

考虑柔性开关与需求响应的多目标主动配电网优化重构

董凯元^{1,2}, 谢敏^{1,2}, 卢颖^{1,2}, 张世平^{1,2}, 卢燕旋^{1,2}, 谢宇星^{1,2}

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640)

摘要: 针对高比例清洁能源接入配电网的背景, 对柔性开关(soft open point, SOP)与需求响应(demand response, DR)接入主动配电网优化重构问题展开研究, 提出了考虑SOP和DR的配电网重构策略。首先, 构建配电网的SOP与DR模型, 以综合考虑损耗费用、运营成本与负载不均衡度为优化目标, 建立计及SOP与DR的多目标主动配电网优化重构模型。然后, 采用一种改进的规格化法平面约束法(normalized normal constraint, NNC)求解该三目标优化问题的完整Pareto前沿以获得折中最优解。最后以IEEE 33节点配电系统为例进行验证。结果表明综合考虑SOP与DR的配电网重构策略可以有效提升配电网的经济性, 提高清洁能源的消纳能力, 以及降低系统线路的负载不均衡度。

关键词: 柔性开关; 需求响应; 主动配电网; 多目标配电网重构; Pareto 前沿

Multi-Objective Active Distribution Network Optimization Reconfiguration Considering Soft Open Point and Demand Response

DONG Kaiyuan^{1,2}, XIE Min^{1,2}, LU Ying^{1,2}, ZHANG Shiping^{1,2}, LU Yanxuan^{1,2}, XIE Yuxing^{1,2}

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Green Energy Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the context of a high proportion of clean energy integration into the distribution network, the optimization and reconfiguration of the active distribution networks is investigated by integrating soft open points (SOP) and demand response (DR) into the networks. A strategy for reconfiguring the distribution network considering both SOP and DR is proposed. Firstly, models for SOP and DR within the distribution network are established. By comprehensively considering loss cost, operational cost, and load imbalance as optimization objectives, a multi-objective optimization model for active distribution network reconfiguration incorporating SOP and DR is formulated. Subsequently, an improved normalized normal constraint method (NNC) is employed to solve the three-objective optimization problem and obtain the complete Pareto frontier for the trade-off optimal solutions. Finally, simulation verification is carried out using the IEEE 33-node distribution system as an example. The results demonstrate that the reconfiguration strategy which considers both SOP and DR can effectively enhance the economic efficiency of the distribution network, improve the absorption capacity of clean energy, and reduce the load imbalance degree of the system lines.

Key words: soft open point; demand response; active distribution network; multi-objective distribution network reconfiguration; Pareto frontier

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金面上项目(2022A1515240074, 2021A1515012245)。

Foundation item: Supported by the Guangdong Provincial Basic and Applied Basic Research Fund General Project (2022A1515240074, 2021A1515012245)

0 引言

配电网重构是一种配电网运行的优化措施,通过改变系统的拓扑结构以优化运行的指标^[1]。随着光伏(photovoltaic, PV)和风电机组(wind turbine, WT)等分布式电源(distributed generation, DG)渗透率的提升,其随机性与不确定性为主动配电网重构带来了严峻的挑战。

柔性开关(soft open point, SOP)是安装于联络线上的一种具有高可控性的电力电子设备,可实现馈线之间的柔性连接与潮流的精准调整^[2],其发展为打破传统配电网的结构提供了创新的思路。文献[3-4]介绍了SOP的基本结构与工作原理,并对SOP的关键技术进行了分析与展望。关于SOP参与配电网优化问题的研究,文献[5]从降低网损、改善电压水平和应对DG突变的能力等方面阐述了SOP在运行调节方面的诸多益处。文献[6]提出了SOP馈线端口功率控制与配电网重构协同的运行路径优化模型,但该模型仅从单一时间段考虑SOP与配电网的协调,且并未充分考虑分布式电源与SOP损耗的影响。已有一些研究关注需求响应(demand response, DR)在配电网重构中的应用,文献[7]在研究DR对配电网重构结果影响的同时,考虑了负荷变化与DG出力的不确定性。文献[8]研究了考虑DR的配电网重构对提升新能源消纳能力,平抑负荷峰谷差,提高系统运行经济性的作用,但该文章仅考虑了峰谷各时段的电量电价自弹性系数,也并未对DR后的电价与负荷总电量做相关限制,关于约束条件的考虑相对欠缺。

在当前高比例清洁能源并网的背景下,涉及SOP和DR的主动配电网优化重构的研究较为稀少。虽然文献[9]进行了初步的探讨,但其仅以经济性为指标,在研究重构动作时将SOP与联络线路等价,也可以进行断开操作,这是不合理的,此外,其采用的混合整数二阶锥规划方法也无法确保问题的高效求解。随着高比例清洁能源接入配电网,重构问题需兼顾系统运行的可靠性、经济性等多个目标。求解多目标问题常用的方法有进化算法与基于数学规划的方法。已有如多目标差分进化法^[10]、改进粒子群优化算法^[11]、改进帝国主义竞争算法^[12]、增强的自适应差异进化算法^[13]等进化算法被应用于配电网多目标最优潮流计算问题的研究。尽管进化

算法直观易懂,但其性能高度依赖于参数设置,而且由于进化算法是随机搜索解空间的,所以其计算量大,运算速度慢,且不一定能保证得到最优解。对于多目标问题,这种方法难以确保解的非支配性,存在明显的不足。而基于数学规划的方法恰恰可以弥补这些缺陷,例如加权法^[14]、 ε -约束法^[15]、法线边界交叉法(normal boundary intersection, NBI)^[16]和规格化法平面约束法(normalized normal constraint, NNC)^[17]等。加权法与 ε -约束法可在不同目标之间进行灵活的权衡,具备灵活性与数学简单性,但其获得的结果受到决策者主观判断的影响较大,且 ε -约束法得到的解集可能存在解的密度不均匀的问题。相比于以上两种方法,NBI法和NNC法均用于寻找多目标问题均匀分布的Pareto解集,但NBI法相对于NNC法会产生更多的支配Pareto解^[17]。然而,当存在三个或以上目标函数时,即Pareto前沿为曲面或超曲面,NBI和NNC方法无法提供完整的Pareto前沿,不能为决策者提供完整的决策信息。因此,在多目标配电网优化重构问题中获得完整的Pareto前沿是很有必要的。

针对上述研究现状,本文首先建立考虑SOP的主动配电网重构模型,并考虑DR、PV、WT、储能装置(energy storage system, ESS)等参与,在高比例清洁能源接入的情况下,综合考虑负载均衡、网损与运营成本,采用一种改进的NNC算法,通过在乌托邦面外部与目标函数空间中的可行域边界曲线间新增采样点并求解优化模型,以获取多目标优化问题的完整Pareto前沿,并运用逼近理想解排序法^[18]决策出折中解。最后,通过IEEE 33节点算例验证了本文模型的有效性。

1 配电系统中SOP与DR的功能与模型

1.1 SOP的功能

在高比例清洁能源接入配电系统的情况下,加入SOP的重构可以一定程度上起到降低网损、提高电压水平、改善系统潮流分布并提升系统对于清洁能源的消纳能力。根据不同的应用需求,可以通过双端或多端的VSC实现单个或多个台区的连接^[14],本文以B2B VSC型SOP为例^[19],其接入方式如图1所示。1)图1(a)所示的SOP连接到母线或线路的起点,通过精确控制SOP的功率传输,实现不同台区间的电力负载均衡;2)图1(b)所示的SOP连接

