

新能源高渗透配电网柔性多状态开关的多目标优化控制策略

刘文军^{1,2}, 董伟杰³, 陈远扬⁴, 何书耘^{1,2}, 陈剑^{1,2}, 贾东强⁵

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410007; 3. 北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100092; 4. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 5. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘 要: 利用柔性多状态开关 (soft open point, SOP) 提升配电网的分布式能源 (distributed generation, DG) 消纳能力, 提出了配电台区 SOP 的多目标优化控制策略。通过分析配电网 SOP 的接入模式, 考虑其在分布式电源消纳与削峰填谷的作用, 构建了分布式能源日消纳量最大、控制成本最低和馈线日净负荷偏差最小的多目标模型。以改进的配电网算例进行仿真对比验证。结果表明: SOP 接入有利于提升新能源消纳, 并实现负载均衡。

关键词: 柔性多状态开关; 配电台区; 分布估计; 多目标优化

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202405027

0 引言

柔性多状态开关 (soft open point, SOP) 因其控制灵活性高、响应速度快、动作成本低等特征, 在配电网的潮流优化、馈线均衡、改善电压分布等起到重要作用^[1-4]。配电网中柔性多状态开关控制主要是功率调控和电压调控, 在配电网调控中的作用进行了研究^[5-7]。

在现有经济技术条件下, 结合配电网的运行实际, 对柔性互联设备进行优化控制, 不仅可以平衡馈线上的负载, 对高渗透率可再生能源配电台区运行的经济性、环保性和安全可靠性的具有重要的理论和实际意义^[8-13]。目前, SOP 研究主要包括优化调度、拓扑选型和选址定容等方面, 对于控制方式, 通常参考柔性直流输电系统中的主从控制和下垂控制。文献^[14]对配电台区柔性互联技术进行了综述, 主要包括规划建设、拓扑及网架结构设计、主要设备等方面。文献^[15]针对优化互联配电网综合运行成本以及智能软开关配置问题, 提出一种基于改进鲸鱼优化智能算法和二

阶锥规划的混合算法, 实现不同配电网间 SOP 柔性互联选址与系统运行成本优化。但文献^[14-15]未考虑含多个且不同类型的 SOP 的配电网的优化控制。文献^[16]提出了一种灵活的互连和储能系统的协调规划方法, 分析了柔性互连和储能的功率传输特性与不同安装位置和维护成本的差异。文献^[17]建立了柔性互联的主动配网协调优化二阶锥模型, 通过定量分析得到最优减损耗策略。以上研究主要为设备的协调控制, 对系统调度的研究还较少, 并且很少考虑新能源出力的间歇性和负荷出力的时序性。

SOP 控制模式多样化, 不同类型 SOP 和高比例 DG 接入改善了配电网潮流分布, 增加了配电网调控的灵活性。考虑到现阶段低压配电台区的网络结构复杂、负载不均衡、分布式能源利用率低, 采用先进的柔性互联技术手段进行调节。基于分布式电源的随机性、负荷的时序性和不同类型 SOP 的特点, 本文提出了一种基于分布估计算法的高比例新能源配电台区的柔性互联开关的优化控制方法, 从分布式电源消纳、网络损耗和日净负荷偏差方面建立了网络重构的多目标优化模型。针对所提多目标模型的特点, 提出了基于分布估计算法改进 NSGA II 优化相结合的优化求解方法的求解方法。采用复杂配电网算例进行仿真

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-12-17。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52237008); 国网湖南省电力有限公司科技项目 (5216A222000S)。

比较分析。

1 基于柔性互联设备接入运行模式的特征表达

接入 SOP 功能主要涉及实现馈线间的互联、改善重要负荷的电能质量、保证重要负荷的可靠供电、提高分布式电源的消纳等。不同应用场景 SOP 接入方式如图 1 所示。在图 1 中，数字表示端口个数。

