

引用格式: 张锴, 唐尧, 李学超, 等. 基于二阶锥松弛的柔性软开关选址定容与多周期功率流优化 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 185-192. ZHANG Kai, TANG Yao, LI Xuechao, et al. A soft open points siting, sizing, and multi-period power flow optimization based on second-order cone relaxation [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 185-192. DOI: [10.16516/j.cec.2025-050](https://doi.org/10.16516/j.cec.2025-050).

基于二阶锥松弛的柔性软开关选址定容与多周期功率流优化

张锴^{1,2,✉}, 唐尧¹, 李学超¹, 黄潇扬²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 511400;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: [目的]随着风能、光伏等分布式能源 (Distributed Generation, DG) 的广泛接入, 配电网在提高能源利用效率的同时, 也面临电压越限、潮流反转和线损增加等运行问题。柔性软开关 (Soft Open Point, SOP) 作为新型电力电子设备, 具有灵活调节潮流、增强网络可控性的优势, 成为构建柔性互联配电网的重要手段。为此, 文章针对 DG 出力不确定性和负荷时序性引发的运行挑战, 提出一种综合成本驱动的 SOP 选址定容与多周期优化调度方法。[方法]将 SOP 的 2 个换流器容量作为连续变量引入建模框架, 基于二阶锥松弛理论, 构建混合整数二阶锥规划 (Mixed-Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP) 模型, 在考虑 DG 出力波动和负荷变化的基础上, 最小化 SOP 配置成本与配电网线损成本之和, 实现对 SOP 位置、容量及 24 个时段功率流的协同优化。所提模型使用 YALMIP 建模工具与 Gurobi 12.0 求解器进行求解。[结果]在 IEEE 33 节点系统上开展算例分析, 结果表明: 所提方法能有效降低系统线损约 15%, 减少 SOP 投资与运营成本约 12%, 并显著改善电压分布特性, 提升电能质量。同时, 相较于不配置 SOP 的情况, 优化配置下系统运行的经济性与可靠性均得到显著增强。[结论]所提优化方法兼顾运行成本与电压质量, 具备良好的适应性工程实用性。在高比例 DG 接入背景下, 该方法为 SOP 的科学配置提供了切实可行的解决方案, 对提升配电网的柔性运行能力和新能源友好接纳水平具有重要意义。

关键词: 分布式能源; 配电网柔性互联; 柔性软开关; 混合整数二阶锥规划; 多周期优化调度; 功率流优化

DOI: [10.16516/j.cec.2025-050](https://doi.org/10.16516/j.cec.2025-050)

文章编号: 2095-8676(2025)05-0185-08

CSTR: [32391.14.j.cec.2025-050](https://doi.org/10.16516/j.cec.2025-050)

中图分类号: TM7; TM564



论文二维码

A Soft Open Points Siting, Sizing, and Multi-Period Power Flow Optimization Based on Second-Order Cone Relaxation

ZHANG Kai^{1,2,✉}, TANG Yao¹, LI Xuechao¹, HUANG Xiaoyang²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] With the large-scale integration of distributed energy resources such as wind and solar power, distribution networks are experiencing increasing operational challenges, including voltage violations, reverse power flows, and rising line losses. Soft open points (SOPs), as a new type of power electronic equipment, provide flexible power flow control and enhanced network controllability, making them a key solution for constructing flexible interconnected distribution networks. This paper addresses the configuration problem of SOPs under uncertainty in DG output and load variation. [Method] A mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) model was proposed to jointly optimize the location, sizing (as continuous variables), and multi-period power

收稿日期: 2025-03-03 修回日期: 2025-04-17

基金项目: 广东电网有限责任公司广州供电局科技项目“高可靠、低损耗、低成本的配电网软开关研究”(030114KC23110001); 广东省重点领域研发计划资助项目(2019B111109002)

flow of SOPs. The model aimed to minimize the total cost, including SOP installation and operation costs as well as network line losses, while accounting for the temporal characteristics of load and the uncertainty of DG output. The proposed model was solved using the YALMIP toolbox and the Gurobi 12.0 solver. **[Result]** Case studies on the IEEE 33-bus distribution system show that the proposed method reduces line losses by approximately 15% and lowers the SOP configuration cost by around 12%, while significantly improving voltage profiles and enhancing power quality. Compared with scenarios without SOPs, the optimized configuration also improves system economic efficiency and reliability. **[Conclusion]** The proposed SOP planning and optimization method effectively balances operational cost and voltage regulation performance, demonstrating strong adaptability and practical value. It offers a viable solution for SOP configuration under high penetration of distributed generation, contributing to enhanced flexibility and renewable energy hosting capacity of distribution networks.