不同馈线末端,可提供一定的电压无功功率支撑,均衡负荷的同时保证了远端的电压水平;3)图1中c所示的SOP形成柔性供电网络,有助于减少故障影响范围,并减轻故障区域的压力。

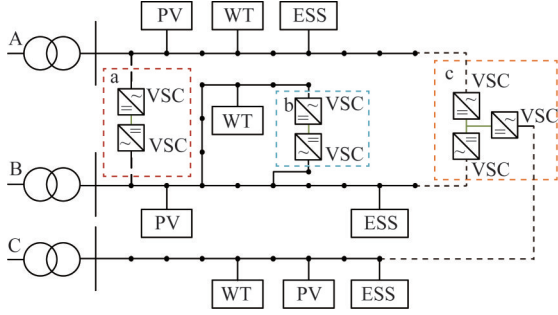


图1 SOP的3种接入电网形式

Fig. 1 Three forms of SOP access to power grid

1.2 SOP的模型

正常运行情况下,本文选取 $PQ-V_{dc}Q$ 控制^[6]作为SOP的控制模式。两个VSC由于直流环节隔离,其无功输出互不影响。因此,得到SOP有功功率约束和容量约束如下。

$$P_{i,t}^{\text{sop}} + P_{j,t}^{\text{sop}} + P_{i,t}^{\text{sop,L}} + P_{j,t}^{\text{sop,L}} = 0 \quad (1)$$

$$P_{j,t}^{\text{sop,L}} = \eta^{\text{sop}} \sqrt{(P_{j,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{sop}})^2} \quad (2)$$

$$P_{i,t}^{\text{sop,L}} = \eta^{\text{sop}} \sqrt{(P_{i,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{sop}})^2} \quad (3)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{sop}})^2} \leq S_j^{\text{sop}} \quad (4)$$

$$\sqrt{(P_{i,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{sop}})^2} \leq S_i^{\text{sop}} \quad (5)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{sop}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{sop}}$ 分别为 t 时刻SOP在节点 i 传输的有功功率和注入电网的无功功率; $P_{i,t}^{\text{sop,L}}$ 和 $P_{j,t}^{\text{sop,L}}$ 分别为 t 时刻SOP两端VSC的损耗; η^{sop} 为损耗系数; S_i^{sop} 和 S_j^{sop} 分别为节点 i 、 j 的VSC的容量。

1.3 DR的基本原理与模型

分时电价通过传递价格信号,引导用户调整用电行为,在大量清洁能源接入的情况下能够有效减少网损,平衡负荷,并在一定程度上增强电网对清洁能源的消纳能力^[20]。实施DR时需考虑某一时段的负荷变化对该时段电价及其他时段电价的依赖性,一般采用电量电价弹性系数量化分析用户对于价格变化的响应,其中引入了自弹性系数和互弹性系数,如式(6)所示。

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta D_i / D_{0i}}{\Delta P_j / P_{0j}} \quad (6)$$

式中:当 $i=j$ 时 ξ_{ij} 为自弹性系数,当 $i \neq j$ 时 ξ_{ij} 为互弹性系数; ΔD_i 、 ΔP_j 分别为电量和电价的增量; D_{0i} 、 P_{0j} 分别为初始可转移电量和电价。

引入电量电价弹性矩阵来描述配电系统中用户的分时电价DR,从而得到响应后各时段的转移后的电量 D_i :

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{01} & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & D_{02} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & D_{0m} \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_1 / P_0 \\ \Delta P_2 / P_0 \\ \vdots \\ \Delta P_m / P_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{01} \\ D_{02} \\ \vdots \\ D_{0m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为由式(6)构成的弹性系数矩阵; m 为所研究的时段数量。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1m} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{m1} & \xi_{m2} & \cdots & \xi_{mm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 SOP和DR接入的配电网重构模型

2.1 目标函数

1) 损耗费用 f_1

损耗费用 f_1 考虑网损 f_{loss}^L 、SOP损耗 $f_{\text{loss}}^{\text{sop}}$,满足如下关系。

$$f_1 = f_{\text{loss}}^L + f_{\text{loss}}^{\text{sop}} \quad (9)$$

各部分损耗的表达式如下。

$$f_{\text{loss}}^L = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi_b} C_{\text{loss}} I_{ij,t}^2 r_{ij} \Delta T \quad (10)$$

$$f_{\text{loss}}^{\text{sop}} = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi_{\text{sop}}} C_{\text{sop}} P_{i,t}^{\text{sop,L}} \Delta T \quad (11)$$

式中: $I_{ij,t}$ 为 t 时刻流经线路 ij 的电流; $P_{i,t}^{\text{sop,L}}$ 为 t 时刻节点 i 接入的SOP的有功功率损耗; C_{loss} 、 C_{sop} 分别为网损费用、SOP运行费用的单价; ψ_{sop} 为配电网中接入SOP的节点集合; ψ_b 为节点集合; T 为时段数量; ΔT 为各时段长度。

2) 运营成本 f_2

运营成本 f_2 考虑弃风、弃光惩罚 f_p 、 f_w ,其表达式如下。

$$f_2 = f_p + f_w = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \psi_{\text{wind}}} C_{\text{wind}} (\overline{P}_{i,t}^{\text{wind}} - P_{i,t}^{\text{wind}}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \psi_{\text{pv}}} C_{\text{pv}} (\overline{P}_{i,t}^{\text{pv}} - P_{i,t}^{\text{pv}}) \quad (12)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为WT和PV在 t 时刻 i 节点接

入配电网的实际有功功率； $\overline{P}_{i,t}^{\text{wind}}$ 和 $\overline{P}_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时刻 i 节点WT、PV的有功出力上限； C_{wind} 、 C_{pv} 分别为弃风、弃光费用； ψ_{wind} 和 ψ_{pv} 分别为弃风、弃光节点集合。

3) 负载不均衡度 f_3

主动配电网重构将改变网络的结构，从而导致潮流重新分布。在这种情况下，具有高负载率的线路可能会承担更多的负荷，从而导致其出现过载的风险增加^[21]。针对此问题，本文考虑配电网重构后的负载不均衡度，采用负载率的方差进行评估。

$$\left\{ \begin{aligned} f_3 &= \frac{1}{N_b - 1} \sum_{\substack{ij \in \psi_b \\ \alpha_{ij} = 1}} \left(\frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} - \frac{1}{N_b} \sum_{ij \in \psi_b} \frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} \right)^2 \\ \forall (i,j) | ij \in \psi_b, \alpha_{ij} &= 1 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中： $P_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 ij 传输的有功功率； P_{ij}^L 为线路 ij 的输送容量； N_b 为网络闭合支路数量； ψ_b 为配电网中含联络线的所有线路的集合； α_{ij} 为0-1变量，表示线路 ij 的投运状态，取1表示投运，取0表示不投运。

2.2 约束条件

2.2.1 配电网运行约束

1) 配电网潮流约束

基于电路理论以及交流配电网重构模型，本文采用支路功率形式的交流潮流方程^[22]如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ij,t} &= g_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - b_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} \\ Q_{ij,t} &= -b_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - g_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} \\ \forall (i,j) | ij \in \psi_b, \alpha_{ij} &= 1, i, j \in \psi_N \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中： $v_{i,t}$ 和 $v_{j,t}$ 分别为节点 i 、 j 的电压； θ_{ij} 为节点 i 与 j 之间电压相角差； g_{ij} 和 b_{ij} 分别为线路 ij 的电导和电纳； ψ_N 为所有节点的集合。