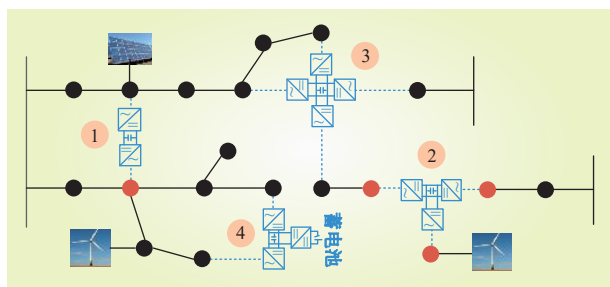


图 1 柔性多状态开关类型和接入位置
Fig. 1 The type and location for SOP

柔性互联设备的接入位置不同，其功能也不尽相同：两端 SOP 连接在不同母线之间可实现不同供电区馈线互联，而连接在 DG 与重要负荷之间可有效改善电能质量；三端 SOP 连接在不同节点之间可保证重要负荷的可靠连续供电；四端 SOP 连接在不同母线的不同节点之间可实现更大范围内不同供电区馈线互联；含储能的双端 SOP 可实现更大范围馈线间的实时功率调控，还能进一步提升能量转换效率。

SOP 的各端口运行模式主要包括有功和无功的控制、电压控制、频率控制。结合本文的研究内容，忽略频率控制，同时考虑带储能的柔性开关，提出特征向量 R_t 用于表达柔性开关 t 时刻的状态，具体表示为

$$R_t = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)$$

式中： R_1 为柔性开关接入位置向量； R_2 为有功调节向量； R_3 为无功调节向量； R_4 为电压调节向量； R_5 为储能当前具备的容量。

2 柔性互联设备控制的多目标模型

综合考虑柔性开关接入在负载功率平衡、提

高分布式电源的消纳、削峰填谷的作用及配电网运行经济性，建立了分布式能源日消纳量最大、馈线日净负荷偏差最小、网损最小的多目标模型。

分布式能源的日消纳量 f_2 最大主要指光伏、风电机组等不可控分布式电源在典型日内实际出力，即

$$\max f_2 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{SL}} \sum_{k=1}^{N_j} P_{t,j,k}^{\text{Con}} \quad (1)$$

式中： N_{SL} 为馈线数； N_j 为第 j 条馈线的分布式电源安装位置数； $P_{t,j,k}^{\text{Con}}$ 为 t 时刻第 j 条馈线的第 k 个分布式电源的有功消纳量。

柔性互联开关除了提高分布式电源的消纳，还具备平抑峰谷负荷的作用。因此，以日净负荷偏差 f_3 最小为目标函数，即

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^{N_{SL}} \sum_{t=1}^{24} \left(P_{j,t}^{\text{PV}} + \sum_{i=1}^{N_j} \zeta_i P_{j,t,i}^{\text{Cell}} - P_{j,t}^{\text{Load}} - P_{j,\text{av}}^{\text{Tot}} \right)^2 \quad (2)$$

式中： $P_{j,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{Cell}}$ 和 $P_{j,t}^{\text{Load}}$ 分别为 t 时刻第 j 条馈线的分布式电源、储能电量和负荷的总容量； $P_{j,\text{av}}^{\text{Tot}}$ 为系统的日总平均负荷。

网损用 f_4 表示，属于电力系统分析基础内容，故不再列举公式。

在含有 SOP 的配电网中，为保证电网的稳定运行，除满足常规节点电压、支路系统、系统潮流传统开关动作次数等约束外，还须考虑 SOP 安全稳定运行约束^[18-22]。

对于多端口 VSC 控制的 SOP，各端口之间存在约束：1) SOP 的一个端口采用定直流控制模式，其他端口采用有功潮流控制模式，所有端口输入和输出的有功功率和需要保持平衡，其他所有端口有功功率之和决定恒电压控制端口的有功功率大小和流向；2) 各端口的无功功率需满足各端口的容量约束限制，以保证 SOP 的安全稳定运行。