Key words: distributed generation (DG); flexible interconnection of distribution networks; soft open point (SOP); mixed-integer second-order cone programming (MISOCP); multi-period optimal scheduling; power flow optimization

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着风能、光伏等分布式能源的广泛接入,配电网的运行正面临日益严峻的挑战^[1-3]。尽管分布式能源(Distributed Generation, DG)的接入在减少环境污染、提高能源利用效率方面具有显著优势,但其间歇性和不确定性特性可能引发一系列问题,例如电压越限、线损增加及潮流反转等^[4-6]。目前,传统的配电网调节手段(如变压器分接开关)难以有效应对这些问题,柔性互联配电网逐渐成为未来智能配电网的发展趋势^[7-10]。

柔性软开关(Soft Open Point, SOP)作为一种新型电力电子设备,能够在配电网中灵活实现功率调节^[11-12]。它可以灵活地安装于配电网的任意2个节点之间,并通过动态、精确的功率流控制,显著缓解高比例渗透的新能源带来的电压越限等问题,从而提升配电网的可控性和稳定性^[13-14]。鉴于SOP优异的技术性能特别适应于新型电力系统的波动性特征和柔性化调控需求,近年来引起了学术界和工程界越来越多的关注。

然而,当前SOP的造价高昂,如何在更需要的场景进行科学的配置,是当前一个热门课题。文献[15]采用遗传算法对SOP进行优化配置,但未计及DG的接入;此外,遗传算法的计算效率较低,难以满足实际应用对求解速度和收敛精度的要求。文献[16]利用强化学习方法配置SOP以最小化线损,但缺乏对不同拓扑配电网的普适性分析。文献[14]基于SOP对有源配电网进行了潮流优化,但未在目标函数中考虑SOP的安装与维护成本。文献[17]

提出了一种与传统无功调节手段相协调的SOP规划方法,但将SOP的安装容量简化为100 kVA的离散倍数,而非连续变量;此外,对于同一SOP仅考虑单一容量,可能导致最优配置的遗漏。文献[18]提出的优化配置目标追求周期最小经济成本,综合考虑设备运行、连接损耗、网间交互和容量配置等成本因素来配置柔性多状态开关接入位置和端口容量,进而采用改进遗传算法和二阶锥规划的混合算法求解。

总体上来看,SOP的配置优化问题引起了广泛的关注,但是在负荷时序和功率流多周期的运行优化方面考虑不足,影响了模型方法应用的实用性。为此本文将SOP 2个换流器的容量设为连续变量^[19],基于二阶锥松弛,同时考虑DG出力不确定性与负荷时序性,构建了综合成本驱动的混合整数二阶锥优化模型(Mixed-Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP),对SOP的选址、容量及一天内24个时段的动态功率流进行优化,以提升高比例分布式能源渗透下的配电网的可靠性和经济性。基于IEEE 33节点系统的算例分析表明,所提方法能够有效降低SOP配置成本,同时显著减少配电网线损并改善电能质量。

1 SOP定址选容与多周期功率流优化模型

1.1 SOP数学模型

如图1所示,SOP通过背靠背电压源型换流器(Back-to-Back Voltage Source Converter, B2B VSC)实现功率调节。

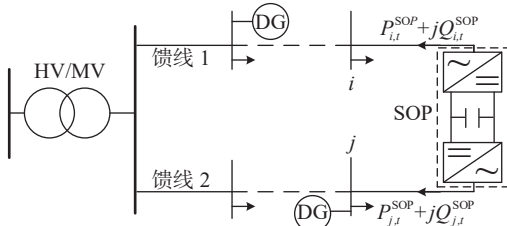


图 1 SOP 接入有源配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of an active distribution network with SOP integration