式(14)所示的线性化潮流模型仅适用于 $\alpha_{ij} = 1$ 的情况，无法使用求解器直接求解。因此通过式(15)–(16)对上述潮流方程进行松弛，将式(14)的适用范围扩大到配电网全部线路集合 ψ_b 。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ij,t} &\geq g_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - b_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} + M_1(\alpha_{ij} - 1) \\ Q_{ij,t} &\geq -b_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - g_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} + M_1(\alpha_{ij} - 1) \\ \forall (i,j) | ij \in \psi_b, \alpha_{ij} &= 1, i, j \in \psi_N \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ij,t} &\leq g_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - b_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} + M_2(1 - \alpha_{ij}) \\ Q_{ij,t} &\leq -b_{ij}(v_{i,t}^2 - v_{i,t}v_{j,t}\cos\theta_{ij,t}) - g_{ij}v_{i,t}v_{j,t}\sin\theta_{ij,t} + M_2(1 - \alpha_{ij}) \\ \forall (i,j) | ij \in \psi_b, \alpha_{ij} &= 1, i, j \in \psi_N \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\sum_{i \in f(j)} P_{ij,t} = \sum_{k \in s(j)} P_{jk,t} - P_{j,t} \quad (17)$$

$$\sum_{i \in f(j)} Q_{ij,t} = \sum_{k \in s(j)} Q_{jk,t} - Q_{j,t} \quad (18)$$

$$-\alpha_{ij}M_3 \leq P_{ij,t} \leq \alpha_{ij}M_3 \quad (19)$$

$$-\alpha_{ij}M_4 \leq Q_{ij,t} \leq \alpha_{ij}M_4 \quad (20)$$

式中： $P_{j,t}$ 与 $Q_{j,t}$ 分别为时刻 t 注入节点 j 的有功功率和无功功率； $f(j)$ 与 $s(j)$ 分别为节点 j 的父节点与子节点的集合； M_1 、 M_2 、 M_3 与 M_4 为足够大的正数。式(20)–(21)保证断开线路所传输的有功功率和无功功率为0。

2) 辐射状拓扑运行约束

配电网需保证重构后系统不存在环网与孤岛。辐射状拓扑约束^[23]如式(21)–(23)所示。

$$\sum_{ij \in \psi_b} \alpha_{ij} = N - R \quad (21)$$

$$\sum_{i \in f(j)} F_{ij} = \sum_{k \in s(j)} F_{jk} + D_j \quad (22)$$

$$-\alpha_{ij}N \leq F_{ij} \leq \alpha_{ij}N \quad (23)$$

式中： N 与 R 分别为系统中节点、根节点的数量； D_j 为非根节点 j 的虚拟负荷需求，此处取1； F_{ij} 为连续辅助变量，作为支路 ij 的虚拟潮流。

3) 节点功率平衡约束

配电网中在 t 时刻节点 i 所满足的有功功率与无功功率平衡约束如下。

$$P_{i,t} + P_{i,t}^{\text{Load}} + P_{i,t}^{\text{ch}} = P_{i,t}^{\text{wind}} + P_{i,t}^{\text{pv}} + P_{i,t}^{\text{sop}} + P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (24)$$

$$Q_{i,t} + Q_{i,t}^{\text{Load}} = Q_{i,t}^{\text{wind}} + Q_{i,t}^{\text{pv}} + Q_{i,t}^{\text{sop}} \quad (25)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{Load}}$ 与 $Q_{i,t}^{\text{Load}}$ 为参与DR后在 t 时刻节点 i 的有功与无功负荷； $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 与 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的ESS充电、放电功率； $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{wind}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的风电与光伏注入的有功功率和无功功率。

4) 节点电压约束

配电网重构要求个节点电压需限制在允许范围内，则节点电压约束可表示为：

$$\underline{v}_{i,t} \leq v_{i,t} \leq \overline{v}_{i,t} \quad (26)$$

式中 $\overline{v}_{i,t}$ 和 $\underline{v}_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 允许的电压上、

下限。

2.2.2 源-储-荷运行约束

1) 新能源出力约束

配电网中接入的风电与光伏需满足一定的出力范围。本文考虑出力可调的风电与光伏,其出力约束可表示为:

$$\underline{P}_{i,t}^{\text{wind}} \leq P_{i,t}^{\text{wind}} \leq \overline{P}_{i,t}^{\text{wind}} \quad (27)$$

$$\underline{P}_{i,t}^{\text{pv}} \leq P_{i,t}^{\text{pv}} \leq \overline{P}_{i,t}^{\text{pv}} \quad (28)$$

式中: $\overline{P}_{i,t}^{\text{pv}}$ 与 $\underline{P}_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的光伏出力上、下限; $\overline{P}_{i,t}^{\text{wind}}$ 与 $\underline{P}_{i,t}^{\text{wind}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的风电出力上、下限。

对于可调无功功率的风电与光伏,其无功出力的范围可分别表示为:

$$\begin{aligned} -\sqrt{(S_i^{\text{pv}})^2 - (P_{i,t}^{\text{pv}})^2} &\leq Q_{i,t}^{\text{pv}} \leq \sqrt{(S_i^{\text{pv}})^2 - (P_{i,t}^{\text{pv}})^2} \\ -\sqrt{(S_i^{\text{wind}})^2 - (P_{i,t}^{\text{wind}})^2} &\leq Q_{i,t}^{\text{wind}} \leq \sqrt{(S_i^{\text{wind}})^2 - (P_{i,t}^{\text{wind}})^2} \end{aligned} \quad (30)$$

式中 S_i^{pv} 与 S_i^{wind} 分别为节点 i 的光伏与风电容量。

2) ESS 充放电状态及功率约束

ESS 在充放电过程中需要满足充放电状态以及功率约束,即:

$$\alpha_{i,t}^{\text{ch}} + \alpha_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (31)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq \alpha_{i,t}^{\text{dis}} P_{i,\max}^{\text{ESS}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq \alpha_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,\max}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} E_{i,t+1}^{\text{ESS}} = E_{i,t}^{\text{ESS}} (1 - \eta) + \eta^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} \Delta T - \frac{1}{\eta^{\text{dis}}} P_{i,t}^{\text{dis}} \Delta T \\ 0 \leq E_{i,t}^{\text{ESS}} \leq E_{\max}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\alpha_{i,t}^{\text{ch}}$ 与 $\alpha_{i,t}^{\text{dis}}$ 为 0-1 变量,分别为 t 时刻节点 i 的 ESS 充、放电状态; $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 与 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的 ESS 充、放电功率; $P_{i,\max}^{\text{ESS}}$ 为节点 i 的 ESS 充放电功率的最大值; $E_{i,t}^{\text{ESS}}$ 为 t 时刻节点 i 的 ESS 的储电量; η 、 η^{ch} 与 η^{dis} 分别为 ESS 的自放电率、充电效率和放电效率; $E_{\max}^{\text{ESS}}$ 为 ESS 可存储的最大电量。