3 分布估计和改进 NSGA II 优化相结合的优化求解方法

本文模型数量多，且具有高维、非线性特征，故采用适用 NSGA II 进行优化求解。为了提高算法的收敛速度及求解精度，在多目标优化过

程中引入分布估计思想和精英保留策略生成新的种群。优化求解的总体流程如图 2 所示。

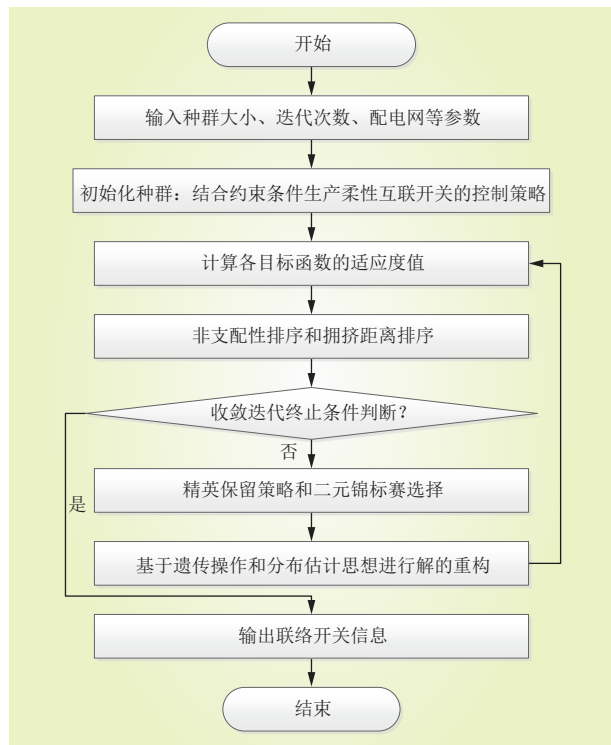


图 2 引入分布估计的 NSG II 优化流程
Fig. 2 Flowchart for the NSG II with distributed emulation

为了提高算法的收敛速度和保持解的多样性，NSGA II 改进主要包括种群编码、选择策略和遗传操作。采用分段式混合编码、分段式交叉

变异。

1) 分段式混合编码：即将种群包括 2 大部分如图 3 所示。第一部分为柔性开关编码，段数为柔性开关数。每一段代表一个柔性开关的信息，对于两端口柔性开关采用 9 位十进制表示，依次代接入位置向量、有功调节向量、无功调节向量、电压调节向量和储能向量，除储能向量外其余向量均由 2 位十进制组成，其中 0 代表没有调节输入。对于含储能的三端口柔性开关采用 13 位十进制表示，除储能向量外其余向量均由 3 位十进制组成，分别表示三个端口的输入输出。第二部分为传统开关编码，包括两段。第一段采用十进制，代表开关位置；第二段用二进制表示，0 代表打开，1 代表闭合。

2) 分段式交叉、变异：2 个种群的交叉变异针对柔性开关的可调参数及传统开关的整个片段。采用段内的多点交叉和变异，以保证解的多样性和提高搜索效率。对于柔性开关片段，每个柔性开关的编码除端口位置外其余进行多点交叉和变异；对于传统开关片段，开关位置和闭合状态的每一个片段都可进行多点交叉和变异。对于交叉产生的越界种群，通过随机生成新种群进行替换处理。

3) 精英保留策略：精英保留是保留所有单个目标最优值的个体及群中秩最高的 Pareto 最优个体直接保留到下一代。

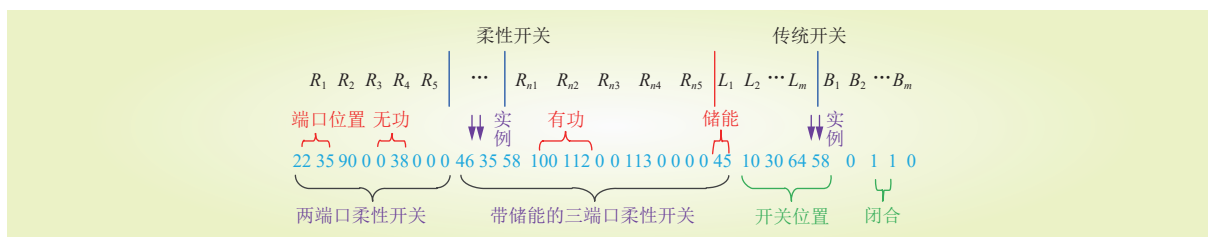


图 3 分段式种群编码
Fig. 3 The segmented coding

4) 非劣排序和拥挤距离：拥挤度是为了保存相似度低的解及解的多样性和均匀分布。

5) 基于混合分布估计思想进行解的重构：除了按非劣排序遗传变异进行种群更新外，分布估计概率模型也用于产生新的种群。二者产生新种群数比例按 1:1 构成。分布估计概率模型首先依据目标值和变量进行分类，然后依据每一类建立