由于 B2B VSC 具有较高的能量转换效率, 其有功损耗可忽略不计^[16,20]。运行过程中涉及的功率约束和容量约束如下:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{SOP} + P_{j,t}^{SOP} = 0 \\ \sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \leq S_i^{SOP} \\ \sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \leq S_j^{SOP} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

i, j —— SOP 接入配电网的节点编号;

$P_{i,t}^{SOP}, P_{j,t}^{SOP}$ —— t 时段 SOP 两侧换流器注入网络的有功功率 (kW);

$Q_{i,t}^{SOP}, Q_{j,t}^{SOP}$ —— t 时段 SOP 两侧换流器注入网络的无功功率 (kVar);

S_i^{SOP}, S_j^{SOP} —— SOP 两侧换流器的容量 (kVA)。

通过将 SOP 两侧换流器注入网络的有功功率和无功功率设定为决策变量, 该模型实现了对 SOP 多周期功率流的优化配置。

1.2 目标函数

目标函数综合考虑了 SOP 的配置成本和配电网的线损成本, 如式 (2) 所示:

$$\min f = C_1(1 + \beta) + C_L \quad (2)$$

式中:

C_1 ——折算到一年的 SOP 配置成本 (万元);

β ——维护成本系数;

C_L ——配电网一年的线路损耗费用 (万元)。

SOP 折算到一年的配置成本为:

$$C_1 = \sum_{i=1}^N (c_1 S_i^{SOP}) / n \quad (3)$$

式中:

c_1 ——SOP 单位容量的配置成本 (万元);

N ——换流器的数量 (台);

n ——使用年限 (a)。

配电网 1 a 的线路损耗成本为:

$$C_L = 365\mu \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{t=1}^{n_t} (P_{i,t}^{\text{loss}} \Delta t) \quad (4)$$

式中:

$P_{i,t}^{\text{loss}}$ —— t 时段支路 i 上的线路损耗功率 (kW);

Δt ——每个时段的持续时间 (h);

n_t ——1 d 中的时段数量 (个);

n_b ——配电网线路数量 (条);

μ ——单位线损对应的电价 (元)。

1.3 约束条件

为了保证配电网的安全可靠运行, SOP 的选址定容优化需要考虑多方面的约束条件, 包括功率平衡等式约束、线路潮流等式约束、电流电压安全不等式约束、功率流等式约束和 SOP 配置数量约束。具体表达如下:

1.3.1 功率平衡约束

配电网中每个节点应满足注入节点功率等于流出节点功率, 即:

$$P_{i,t} + P_{i,t}^{SOP} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} = P_{i,t}^{\text{load}} \quad (5)$$

式中:

$P_{i,t}, P_{i,t}^{SOP}, P_{i,t}^{PV}, P_{i,t}^{WT}$ ——在 t 时段线路、SOP、光伏、风机注入 i 节点的有功功率 (kW);

$P_{i,t}^{\text{load}}$ —— t 时段 i 节点的负荷 (kW)。

1.3.2 线路潮流约束

配电网每条支路应满足以下潮流约束:

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{i,t} + x_{ij} Q_{i,t}) = 0 \quad (6)$$

式中:

$U_{i,t}, U_{j,t}$ —— t 时段 i 节点和 j 节点的电压 (kV);

r_{ij}, x_{ij} ——节点 i 和节点 j 之间支路的电阻、电抗 (Ω);

$I_{ij,t}$ ——节点 i 和节点 j 之间支路的电流 (kA);

$P_{i,t}$ —— t 时段节点 i 发出的有功功率 (kW);

$Q_{i,t}$ —— t 时段节点 i 发出的无功功率 (kVar)。

1.3.3 电压电流约束

节点电压与线路电流被限制在一定范围:

$$\begin{aligned} U_{\min} &\leq U_{i,t} \leq U_{\max} \\ I_{\max} &\leq I_{ij,t} \leq I_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$U_{\min}, U_{\max}$ ——节点电压的上下限 (kV) ;
 $U_{i,t}$ —— t 时段节点 i 的电压 (kV) ;
 $I_{\min}, I_{\max}$ ——线路电流的上下限 (kA) ;
 $I_{ij,t}$ ——节点 i 到节点 j 间的支路电流 (kA) 。