3) DR 约束

配电网重构问题中考虑 DR 策略可实现负荷的削峰填谷。为保证实施 DR 后的系统总电量、各时段电价限值以及电网收益,考虑 DR 约束如式(34)(35)所示。

$$\sum_{t=1}^T D_t = \sum_{t=1}^T D_{0,t} \quad (34)$$

$$\begin{cases} P_{v,\min} \leq P_v \leq P_{v,\max} \\ P_{f,\min} \leq P_f \leq P_{f,\max} \\ P_{p,\min} \leq P_p \leq P_{p,\max} \end{cases} \quad (35)$$

$$\sum_{t=1}^T P_t \geq \sum_{t=1}^T P_0 \quad (36)$$

式中: $D_{0,t}$ 与 D_t 分别为 DR 前、后 t 时刻的电量; $P_{v,\min}$ 、 $P_{v,\max}$ 、 $P_{f,\min}$ 、 $P_{f,\max}$ 、 $P_{p,\min}$ 、 $P_{p,\max}$ 分别为由监管部门规定的谷、平、峰 3 个时段电价的上下限; P_v 、 P_f 、 P_p 分别为 3 个时段电价; P_0 为 DR 前的电价。

3 模型的转化与求解算法

本文提出的考虑 SOP 与 DR 的多目标主动配电网重构模型具有强非凸性,难以求得最优解。需要采用线性化、凸松弛等技术以确保获得优化模型的全局最优解;对于多目标优化问题,采用改进的 NNC 法以获得完整的 Pareto 前沿。

3.1 非凸约束的凸化

1) 潮流方程的线性化

模型中所采用的支路功率形式的交流潮流约束为非凸约束,无法直接使用优化求解器进行求解。因此,分别选择 v^2 和 θ_{ij} 作为独立变量将式进行泰勒展开,并引入变量 $U_{i,t}^{\text{sqr}} = v_{i,t}^2$, 得到如式(37)-(38)所示的线性化潮流方程。

$$\begin{cases} P_{ij,t} \geq g_{ij} \frac{(U_{i,t}^{\text{sqr}} - U_{j,t}^{\text{sqr}})}{2} - b_{ij} \theta_{ij,t} + M_1 (\alpha_{ij} - 1) \\ Q_{ij,t} \geq -b_{ij} \frac{(U_{i,t}^{\text{sqr}} - U_{j,t}^{\text{sqr}})}{2} - g_{ij} \theta_{ij,t} + M_1 (\alpha_{ij} - 1) \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} P_{ij,t} \leq g_{ij} \frac{(U_{i,t}^{\text{sqr}} - U_{j,t}^{\text{sqr}})}{2} - b_{ij} \theta_{ij,t} + M_2 (1 - \alpha_{ij}) \\ Q_{ij,t} \leq -b_{ij} \frac{(U_{i,t}^{\text{sqr}} - U_{j,t}^{\text{sqr}})}{2} - g_{ij} \theta_{ij,t} + M_2 (1 - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad (38)$$

2) SOP 模型的转化

将 SOP 模型进行旋转锥约束转化^[9],即:

$$(P_{j,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{sop}})^2 \leq 2 \frac{P_{j,t}^{\text{sop,L}}}{\sqrt{2}} \frac{P_{j,t}^{\text{sop,L}}}{\sqrt{2}} \quad (39)$$

$$(P_{i,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{sop}})^2 \leq 2 \frac{P_{i,t}^{\text{sop,L}}}{\sqrt{2}} \frac{P_{i,t}^{\text{sop,L}}}{\sqrt{2}} \quad (40)$$

$$(P_{j,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{sop}})^2 \leq 2 \frac{S_j^{\text{sop}}}{\sqrt{2}} \frac{S_j^{\text{sop}}}{\sqrt{2}} \quad (41)$$

$$(P_{i,t}^{\text{sop}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{sop}})^2 \leq 2 \frac{S_i^{\text{sop}}}{\sqrt{2}} \frac{S_i^{\text{sop}}}{\sqrt{2}} \quad (42)$$

3.2 目标函数的分析与求解方法

3.2.1 目标函数的松弛与转化

显然, f_1 的计算仅限于闭合线路($\alpha_{ij} = 1$), 当线路断开($\alpha_{ij} = 0$)时, 线路 ij 的平方项应不计入 f_1 的求和中, 以上限制导致 f_1 无法使用求解器进行直接求解。因此, 引入中间变量 $V_{i,t}$ 与不等式约束将 f_1 的计算适用范围扩大到整个配电网的支路集合 ψ_b 。

$$V_1 \leq M_5(1 - \alpha_{ij}) + \frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} - \frac{1}{N_b} \sum_{ij \in \psi_b} \frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} \quad (43)$$

$$V_1 \geq M_5(\alpha_{ij} - 1) + \frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} - \frac{1}{N_b} \sum_{ij \in \psi_b} \frac{P_{ij,t}}{P_{ij}^L} \quad (44)$$

$$-\alpha_{ij}M_6 \leq V_1 \leq \alpha_{ij}M_6 \quad (45)$$

式中 M_5 、 M_6 为足够大的正数。则 f_1 可表示为:

$$f_1 = \frac{1}{N_b - 1} \sum_{ij \in \psi_b} (V_1)^2, \quad \forall (i, j) | ij \in \psi_b \quad (46)$$

f_2 中关于网损 f_{loss}^L 的计算中, 由于网络具有较平坦的电压分布 (即 $U_{i,t}^{\text{sqr}} \approx 1, i \in N$), 则 $I_{ij,t}^2$ 项可写为 $I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^{\text{sqr}}} \approx P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2$ 的形式进行计算。可知

目标函数 f_2 为二次凸函数、 f_3 为线性函数, 文献 [14] 中已对负载不均度 f_1 函数的抽象形式做凸性证明, 所以本文所设置的多目标优化问题适用于配电网重构的研究。

3.2.2 NNC 法求解多目标问题

考虑 f_1 、 f_2 和 f_3 的多目标优化模型的紧凑形式如式 (47)–(48) 所示。

$$\min_{x \in C} \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})\} \quad (47)$$

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{x}; \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0, \underline{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}}(\mathbf{x})\} \quad (48)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为解的向量; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为多目标优化函数; $\mathbf{C}$ 为解集; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 分别为等式约束和不等式约束; $\underline{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$ 和 $\bar{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$ 分别为优化前后不等式约束。

多目标优化问题不存在单一的最优解, 每个解都在相互竞争的目标函数之间达成妥协, 此类最优解被称为 Pareto 最优解^[17]。一般情况下, 这些解在目标空间中形成一个超曲面, 称为 Pareto 前沿。带有三目标函数的多目标优化问题的 Pareto 前沿超曲面如图 2 所示。该情况下的超曲面在三维空间中退化为一个曲面^[24]。

本文采用 NNC 法求解多目标优化问题并获得其 Pareto 最优解, 方法如下。

1) 分别对 f_1 、 f_2 和 f_3 做单目标优化, 分别得到每

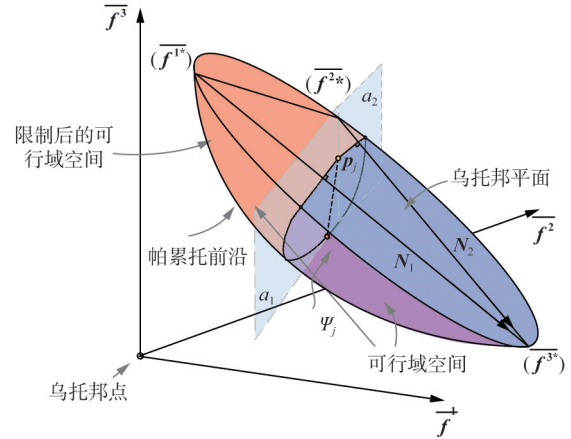


图 2 三目标优化问题的 NNC 方法图解

Fig. 2 Illustration of the NNC method for a three-objective optimisation problem

个目标函数的最优解 x^{1*} 、 x^{2*} 和 x^{3*} 与最优值 f_1^{1*} 、 f_2^{2*} 和 f_3^{3*} , 并记录在单目标优化的情况下, 其他两个目标函数的值, 则可得到 3 个端点坐标: $\mathbf{f}^{1*} = (f_1^{1*}, f_2^{1*}, f_3^{1*})$, $\mathbf{f}^{2*} = (f_1^{2*}, f_2^{2*}, f_3^{2*})$ 和 $\mathbf{f}^{3*} = (f_1^{3*}, f_2^{3*}, f_3^{3*})$, 通过连接目标空间中的 3 个端点可构造乌托邦面。3 个目标函数同时达到最小的点即为乌托邦点, 用 $(f_1^U, f_2^U, f_3^U) = (f_1^{1*}, f_2^{2*}, f_3^{3*})$ 表示。Pareto 前沿即为空间中的可行域位于乌托邦面与乌托邦点之间的部分。