相应概率模型，来刻画当前种群 pareto 解的分布。

4 算例仿真

4.1 算例参数

本文依据文献 [23] 的数据设计仿真算例，包括 4 条馈线、71 个节点和 76 条支路，总负荷量为

5 107 kW，额定电压 10 kV，拓扑结构如图 4 所示。增加的分布式电源信息见表 1，其日时序特性如图 5~6 所示，负荷日运行曲线如图 7 所示。遗传算法的参数：种群大小设为 80，交叉概率 0.9，变异概率 0.1，算法迭代次数为 50。考虑重构次数限制，基于时段动态划分方法，且将重构次数设置为 3 次，则重构时段为 00:00—09:00，09:00—18:00，18:00—24:00 共 3 个重构时段，重构操作发生在 00:00、09:00、18:00 这 3 个时间点，最大开关次数为 30。

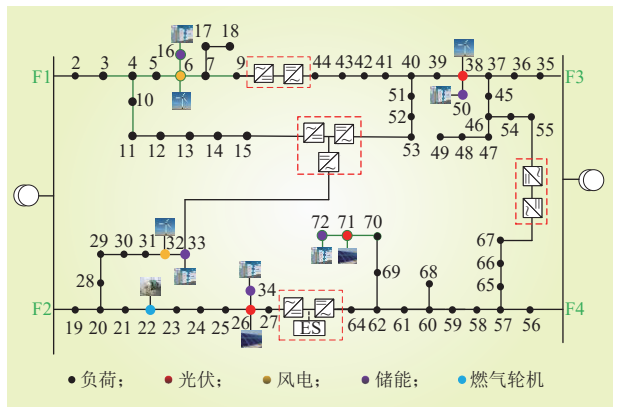


图 4 柔性配电网拓扑结构
Fig. 4 Topological structure for flexible distribution network

表 1 分布式电源信息 Table 1 Information for distributed resource			
分布式电源	位置	容量/(kV·A)	有功功率/kW
光伏	26	500	450
光伏	71	430	350
风电	32	400	360
风电	38	380	360
风电	6	420	380
电池	16	600	480
电池	33	500	450
电池	34	500	450
电池	50	400	350
电池	72	500	450
燃气轮机	22	500	450

采用改进 NSGA 算法求解得到的部分 Pareto 方案及目标值见表 2~3。所得上层目标部分 Pareto 前沿解及对应的下层目标函数值如图 8 所示。由表 3 可知，SOP 的加入能明显提升新能源