1.3.4 功率流约束

配电网节点电压、支路电流、节点发出功率三者之间应满足以下关系:

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad (8)$$

1.3.5 SOP 约束

除了式 (1) 以外, 综合考虑投资和运行维护的需要, SOP 还需要满足以下配置总数的约束:

$$\begin{aligned} P_{i,t}^{\text{SOP}} &\leq X_i^{\text{SOP}} \bar{P} \\ Q_{i,t}^{\text{SOP}} &\leq X_i^{\text{SOP}} \bar{Q} \\ \sum_{i=1}^{n_L} X_i^{\text{SOP}} &\leq n_s \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

X_i^{SOP} ——二元变量, 表示第 i 个备选地址是否配置 SOP;

$\bar{P}$ ——SOP 有功功率上限 (kW) ;

$\bar{Q}$ ——SOP 有功和无功功率上限 (kVar) ;

n_L ——备选地址数量 (个) ;

n_s ——SOP 最大配置个数 (个) 。

2 求解方法与步骤

2.1 二阶锥松弛

在配电网的运行优化中, 功率流方程是核心约束条件之一, 描述了节点电压、支路电流、有功功率和无功功率之间的耦合关系。然而, 功率流方程的非线性特性使得直接求解该方程会显著增加优化问题的复杂性。为提高求解效率, 并确保优化结果具备工程实用性, 通常采用松弛技术对功率流约束进行凸化处理。其中, 二阶锥松弛是目前广泛应用的松弛方法之一, 因其在理论严谨性与计算效率方面均具备显著优势^[21]。因此, 首先将式 (8) 重写为:

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2 \quad (10)$$

引入松弛变量 $I_{\text{sqr},t} = I_{ij,t}$, $U_{\text{sqr},t} = U_{i,t}$, 式 (10) 变为:

$$P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2 \leq I_{\text{sqr},t} U_{\text{sqr},t} \quad (11)$$

进一步引入三维向量 $\mathbf{x} = [2P_{i,t}, 2Q_{i,t}, I_{\text{sqr},t} - U_{\text{sqr},t}]$, 并利用二次型约束的几何特性, 将其重构为标准的二阶锥形式:

$$\|\mathbf{x}\|_2 = \sqrt{(2P_{i,t})^2 + (2Q_{i,t})^2 + (I_{\text{sqr},t} - U_{\text{sqr},t})^2} \leq I_{\text{sqr},t} + U_{\text{sqr},t} \quad (12)$$

其中, 左侧的欧几里得范数 $\|\mathbf{x}\|_2$ 表示由功率流约束推导出的几何特征, 而右侧的 $(I_{\text{sqr},t} + U_{\text{sqr},t})$ 则是二阶锥松弛的松弛边界。

通过二阶锥松弛, 非线性约束被转化为凸锥条件, 显著降低了计算复杂度并提升了求解效率。最终, 优化模型转化为混合整数二阶锥优化 (MISOCP), 实现高效求解。

2.2 求解步骤

该文提出的模型求解步骤如图 2 所示。

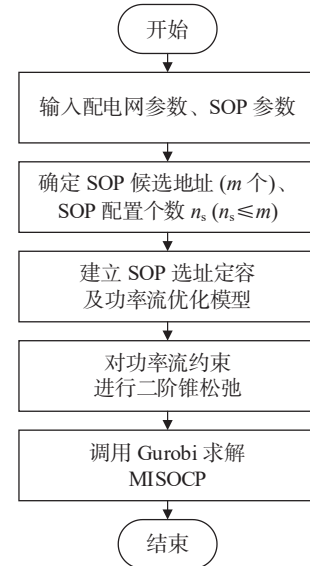


图 2 模型求解步骤

Fig. 2 Model solution procedure

首先, 输入配电网拓扑结构、线路参数; 配电网一日 24 个时段的典型负荷、风光出力数据; SOP 使用年限、成本参数。接着确定 SOP 的候选地址 (即 SOP 两端所连接的节点) 以及 SOP 最大配置个数 n_s 。建立优化模型后, 通过二阶锥约束将原优化问题转化为 MISOCP, 调用 Gurobi 求解。