2) 为避免不同目标函数数量纲与数量级差异, 需对目标函数分别进行归一化。以第 i 个目标函数为例, 可表示为:

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{(f_i(\mathbf{x}) - f_i^U)}{(f_i^N - f_i^U)} \quad (49)$$

式中: $\bar{f}_i(\mathbf{x})$ 为归一化后的目标函数值; $f_i^N = (f_1^N, f_2^N, f_3^N)$ 用于表示目标函数空间中的伪最差点, 即为所有目标函数值达到最大的点, 表示为:

$$f_i^N = \max\{f_i^{1*}, f_i^{2*}, f_i^{3*}\} \quad (50)$$

3) 归一化后形成的乌托邦面内部的任意点均可由 $\mathbf{f}^{1*}$ 、 $\mathbf{f}^{2*}$ 和 $\mathbf{f}^{3*}$ 的线性组合表示, 记第 j 个点为 $\mathbf{p}_j$, 则可表示为:

$$\mathbf{p}_j = \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} \mathbf{f}^{i*} = \begin{pmatrix} \beta_{1j} \\ \beta_{2j} \\ \beta_{3j} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \bar{f}_1^{1*} & \bar{f}_2^{1*} & \bar{f}_3^{1*} \\ \bar{f}_1^{2*} & \bar{f}_2^{2*} & \bar{f}_3^{2*} \\ \bar{f}_1^{3*} & \bar{f}_2^{3*} & \bar{f}_3^{3*} \end{pmatrix} \quad (51)$$

式中 $\sum_{i=1}^3 \beta_{ij} = 1$, β_{ij} 的取值方式可参考文献 [25]。

4) 令归一化后的乌托邦面向量 $\bar{\mathbf{N}}_1$ 为 $\bar{\mathbf{f}}^{3*}$ 指向 $\bar{\mathbf{f}}^{1*}$

的向量, $\overline{N}_2$ 为 $\overline{f}^{2*}$ 指向 $\overline{f}^{1*}$ 的向量。通过求解以下单目标优化问题, 即可得到乌托邦面中的点 p_j 所对应的 Pareto 最优解。

$$\min f_3(x) \quad (52)$$

$$g(x) = 0, \underline{h}(x) \leq h(x) \leq \overline{h}(x) \quad (53)$$

$$\overline{N}_k^T (\overline{F}(x) - p_j) \leq 0, \quad k = 1, 2 \quad (54)$$

$$\overline{F}(x) = (\overline{f}_1(x) \quad \overline{f}_2(x) \quad \overline{f}_3(x))^T \quad (55)$$

式(53)确定了 NNC 法的目标空间的可行域。基于式(51), 目标空间被限制为一个子空间, 如图2所示, 该子空间被垂直于向量 $\overline{N}_1$ 、 $\overline{N}_2$ 的平面 a_1 、 a_2 所包围, 通过求解式(52)~(55)的单目标优化问题, 即可得到每个 p_j 所对应的 Pareto 最优解 ψ_j 。

5) 重复步骤4)将每个 p_j 均代入式(52)~(55)中求解, 最终可得到多目标优化问题的 Pareto 前沿, 然后可通过逼近理想解排序法在一系列解中选取折中解用于后续的研究。

3.2.3 NNC法的改进

在具有3个及以上目标函数的优化问题中, NNC法无法搜索整个 Pareto 前沿。为解决此问题, 本文提出一种改进的 NNC 方法以捕获整个 Pareto 前沿, 方法如下。

1) 计算得到乌托邦面所在的平面与目标函数空间中可行域相交的边界, 由图3可见, 该边界也属于 Pareto 前沿的一部分, 计算步骤如下: 以图3中边 AC 为例, 设乌托邦朝向乌托邦点的法线方向为 n , 则可通过由点 A 到点 C 的向量 l_{13} 与 n 叉乘的结果得到垂直于边 AC 方向的向量, 将其归一化可得该方向的单位向量 n_{13} 。则可通过式(53)的约束与式(56)~(57)在目标函数空间中寻找 Pareto 前沿的边界 $\widehat{AC}$ 。

$$\min (-d) \quad (56)$$

$$\overline{F}(x) - p_{j1} + dn_{31} = 0 \quad (57)$$

式中: p_{j1} 为在边 AC 上的取点; d 为边 AC 与 $\widehat{AC}$ 的距离。

2) 仍以边 AC 为例, 对于在 3.2.2 节中所取的每个 p_{j1} , 均可通过步骤1)获得其与 $\widehat{AC}$ 的距离 d 。令线段 AC 上均匀取点的距离为 d_1 , 若 $d \geq d_1$, 则需要取点数量 $k = \text{Int}(d/d_1)$, 新增点之间的距离可取为 d_1 。

通过上述方法计算出完整的 Pareto 前沿后, 即

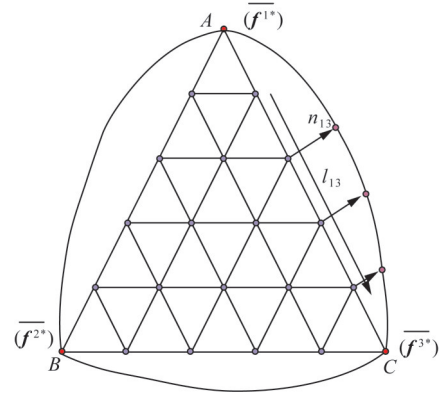


图3 改进 NNC 方法的取点示意图

Fig. 3 Sketch diagram of sampling of improved NNC method

可筛选出折中最优解作为多目标优化问题的结果。

4 算例分析

基于上述建立的 MISOCP 模型, 本文采用 Pyomo 算法包建模并调用 GUROBI 求解器求解, 硬件环境为 Inter core i7-9700, 3.00 GHz, 16 G 内存。

4.1 算例设置

本文对改进的 IEEE 33 配电系统进行仿真分析, 如图4所示。系统基准电压为 12.66 kV, 基准功率为 1 MW。母线 1 为平衡节点, 电压标幺值为 1.0, 设定其他母线的电压标幺值允许波动区间为 [0.9, 1.1]。其中 SOP 分别与系统的节点 9 与节点 15 相接, 其容量为 0.3 MVA, 损耗系数为 0.01。WT 与 PV 采用定功率因数发电, 功率因数为 0.95, 其中, 节点 17、27 接入 WT, 节点 7、13 接入 PV, 令系统清洁能源渗透率为 60% ((风光装机容量和)/(风光装机容量和+上级电网输入最大容量)=60%)。系统最大负荷为 3 715 kW+2 300 kvar。假设所有 PV、WT 和负荷服从图5所示的功率分布曲线。节点 20、33 接入 ESS。 C_{loss} 、 C_{sop} 、 C_{wind} 、 C_{pv} 的取值均为 400 元/MWh^[26-28]。