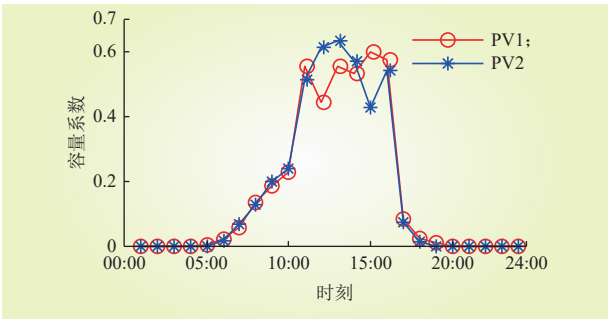


图 5 光伏出力
Fig. 5 The output of photovoltaic power

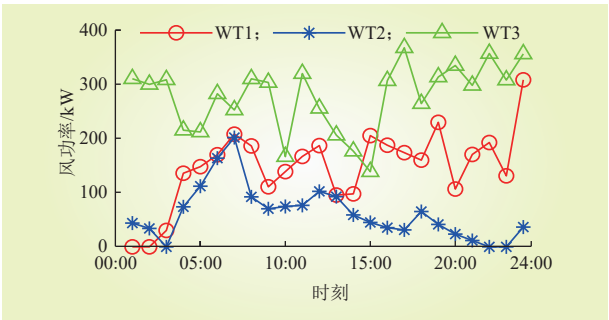


图 6 风电出力
Fig. 6 The output of wind power

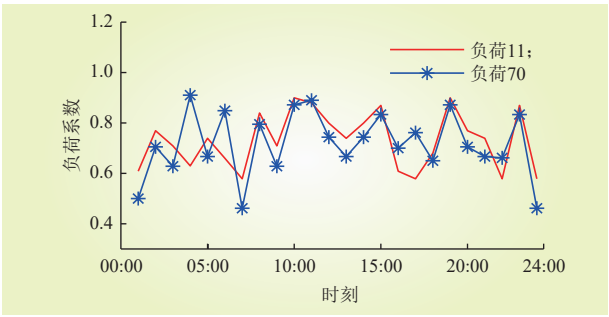


图 7 24 小时负荷分布曲线
Fig. 7 24-hour distribution curve for load

日消纳量，有效降低网络损耗与日净负荷方差。采用所提求解方法得到 4 种重构方案，分布式电源消纳量明显提升，日净负荷方差与网损均有所下降，说明本文所提优化模型和求解方法有一定优越性。通常情况下，SOP 的直流母线上并没有配置储能装置，因此 SOP 只能在所连接的馈线之间分配 DG 的波动功率。但需要保证 SOP 所连接的每条馈线的电压都保持在合理范围内，当 DG 的波动功率超出一个范围时，仅依靠 SOP 来解决电压的越限问题是不可行的，因此对含 SOP 的配电网消纳 DG 的最大能力进行分析是很有必要的。

表 2 部分传统开关状态
Table 2 Some pareto frontier solution

方案	重构时段	断开开关
1	00:00	14-15、23-24、42-43、51-52、65-66
	09:00	12-13、29-30、42-43、46-54、59-60
	18:00	23-24、30-31、41-42、40-51、46-54
2	00:00	12-13、25-26、29-30、40-41、66-67
	09:00	13-14、30-31、41-42、46-54、57-65
	18:00	23-24、30-31、40-51、42-43、65-66
3	00:00	12-13、26-27、30-31、42-43、46-54
	09:00	23-24、31-32、40-51、41-42、45-46
	18:00	26-27、30-31、42-43、46-54、58-59
4	00:00	12-13、23-24、30-31、40-51、65-66
	09:00	13-14、23-24、39-40、40-41、45-46
	18:00	25-26、32-33、42-43、51-52、46-54

表 3 目标函数值
Table 3 objective function

方案	分布式电源消 纳量/(MW·h)	日净负荷 偏差/MW ²	网损/ (kW·h)
SOP加入前	18.529	1.476	3310.25
A1	21.826	1.072	2414.61
A2	20.763	0.814	2386.38
A3	19.850	1.181	2363.05
A4	20.947	0.938	2391.13

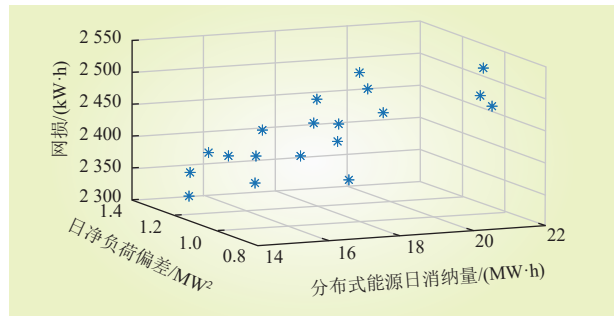


图 8 多目标 Pareto 解集
Fig. 8 Pareto solution for multi-objectives

以三端 SOP 为例分析各个端口的功率流动。3 个端口的传输有功功率和补偿无功功率的曲线如图 9 所示。从图 9 a) 可看出，SOP 从 33 节点向 15 和 53 节点传输有功功率，改善系统的潮流分布。因 DG 接入在端口 33 所连接的馈线，可同时为两条馈线传输有功功率，其传输曲线的波动幅度较大。从图 9 b) 中可以看出，SOP 在配电网正

