhang Shu, Li Ye, et al. Review of power system temporal scenario generation and reduction methods [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 709-721. (in Chinese)

[3] 任智君. 主动配电网分布式电源优化配置技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Ren Zhijun. Research on optimal configuration technology of distributed generation in active distribution net-

work [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)

[4] 荣德生, 刘山林, 刘健辰, 等. 计及分布式电源精确特性的配电网动态无功优化[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 82-89.
Rong Desheng, Liu Shanlin, Liu Jianchen, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network considering accurate characteristics of distributed generation [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 82-89. (in Chinese)

[5] 林雪杉, 张汀荟, 王蓓蓓. 高渗透率分布式发电并网下公共配电网市场化收费的思考[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5256-5273.
Lin Xueshan, Zhang Tinghui, Wang Beibei. Review of distribution network tariff design with high-penetration of distributed generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5256-5273. (in Chinese)

[6] Wang Jian, Zhou Niancheng, Ran Yunhao, et al. Reducing the active power curtailment of distributed generation based on soft open points in unbalanced distribution networks [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14 (16): 3252-3258.

[7] 兰征, 杨淳智, 谭仁煜, 等. 考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 196-207.
Lan Zheng, Yang Chunzhi, Tan Renyu, et al. Optimal regulation method for distribution network clustering considering voltage governance potential of heterogeneous distributed photovoltaics [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 196-207. (in Chinese)

[8] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1431-1436.
Yi Haichuan, Zhang Bide, Wang Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG [J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436. (in Chinese)

[9] 张翔, 程浩忠, 方陈, 等. 考虑主动管理模式的多目标分布式电源规划[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(9): 1231-1238.
Zhang Xiang, Cheng Haozhong, Fang Chen, et al. Multi-objective distributed generation planning considering active management [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(9): 1231-1238. (in Chinese)

[10] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1719-1728, 1908.
Jia Qingquan, Zhao Meichao, Sun Lingling, et al. Planning for grid-connection of distributed PVs considering the sequential feature and correlation in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1719-1728, 1908. (in Chinese)

[11] Aithal A, Long Chao, Cao Wanyu, et al. Impact of soft open point on feeder automation [C]// 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven, Belgium, 2016: 1-6.

[12] Li Peng, Ji Haoran, Wang Chengshan, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.

[13] Cao Wanyu, Wu Jianzhong, Jenkins N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.

[14] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321. (in Chinese)

[15] 马丽, 薛飞, 石季英, 等. 有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 86-93.
Ma Li, Xue Fei, Shi Jiying, et al. Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 86-93. (in Chinese)

[16] 韩靖淞. 主动配电网中分布式电源优化配置的研究与应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

Han Jingsong. Research and application of optimal configuration of distributed generation in active distribution network [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)

[17] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(S1): 1-9.
Zhang Shenxi, Yuan Jiayan, Cheng Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 1-9. (in Chinese)

[18] Arasteh H, Sepasian M S, Vahidinasab V. An aggregated model for coordinated planning and reconfiguration of electric distribution networks [J]. Energy, 2016, 94: 786-798.

[19] 杨行. 主动配电网中分布式电源与智能软开关优化配置[D]. 保定: 华北电力大学, 2020.
Yang Hang. Optimal configuration of distributed generation and soft open point in active distribution network [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)

[20] Kumar M, Nallagownden P, Elamvazuthi I. Optimal placement and sizing of renewable distributed generations and capacitor banks into radial distribution systems [J]. Energies, 2017, 10(6): 811.

[21] 马丽. 主动配电网中分布式电源优化配置研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Ma Li. Research on optimal allocation of distributed generation in active distribution network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)

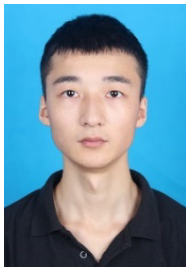
[22] Kayal P, Chanda C K. Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network [J]. Renewable Energy, 2015, 75: 173-186.

[23] 姚宗强, 赵长伟, 马世乾, 等. 含多端 SOP 的智能配电网运行优化及示范应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 66-72.
Yao Zongqiang, Zhao Changwei, Ma Shiqian, et al. Operation and optimization of smart distribution network with multi-terminal soft open point and pilot application [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 66-72. (in Chinese)

[24] 于莹莹. 基于锥优化的智能配电网优化问题建模方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Yu Yingying. A modeling method for smart distribution network optimization problem based on conic programming [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)

[25] 朱豪. 基于双层规划理论的主动配电网分布式电源优化配置[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
Zhu Hao. Optimal configuration of distributed generation in active distribution network based on bi-level programming theory [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021. (in Chinese)

[26] 刘俊. 主动配电网中分布式电源优化配置研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
Liu Jun. The planning research of distributed generation in active distribution network [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)



张江

作者简介：

张江(1998—)，男，硕士。研究方向：分布式电源并网规划。E-mail：1139671522@qq.com。

刘谦(1991—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：电力系统分析。E-mail：lq@ctgu.edu.cn。

李毓林(1998—)，男，硕士。研究方向：新能源出力预测。E-mail：935778206@qq.com。

陈义林(1997—)，男，硕士。研究方向：新能源储能运行规划。E-mail：1368942609@qq.com。

蒋航(1999—)，男，硕士。研究方向：区块链。E-mail：839934587@ qq.com。

(责任编辑：陈国珍)