配电系统主要以辐射状运行, 并会根据日、周或季度的需要进行动态重构, 以减少系统的损失。运营者会根据负载、发电量的预测数据来决定下一阶段的网络配置。为避免降低配电系统中开关装置的寿命, 本文设定 24 h 为最小开关动作周期, 并将一天等分为 24 个时段。基于 DG 和负荷的日前预测曲线, 保持配电系统在每个时段与时段开始时刻的运行状态一致, 即在每个重构周期开始时刻之前确定一组最优的拓扑结构^[29]。

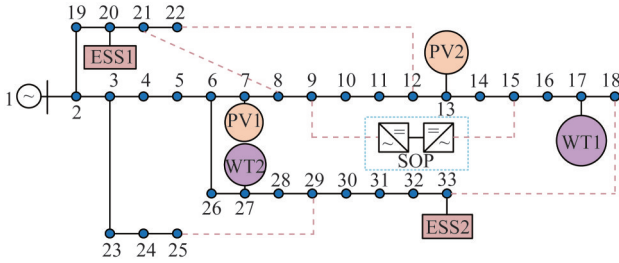


图4 改进的IEEE 33节点配电系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of improved IEEE 33-bus distribution system

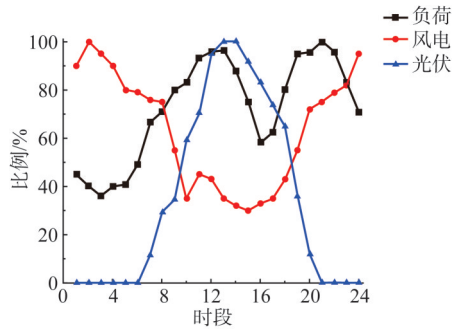


图5 负荷、WT与PV的24 h功率分布曲线

Fig. 5 24-hour power distribution curve for load, WT and PV

采用文献[30]中的价格弹性矩阵, 矩阵中具体数据如下。

$$E = \begin{bmatrix} -0.1232 & 0.1445 & 0.1223 \\ 0.2107 & -0.1124 & 0.1545 \\ 0.3304 & 0.2864 & -0.1322 \end{bmatrix}$$

基于采用DR前的负荷曲线的分析, 考虑各个时段负荷特征, 采用K-means聚类方法进行峰谷平3个时段的划分^[31], 确定用电峰时段为10—14、19—23, 谷时段为1—6, 平时段为7—9、15—18与24—1。

4.2 优化结果分析

在清洁能源渗透率为60%的情况下, 采用所提出的改进的NNC法, 三角形每条边按10等分取点, 即每条边上的 β 取值为: $\beta_{1j} = \{0, 1/10, 2/10, \dots, 1\}$, $\beta_{2j} = \{0, 1/10, \dots, 1 - \beta_{1j}\}$ 和 $\beta_{3j} = 1 - \beta_{1j} - \beta_{2j}$, 考虑乌托邦面外的点, 最后求得由133个解形成的Pareto前沿如图7所示, 平均计算时常为582 s。

采用逼近理想解排序法对Pareto前沿进行决策, 得到折中最优解如图6所示。折中解与单目标优化结果比较如表1所示, 可以看出, 折中解中对应的每个目标函数值都较为接近每个单目标优化问

题的最优解, 且优化结果明显优于单目标优化问题。

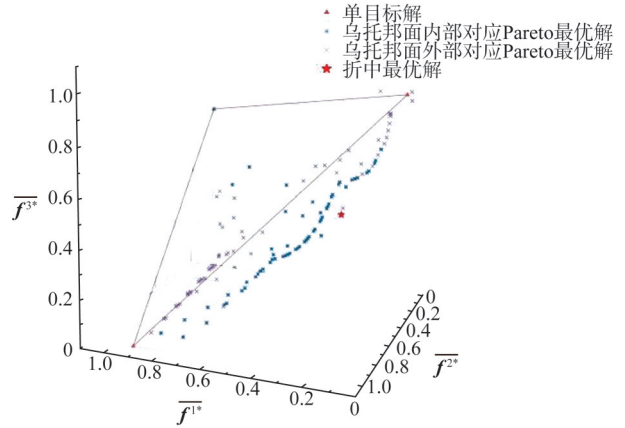


图6 考虑SOP与DR的配电网重构完整Pareto前沿

Fig. 6 Complete Pareto frontier for distribution network reconfiguration considering soft open point and demand response

由表1可知, IEEE 33节点配电系统在一天内的损耗费用、运营成本的总成本为238.57元, 其中, 网损费用与SOP损耗费用分别为215.56元、23.01元, 弃风弃光费用为0。可见采用本文的SOP与DR的策略, 可完全消纳渗透率为60%的清洁能源。此时系统断开线路 L_{10-11} 、 L_{12-13} 、 L_{30-31} 、 L_{8-21} , 峰谷平3个时段电价的优化结果为1.00元/kWh、0.31元/kWh、0.57元/kWh。实施DR前后的负荷曲线峰谷差由原来的0.55减少到0.4, 可见在DR后负荷的峰谷差有了一定改善。采用Pandapower工具包对系统潮流进行仿真分析, 得出与本文所采用的模型电压偏差小于0.51%, 验证了本文采用模型的准确性。

由图6与表2可看出, 折中解是最接近乌托邦点(0, 0, 0)的Pareto最优解, 且该折中最优解为改进的NNC法在乌托邦面外部取点得到的Pareto最优解, 此最优解稍优于仅在乌托邦面内部取点得到的Pareto最优解。可见, 寻找完整的Pareto前沿有利于提高决策动作的准确性。

图7—8为取折中解时SOP传输的有功功率与注入的无功功率曲线。由图7—8可知, SOP可对传输的有功功率进行控制, 有助于减小系统的网络损耗, 提高系统对清洁能源的消纳能力。SOP通过无功补偿提高配电系统的电压质量, 在峰时段注入的无功功率较多, 在谷时段注入的无功功率较少。

表 1 配电网重构单目标解与折中解的比较

Tab. 1 Comparison between single objective solutions and compromise solutions for reconfiguration of distribution networks

优化目标	$f_1/\text{元}$	$f_2/\text{元}$	f_3
f^{1*}	222.84	80.19	0.2507
f^{2*}	263.70	0	0.2443
f^{3*}	260.52	145.88	0.2257
折中解	238.57	0	0.2338

表 2 不同方案折中解的比较

Tab. 2 Comparison of compromise solutions among different solutions

优化目标	$f_1/\text{元}$	$f_2/\text{元}$	f_3
完整的 Pareto 前沿	238.57	0	0.2338
不完整的 Pareto 前沿	238.31	0	0.2345