3 算例仿真与分析

3.1 算例参数

该文采用 IEEE 33 节点系统验证所提方法的有

效性。加入光伏、风机后的 IEEE 33 节点系统拓扑结构如图 3 所示。

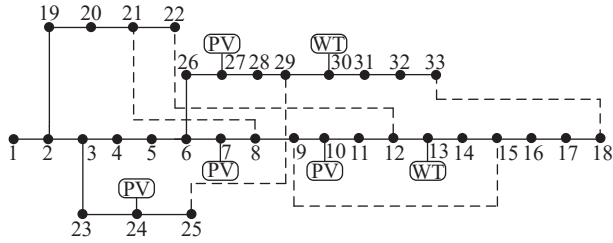


图 3 IEEE 33 节点系统拓扑

Fig. 3 Topology of the IEEE 33-bus system

其中, 节点 7、10、24、27 安装的光伏容量分别为 600 kVA、500 kVA、360 kVA、480 kVA, 节点 13、30 安装的风机容量分别为 400 kVA、500 kVA。

SOP 配置备选接入节点为 12—22、25—29、8—21、9—15、18—33 ($m=5$)。此外, 该配电网典型负荷、光伏、风电曲线均通过仿真方式生成, 用以模拟典型日内的功率变化特性, 如图 4 所示。本文聚焦于系统成本最小化问题, 对分布式电源出力进行简化, 以提升求解效率, 即假设光伏、风电出力等于该预测值。算例参数如表 1 所示。

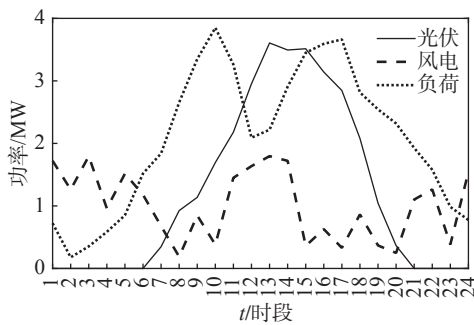


图 4 配电网不同时段负荷、光伏、风电曲线

Fig. 4 Load, PV, and wind power curves at different periods

3.2 验证分析

模型求解通过 YALMIP 工具箱实现, 调用的求解器为 Gurobi 12.0^[22], 硬件环境为 AMD Ryzen 7 4800H 处理器, 内存为 16 GB。根据求解结果, 二阶锥约束 (12) 对应的松弛误差数量级均在 $1e-8$ 及以下, 接近于零, 表明松弛方法在该模型中的应用精度非常高。求解所得的 SOP 选址与定容方案如表 2 所示。

从表 2 可以看出, SOP 接入的位置为节点

表 1 算例参数

Tab. 1 Case study parameters

参数	数值
SOP 使用年限/a	20
SOP 单位容量成本/(元·kVA ⁻¹)	1000
SOP 维护成本系数	0.2
电价/(元·kWh ⁻¹)	0.5
SOP 最大配置个数/个	3

表 2 SOP 选址定容方案

Tab. 2 SOP siting and sizing schemes

SOP 备选接入节点	X_{SOP}	两侧变流器容量/kVA
12—22	1	321.47/296.54
25—29	1	249.25/342.46
8—21	0	—
9—15	0	—
18—33	1	74.89/186.10

12—22、25—29、18—33, 两端变流器的配置容量各不相同。通过更精确的容量配置, 有效避免了容量冗余的问题。

此外, SOP 两侧变流器的多周期有功功率流和无功功率流优化结果分别如图 5 和图 6 所示。在 24 个时段中, SOP 12—22、25—29 传输的有功功率都显著高于 SOP 18—33, 这是由于 SOP 18—33 位于馈线末端, 对潮流的改变影响相对较小。此外, 1—7 时段、10—18 时段对应的有功功率流较大, 因为这 2 个时段分布式电源的出力显著高于负荷, 需要通过 SOP 灵活平衡潮流分布。相应地, 对于无功功率流, 其在 1—7 时段、10—18 时段的数值较小, 此时 SOP 有功功率调节占主导。结果表明, 所