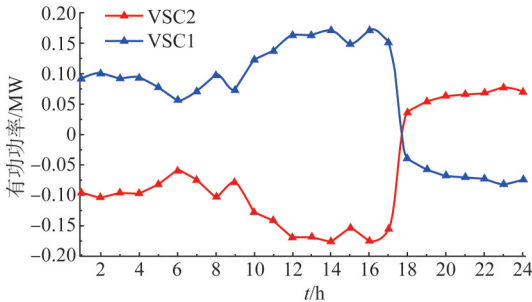


图 7 SOP 传输的有功功率

Fig. 7 Active powers transmitted by SOP

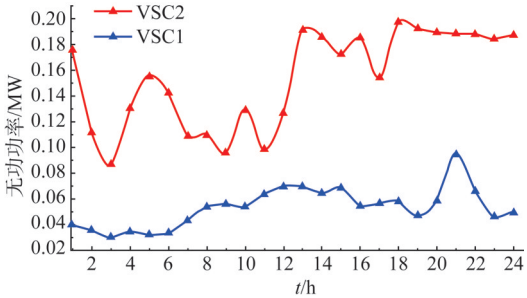


图 8 SOP 传输的无功功率

Fig. 8 Reactive powers transmitted by SOP

4.3 SOP 接入对配电网的影响

在考虑 DR 策略的前提下, 设置如下场景对比分析 SOP 接入位置与数量对配电网重构结果的影响。

- 场景 1: 线路 9-15 接入 SOP 的配电网重构;
- 场景 2: 线路 18-33 接入 SOP 的配电网重构;
- 场景 3: 线路 9-15、线路 18-33 接入 SOP 的配电网重构;
- 场景 4: 线路 9-15、线路 18-33、线路 8-21 接入

SOP 的配电网重构。

各个场景下的负载不均衡度与损耗费用、运营成本如表 3 所示。由表 3 可以看出, 场景 1 至场景 4 在不同位置接入 SOP 对配电网重构的结果具有不同影响。在清洁能源渗透率为 60 % 的情况下各个场景均能够确保清洁能源被系统完全吸收。当 SOP 替换线路 18-33 的联络开关时, 与 SOP 接入线路 9-15 之间相比, 损耗费用增加了 16.54 元, 其中网损增加了 35.01 元, 而 SOP 损耗减少了 18.47 元, 但负载不均衡度有所增加。随着 SOP 接入数量的增加, 网络损耗逐渐减少, 负载不均衡度也逐步降低, 减少了线路过载现象的可能性。SOP 接入位置不同对网损和负载不均衡度的影响存在一定差异, 因此在有限投资条件下规划 SOP 的最佳接入位置是必要的。

表 3 SOP 不同数量与接入位置的模型折中解结果

Tab. 3 Model compromise solution results of different numbers and accessing positions of SOP

场景 编号	$f_1/\text{元}$		$f_2/\text{元}$		f_3
	网络损耗	SOP 损耗	弃风	弃光	
1	302.14	0	22.87	7.28	0.2610
2	215.56	23.01	0	0	0.2338
3	250.57	4.54	0	0	0.2400
4	206.79	23.22	0	0	0.2320

4.4 不同配电网重构策略对比分析

在配电网接入高比例的清洁能源的情况下对本文所采用的同时考虑 SOP 与分时电价 DR 的方法进行对照分析。在清洁能源渗透率为 60 % 的情况下设置如下场景对配电网重构的结果进行对比分析。

- 场景 1: 不含 SOP 与 DR 的配电网重构;
- 场景 2: 含 SOP 不含 DR 的配电网重构 (SOP 接在线路 9-15);
- 场景 3: 含 DR 不含 SOP 的配电网重构;
- 场景 4: 含 SOP 与 DR 的配电网重构 (SOP 接在线路 9-15)。

不同场景下的配电网重构结果如表 4 所示, 从表 4 可以看出, 在本文所采用的同时考虑 SOP 与分时电价 DR 的策略下, 配电系统的损耗费用、运营成本与负载不均衡度最低。在清洁能源消纳方面, 场景 1 中大量风光未被消纳, 而与场景 2、3 对比可知, 分时电价 DR 策略通过对负荷的少量调整, 可

提高系统的清洁能源消纳能力；系统在接入 SOP 后，SOP 可进行功率控制与传输，有助于实现系统消纳更多的清洁能源出力。

表 4 不同场景下主动配电网重构模型求解结果

Tab. 4 Solving results of active distribution network reconstruction model in different scenarios

场景编号	$f_1/\text{元}$	$f_2/\text{元}$	f_3
1	501.48	120.87	0.331 5
2	310.92	7.94	0.265 9
3	302.14	0	0.261 0
4	238.57	0	0.233 8

图 9 为 4 种策略下的在用电高峰 21:00 的节点电压图，可看出采用本文所提出的方法后大部分节点电压质量是优于其他 3 种场景的。

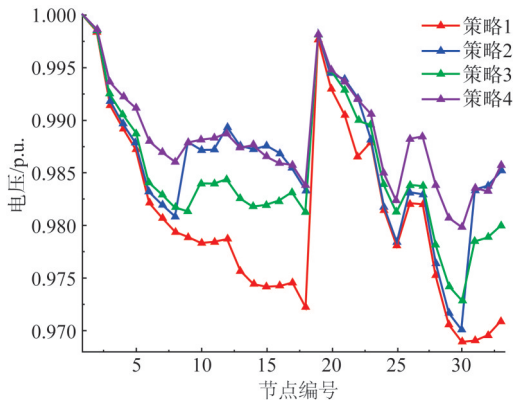


图 9 不同策略下 21:00 的节点电压曲线

Fig. 9 Voltage curves of the nodes at 21:00 under different strategies

4.5 考虑 SOP 与 DR 的 DG 渗透率灵敏度分析

表 5 为不同 DG 渗透率下的模型求解结果(线路 9-15 接入 SOP，考虑 DR)。表 5 中可以看出，随着 DG 渗透率的增加，在保证负载不均衡度的情况下，配电网重构的总费用先减小后增加。

当 DG 渗透率为 20% 时，尽管系统能够完全消纳 DG 的出力，但由于需要大量变电站的出力，导致配电网重构后运行的总费用较高，且网络损耗较大。随着 DG 渗透率的提升，在 SOP 与 DR 的参与下，系统可以完全消纳 DG 的出力。此时，负荷更有效地平衡了 DG 的出力，变电站的出力相应减少，从而降低了网络损耗费用，最终使得重构费用整体减少。然而，当 DG 渗透率超过 80% 时系统无法完全消纳 DG 的出力，导致配电网重构费用上升。

表 5 不同清洁能源渗透率情况下的模型折中解结果

Tab. 5 Compromise solution results of the model under different clean energy penetration rates

清洁能源渗透率/%	$f_1/\text{元}$	$f_2/\text{元}$	f_3
20	400.12	0	0.397 1
40	355.10	0	0.325 1
60	238.57	0	0.233 8
80	401.78	120.10	0.335 7

5 结论

本文在高比例清洁能源接入的背景下综合考虑损耗费用、运营成本和负载不均衡度，构建了 SOP 接入的柔性互联配电网多目标重构模型，并采用改进的 NNC 方法求解完整的 Pareto 前沿。通过算例分析得出以下结论。

1) 本文所提出的主动配电网重构模型在考虑 SOP 的基础上，结合分时电价 DR 约束将峰、谷和平时电价作为优化变量，通过“削峰填谷”来平抑负荷，实现负荷与 SOP 的协同作用，有效降低配电系统的损耗和负载不均衡度，从而提升系统的经济性和可靠性。

2) SOP 在配电系统中提供无功补偿，显著提升了系统的电压质量。同时，通过有功功率的传输与控制，SOP 能够减少系统的网络损耗，增强对风电和光伏的消纳能力，并降低线路负载的不均衡程度。

3) 针对三目标优化问题，本文采用的改进 NNC 方法能够获取完整的 Pareto 前沿，克服了传统 NNC 方法仅在乌托邦面内部取点的局限性，从而提高了决策的精确性和有效性。