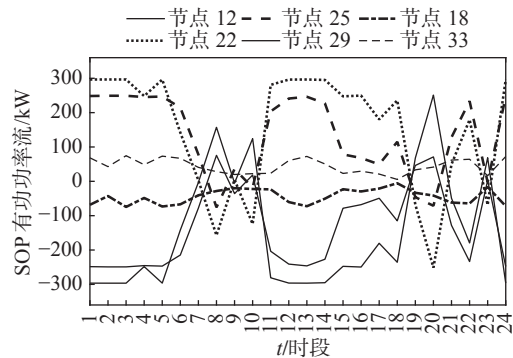


图 5 SOP 换流器多周期有功功率流

Fig. 5 Multi-period active power flow of SOP converters

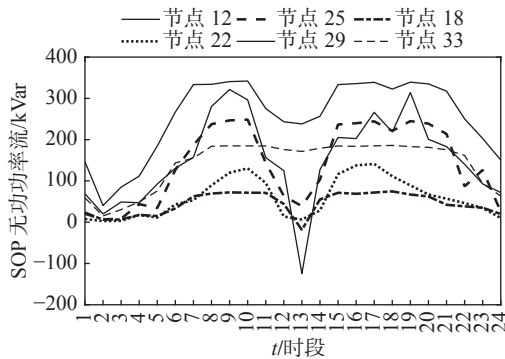


图 6 SOP 换流器多周期无功功率流

Fig. 6 Multi-period reactive power flow of SOP converters

提模型充分发挥了 SOP 在有功和无功功率灵活传输与分配方面的优势,有效提升了系统的运行效率与稳定性。

SOP 配置前的线路损耗通过潮流计算获取,进而计算线损成本。SOP 配置前后的成本对比如表 3 所示。可以看到,在配置 SOP 后,年线损费用降低了 15.54 万元,节约率达到 53.2%;总成本相比配置前下降了 6.72 万元,节约率达到 23.0%。这表明,通过优化配置 SOP,能够有效降低配电网线路损耗,从而显著降低配电网的运营成本。

表 3 SOP 配置前后的成本

Tab. 3 Costs before and after SOP deployment

成本	$C_L(1+\beta)$	C_L	f
配置 SOP 前	0	29.24	29.24
配置 SOP 后	8.82	13.70	22.52

不同时段的最大电压值如图 7 所示。配置 SOP 后,节点的最大电压值被限制在安全裕度 1.05 p.u.^[23],这表明通过合理配置 SOP,可以有效解决分布式电源接入配电网导致的节点过电压问题,从而改善电能质量。

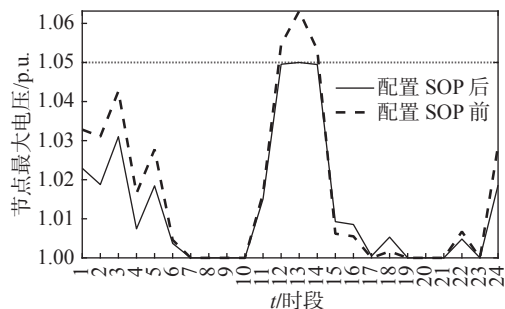


图 7 不同时段的最大电压值

Fig. 7 Maximum bus voltages at different periods

4 结论

该文提出的基于二阶锥松弛的 SOP 选址定容与多周期功率流优化方法,有效解决了新能源渗透引发的配电网安全和灵活运行问题。IEEE 33 节点系统的算例验证表明,通过合理配置 SOP,可以有效降低配电网的线路损耗,减少运营成本,并显著改善电压质量。此外,所提选址定容方法不仅提高了运行的经济性,还增强了配电网的可控性和稳定性。优化后的 SOP 配置为配电网在高比例分布式能源接入条件下的可靠运行提供了有效的解决方案,具有较强的应用前景和实际意义。

参考文献:

- [1] 夏成璧,朱李铀,李华杰,等.计及分布式电源接入的配电网承载能力提升策略[J].电气自动化,2025,47(2): 70-74, 78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2025.02.019.
- XIA C B, ZHU L Y, LI H J, et al. Strategies for improving the carrying capacity of distribution networks considering the integration of distributed power sources [J]. Electrical automation, 2025, 47(2): 70-74, 78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2025.02.019.
- [2] 王绪利,朱刘柱,施天成,等.面向双碳目标的分布式电源与大电网协同优化配置的深度学习方法研究[J].电气自动化,2025,47(2): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2025.02.001.
- WANG X L, ZHU L Z, SHI T C, et al. Research on deep learning method for collaborative optimization configuration of distributed power supply and large power grid for the dual carbon goals [J]. Electrical automation, 2025, 47(2): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2025.02.001.
- [3] 韦明杰,王聪博,余越,等.适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J].电力系统自动化,2023,47(22): 55-65. DOI: 10.7500/AEPS20230304006.
- WEI M J, WANG C B, YU Y, et al. Optimal configuration scheme of multi-staged protection in distribution network for integration of high proportion of distributed photovoltaic [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(22): 55-65. DOI: 10.7500/AEPS20230304006.
- [4] 郭雪丽,胡志勇,王爽,等.考虑大规模风光分层接入的配电网多层协调无功优化方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(12): 113-122. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231099.
- GUO X L, HU Z Y, WANG S, et al. A multi-layer coordinated reactive power optimization method for a distribution network considering large-scale distributed wind-photovoltaic hierarchical access [J]. Power system protection and control, 2024, 52(12): 113-122. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231099.
- [5] 章雪萌,孟祥娟,毛福斌,等.考虑多时间尺度的新能源特性对

- 地区电网的影响评估[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 166-173. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.020.
- ZHANG X M, MENG X J, MAO F B, et al. Impact assessment of new energy characteristics on regional power grid considering multiple time scales [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(5): 166-173. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.020.
- [6] 李学斌, 刘剑, 马麟, 等. 储能参与配电网削峰填谷对网络损耗及电压偏差的影响分析[J]. 南方能源建设, 2023, 10(6): 51-63. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.006.
- LI X B, LIU J, MA L, et al. Impact analysis of energy storage participating in peak shaving and valley filling for distribution network on network loss and voltage deviation [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 51-63. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.006.
- [7] 陈德扬, 樊玮, 钟康骅, 等. 柔性输配电技术在互联网数据中心的应用和展望[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 94-105. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.013.
- CHEN D Y, FAN W, ZHONG K H, et al. Application and prospects of flexible transmission and distribution technology in internet data center [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(5): 94-105. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.013.
- [8] 张勇军, 刘子文, 邓华强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 3-13. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001.
- ZHANG Y J, LIU Z W, DENG F Q. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks [J]. *Guangdong electric power*, 2020, 33(12): 3-13. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001.
- [9] 刘琦颖, 范晋衡, 曲大鹏, 等. 基于柔性互联配电网的大规模电动汽车接入影响研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 134-136, 194. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.11.039.
- LIU Q Y, FAN J H, QU D P, et al. Research on impact of large-scale electric vehicles access based on flexible interconnected distribution network [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2020, 49(11): 134-136, 194. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.11.039.
- [10] ZHANG Y, ZHONG K, DENG W, et al. An optimal scheduling of renewable energy in flexible interconnected distribution networks considering extreme scenarios [J]. *IET renewable power generation*, 2023, 17(10): 2531-2541. DOI: 10.1049/rpg2.12763.
- [11] 范心明, 孙广慧, 彭元泉, 等. 智能配电柔性多状态开关在主动配电网中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 40-48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.005.
- FAN X M, SUN G H, PENG Y Q, et al. Application of flexible distribution switch in active distribution network [J]. *Guangdong electric power*, 2020, 33(12): 40-48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.005.
- [12] 高万胜, 蔺红. 考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 49-61. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231481.
- GAO W S, LIN H. Distributionally robust low-carbon optimal scheduling considering flexibility deficiency risk in a distribution network [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(16): 49-61. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231481.
- [13] 孟凡卓, 贾宏宇, 冯璟瑶, 等. 基于智能软开关和储能的有源配电网优化运行[J]. 电气技术与经济, 2024(12): 352-355.
- MENG F Z, JIA H Y, FENG J Y, et al. Optimal operation of active distribution networks based on intelligent soft open points and energy storage [J]. *Electrical equipment and economy*, 2024(12): 352-355.
- [14] 宋亮, 邢志同, 毛晨旭, 等. 基于智能光储软开关的柔性有源配电网潮流优化[J]. 山东电力技术, 2024, 51(6): 36-42, 84. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.06.005.
- SONG L, XING Z T, MAO C X, et al. Power flow optimization of flexible active distribution network based on photovoltaic-energy storage SNOP [J]. *Shandong electric power*, 2024, 51(6): 36-42, 84. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.06.005.
- [15] 韩笑, 蒋剑涛, 孙杰, 等. 含柔性软开关的配电网供电恢复优化策略[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 54-56. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2022.04.016.
- HAN X, JIANG J T, SUN J, et al. Optimization strategy for power supply restoration of distribution network with soft open point [J]. *Electrical automation*, 2022, 44(4): 54-56. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2022.04.016.
- [16] 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. DOI: 10.7500/AEPS20220327004.
- DONG L, WU Y, ZHANG T, 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. DOI: 10.7500/AEPS20220327004.
- [17] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1897. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152649.
- WANG C S, SONG G Y, LI P, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 1889-1897. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152649.
- [18] 欧繁, 范心明, 彭元泉, 等. 主动配电网中多端柔性多状态开关的选址定容优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 142-149. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pccpc.2021.01.023.
- OU F, FAN X M, PENG Y Q, et al. Optimal sizing and placement of multi-terminal flexible distribution switch in active