然而，所提方法目前仅适用于求解三目标优化问题，尚未涵盖不确定性模型。未来研究将进一步拓展至四目标及以上的优化问题，并将不确定性因素纳入模型，以增强其适用性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674 - 4681.
LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674 - 4681.
- [2] 董雷, 吴怡, 张涛, 等. 基于强化学习的含智能软开关主动配

- 电网双层优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 59 – 68.
- DONG Lei, WU Yi, ZHANG Tao, et al. Reinforcement learning based double-layer optimization method for active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 59 – 68.
- [3] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168 – 175.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168 – 175.
- [4] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664 – 4676.
- QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664 – 4676.
- [5] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82 – 87.
- WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82 – 87.
- [6] 黄强, 袁晓冬, 张曦, 等. 基于网络重构与SNOP协调控制的交直流混合高压配电网阻塞管控模型[J]. 电工电能新技术, 2019, 28(2): 52 – 59.
- HUANG Qiang, YUAN Xiaodong, ZHANG Xi, et al. Coordinating SNOP control and AC-line switching for congestion management of hybrid urban grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 28(2): 52 – 59.
- [7] 卞栋, 卫志农, 孙国强, 等. 需求响应视角下的配电网不确定性重构模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 31 – 36, 53.
- BIAN Dong, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Distribution network uncertainty reconfiguration model in demand response perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 31 – 36, 53.
- [8] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116 – 123.
- HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116 – 123.
- [9] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86 – 94.
- ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86 – 94.
- [10] SHAHEEN A M, FARRAG S M, EL-SEHIEMY R A. MOPF solution methodology[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(2): 570 – 581.
- [11] NIKNAM T, NARIMANI M R, AGHAEI J, et al. Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost loss, emission and voltage stability index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012(6): 515 – 527.
- [12] GHASEMI M, GHAVIDEL S, GHANBARIAN M M, et al. Application of imperialist competitive algorithm with its modified techniques for multi-objective optimal power flow problem: a comparative study[J]. Information Sciences, 2014(281): 225 – 247.
- [13] PULLURI H, NARESH R, SHARMA V. An enhanced self-adaptive differential evolution based solution methodology for multi objective optimal power flow[J]. Applied Soft Computing, 2017(54): 229 – 245.
- [14] 谢敏, 张世平, 李弋升, 等. 基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 79 – 89.
- XIE Min, ZHANG Shiping, LI Yisheng, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid low-voltage distribution network based on multi-mode flexible interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 79 – 89.
- [15] 吴梅, 林舜江, 范官盛. 含风电的高维多目标安全约束机组组合问题求解方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 542 – 551.
- WU Hui, LIN Shunjiang, FAN Guansheng. Solution for multi-objective security constrained unit commitment with wind power[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 542 – 551.
- [16] 杨柳青, 林舜江, 刘明波, 等. 考虑风电接入的大型电力系统多目标动态优化调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 286 – 295.
- YANG Liuqing, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Multi-objective dynamic optimal dispatch for large-scale power systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 286 – 295.
- [17] MESSAC A, ISMAILY A, MATTSON C A. The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2003(25): 86 – 98.
- [18] MARLER R, ARORA J. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004(26): 369 – 395.
- [19] 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.
- [20] 黄培东, 詹红霞, 彭光斌, 等. 分时电价下考虑源网荷各侧收益的风电消纳模型[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 53 – 58.
- HUANG Peidong, ZHAN Hongxia, PENG Guangbin, et al. The model of wind power accommodation considering source network load on each side benefits in TOU price[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7): 53 – 58.
- [21] 吴耀武, 蔡芝菁, 娄素华, 等. 考虑电网负载均衡度的输电网规划模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 96 – 100.
- WU Yaowu, CAI Zhijing, LOU Suhua, et al. Transmission network expansion planning model considering network load balance[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(12): 96 –

- 100.
- [22] 向明旭, 杨知方, 余娟等. 配电网线性潮流模型通式及误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6):2053 – 2064.
- XIANG Mingxu, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Linear power flow model in distribution network: unified expression and error analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2053 – 2064
- [23] WANG Ying, XU Yin, LI Jiaxu, et al. On the radiality constraints for distribution system restoration and reconfiguration problems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3294 – 3296.
- [24] LIN Shun-jiang, LIU Mingbo, LI Qifeng, et al. Normalised normal constraint algorithm applied to multi-objective security-constrained optimal generation dispatch of large-scale power systems with wind farms and pumped-storage hydroelectric stations[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(6): 1539 – 1548
- [25] 颜远, 林舜江, 刘明波. 考虑备用动作约束的含风电场电力系统多目标动态优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(2):479 – 487.
- YAN Yuan, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi-objective optimal dynamic dispatch of power system with wind farms considering reserve action constraints [J], Power System Technology, 2018, 42(2): 479 – 487.
- [26] CHEN S, HU W, CHEN Z. Comprehensive cost minimization in distribution networks using segmented-time feeder reconfiguration and reactive power control of distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):983 – 993.
- [27] 马鑫, 郭瑞鹏, 王蕾, 等. 基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22):144 – 153.
- MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):144 – 153.
- [28] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电软开关运行与规划方法[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [29] HAGHIGHAT H. ZENG B. Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2666 – 2675.
- [30] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20):14 – 18.
- DING Wei, YUAN Jiahai, HU Zhaoguang. Time-of-use price decision model considering users reaction and satisfaction index [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (20): 14 – 18.
- [31] NUCHPRAYOON S. Electricity load classification using K-means clustering algorithm [C]//5th Brunei International Conference on Engineering and Technology (BICET 2014), November 1 – 3, 2014, Brunei. New York: IEEE, 2014: 1 – 5.

收稿日期: 2023-09-09; 网络首发日期: 2024-05-28

作者简介:

董凯元(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的运行优化与故障恢复, 202220114455@mail.scut.edu.cn;
谢敏(1978), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统优化规划与运行控制;
卢颖(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行优化与控制。

(上接第 36 页 Continued from Page 36)

- [24] 徐艳春, 蒋伟俊, 孙思涵, 等. 含高渗透率风电的配电网暂态电压量化评估方法[J]. 中国电力, 2022, 55(7):152 – 162.
- XU Yanchun, JIANG Weijun, SUN Sihan, et al. Quantitative evaluation method of transient voltage of distribution network with high permeability wind power [J]. Electric Power, 2022, 55(7):152 – 162.
- [25] 史法顺, 吴俊勇, 吴昊衍, 等. 基于深度学习的电力系统暂态功角与暂态电压稳定裕度一体化评估[J]. 电网技术, 2023, 47(2):731 – 740.
- SHI Fashun, WU Junyong, WU Haoyan, et al. Integrated evaluation of power system transient power angle and transient voltage stability margin based on deep learning [J]. Power System Technology, 2023, 47(2):731 – 740.
- [26] 吕哲, 葛怀畅, 郭庆来, 等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22):8041 – 8053.
- LÜ Zhe, GE Huaichang, GUO Qinglai, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving-end grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22):8041 – 8053.
- [27] 徐焕, 夏凡, 陈铨, 等. 基于 GCN-LSTM 的电力系统暂态电压稳定评估[J]. 高压电器, 2025, 61(1):104 – 111.
- XU Huan, XIA Fan, CHEN Shi, et al. Transient voltage stability assessment of power system based on GCN-LSTM [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 104 – 111.

收稿日期: 2023-10-05; 网络首发日期: 2024-05-20

作者简介:

刘洋(1982), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为新能源并网与运行, judy_liuy@126.com;
朱益华(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析, zhuyih@csg.cn;
伍双喜(1984), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统分析及控制, wusx03@163.com。