distribution network [J]. *Power capacitor & reactive power compensation*, 2021, 42(1): 142-149. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.023](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.023).

- [19] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2022, 13(3): 1899-1910. DOI: [10.1109/TSG.2022.3148599](https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3148599).

- [20] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation [J]. *Applied energy*, 2016, 164: 245-257. DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.12.005](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.005).

- [21] 郭清元, 吴杰康, 莫超, 等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1385-1396. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.170247](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.170247).

GUO Q Y, WU J K, MO C, et al. A model for multi-objective coordination optimization of voltage and reactive power in distribution networks based on mixed integer second-order cone programming [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1385-1396. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.170247](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.170247).

- [22] Gurobi Optimization, LLC. Gurobi Optimizer Reference Manual, Version 12.0 [EB/OL]. (2024) [2025-04-17]. <https://www.gurobi.com>

- [23] 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. DOI: [10.7500/AEPS20230416003](https://doi.org/10.7500/AEPS20230416003).

WANG Q Q, YAO L Z, SHENG W X, 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. DOI: [10.7500/AEPS20230416003](https://doi.org/10.7500/AEPS20230416003).

作者简介:



张锴

张锴 (通信作者)

1989-, 男, 工程师, 博士在读, 主要研究方向为智能配用电、直流输电建模 (e-mail) ep_kzhang@mail.scut.edu.cn。



唐尧

唐尧

1996-, 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为配网运行、供电可靠性管理。



李学超

李学超

1993-, 男, 工程师, 学士, 主要研究方向为配电不停电检修技术、配电运维技术等。



黄潇扬

黄潇扬

2000-, 男, 博士, 主要从事虚拟电厂, 主要研究方向为灵活性资源刻画研究。

项目简介:

项目名称 广东电网有限责任公司广州供电局科技项目“高可靠、低损耗、低成本的配电网软开关研究”(030114KC23110001)

承担单位 华南理工大学电力学院

项目概述 项目建立配电网潮流调控能力、供电可靠性、分布式新能源消纳能力的量化评估方法, 提出考虑配电网地理及环境因素的 SOP 选址定容方法; 构建新型高可靠、低成本的 SOP 拓扑结构, 降低 SOP 的综合经济成本; 提出新型 SOP 在不同工况下的运行策略, 揭示 SOP 对配网故障特征量的影响规律。研究低压配电场景下的示范验证工程设计技术, 以支撑配电网柔性重构方面的技术突破和示范验证。

主要创新点 (1) 提出基于卫星遥感信息的配网关键环境及地理特征辨识方法, 建立考虑有限备选节点及馈线历史负荷信息的 SOP 选址定容方法; (2) 提出基于晶闸管的高可靠、低损耗、低成本的新型 SOP 拓扑结构及运行策略; (3) 研究新型 SOP 对配网故障特征量的影响规律及应对策略。

(编辑 叶筠英)