常运行时通过调节有功功率来改善潮流分布；SOP 在电压越下限时，通过提供无功功率补偿来优化系统电压分布。

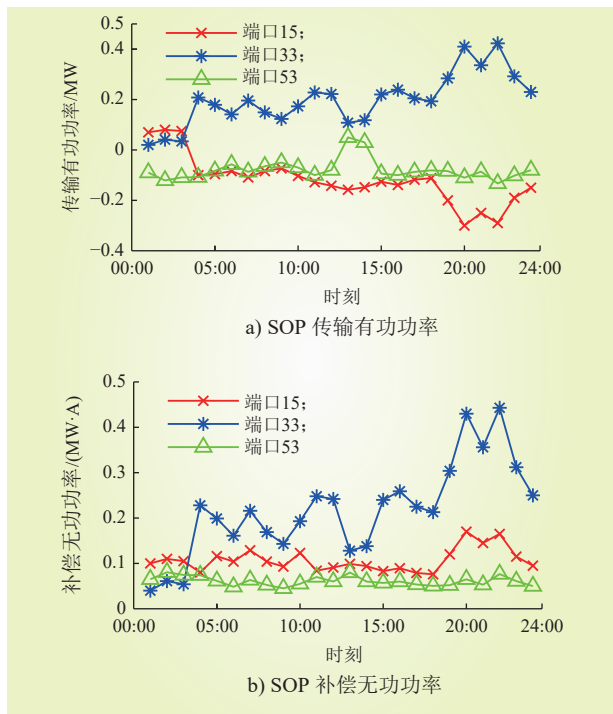


图 9 SOP 传输有功和补偿无功
Fig. 9 Active power transmission and reactive power compensation of SOP

4.2 算法性能仿真分析

为验证本文所提算法的优越性，本文与文献 [24] 中 NSGA-Ⅱ 引入的精英策略、文献 [25] 中引入的概率选择算子和混合交叉算子进行仿真对比分析，仿真优化求解效率如图 10 所示。由图 10 可知，在种群数量低于 30 时，其他方法求解效率略高于本文所提方法。随着种群数量的增大，本

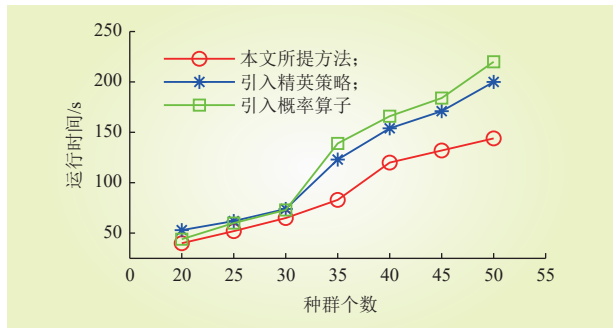


图 10 不同方法求解效率对比
Fig. 10 Comparison of solving efficiency of different methods

文所提方法优势逐渐明显。在新能源高渗透场景下^[26-30], 本文采用分段式混合编码、分段式交叉变异以增加解的多样性和提高算法搜索效率, 引入混合分布估计思想进行优化求解, 通过优秀个体概率模型采样生成下一代群体, 控制了优势种群的产生, 在保证结果全局和局部最优的同时, 加快了种群进化, 提高了算法的优化求解效率。

5 结论

考虑新能源消纳和储能削峰填谷, 本文提出了一种适用于复杂配电网的柔性多状态开关优化控制策略, 得到如下结论。

1) 充分考虑了现阶段低压配电台区的网络结构复杂性、分布式电源的随机性、负荷的时序性和不同类型 SOP 接入对配电网的影响, 构建了复杂配电网的柔性多状态开关的多目标优化调控模型。

2) 构建的多目标优化模型, 以改善新能源消纳、降低网损并发挥储能设备的削峰填谷作用。根据所提模型的高维度和强非线性, 采用了分布估计和改进 NSGA II 相结合的方法进行优化求解。

3) 改进的复杂配电网仿真表明, 所构建模型可以权衡新能源消纳、网损和配电网的峰值转移, 所提算法可以高效解决约束、非线性多目标优化问题。

参考文献:

- [1] 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.
SONG Liang, XING Zhitong, MAO Chenxu, *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.
- [2] 曾永浩, 范心明, 彭元泉, 等. 三端柔性多状态开关运行控制与示范应用[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 97-103.
ZENG Yonghao, FAN Xinming, PENG Yuanquan, *et al.* Operation and application of flexible distribution multi-state switch with three terminals[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 97-103.
- [3] 徐晶, 赵亮, 张梁, 等. 考虑移动储能接入的柔性配电网运行优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 112-119.
XU Jing, ZHAO Liang, ZHANG Liang, *et al.* Operation optimization method for flexible distribution network considering the integration of mobile energy storage[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 112-119.
- [4] 陈峰, 方建亮, 陆海清, 等. 基于区段开关图的配电网开关状态辨识[J]. 浙江电力, 2023, 42(8): 100-106.
CHEN Feng, FANG Jianliang, LU Haiqing, *et al.* Breaker state identification for distribution network based on section breaker graph[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 100-106.
- [5] 蒋维, 李新, 王圣, 等. 含储能的多端口柔性合环开关协调控制研究[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 38-48.
JIANG Wei, LI Xin, WANG Sheng, *et al.* Research on coordinated control strategy of multi-port flexible closed-loop switch with energy storage system[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 38-48.
- [6] 蔡欢, 袁旭峰, 熊炜, 等. 柔性互联配电网运行调度研究综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 92-99, 106.
CAI Huan, YUAN Xufeng, XIONG Wei, *et al.* Review on operation scheduling of flexible interconnected distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 92-99, 106.
- [7] 秦清, 韩蓓, 李国杰, 等. 含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4444-4458.
QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, *et al.* Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4444-4458.
- [8] 王钦, 陈业夫, 蔡新雷, 等. 考虑柔性负荷和阶梯型碳交易的低碳经济优化调度策略[J]. 广东电力, 2024, 37(1): 76-85.
WANG Qin, CHEN Yefu, CAI Xinlei, *et al.* Optimization scheduling strategy for low-carbon economy considering flexible loads and tiered carbon trading[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(1): 76-85.
- [9] 杨德林, 谭令其, 欧阳文艳, 等. 半桥型柔性直流换流器功率模块典型故障分析[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(1): 84-90.
YANG Delin, TAN Lingqi, OUYANG Wenyan, *et al.* Typical fault analysis of power module of half-bridge flexible DC converter[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(1): 84-90.
- [10] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 8-18.
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, *et al.* Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 8-18.
- [11] 伏绍鑫, 张路, 唐翰峰, 等. 考虑柔性电热负荷的区域综合能源系统

- 低碳经济调度[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(5): 417–428.
- FU Shaoxin, ZHANG Lu, TANG Hanfeng, *et al.* Low-carbon economic dispatch of community integrated energy system considering flexible electric heating load[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(5): 417–428.
- [12] 孙银锋, 夏大朋, 高梓淳. 基于蒙特卡罗模拟法的柔性交直流混联配电网概率潮流计算[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(2): 82–92.
- SUN Yinfeng, XIA Dapeng, GAO Zichun. Flexible AC/DC hybrid distribution network based on Monte Carlo simulation probabilistic load flow calculation[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(2): 82–92.
- [13] 徐重西, 王明月, 刘天元, 等. 非理想通信环境下主动配电网柔性负荷建模与优化控制方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(11): 104–113.
- XU Chongyou, WANG Mingyue, LIU Tianyuan, *et al.* A modeling and optimal control method of flexible load in the active distribution networks in non-ideal communication environments[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 104–113.
- [14] 徐旖旎, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3986–4001.
- XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, *et al.* Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3986–4001.
- [15] 徐波, 熊国江, 叶方慧. 基于智能软开关优化配置的配电网柔性互联策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 86–96.
- XU Bo, XIONG Guojiang, YE Fanghui. A flexible interconnection strategy for distribution networks based on intelligent soft-open point configuration[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 86–96.
- [16] LI J G, ZHANG L, ZHANG B, *et al.* Coordinated planning for flexible interconnection and energy storage system in low-voltage distribution networks to improve the accommodation capacity of photovoltaic[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 700–713.
- [17] YAN X W, WANG Q G, BU J Y. High penetration PV active distribution network power flow optimization and loss reduction based on flexible interconnection technology[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 226: 109839.
- [18] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有对称辅助电路的谐振直流环节三电平软开关逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4584–4593.
- WANG Qiang, LIU Yansong, CHEN Xiangxue, *et al.* Resonant DC link three-level soft-switching inverter with symmetrical auxiliary circuits[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4584–4593.
- [19] 张晋铭, 欧阳森, 辛曦, 等. 高渗透率分布式电源影响下配电网极限线损计算方法[J]. 广东电力, 2023, 36(4): 21–31.
- ZHANG Jinming, OUYANG Sen, XIN Xi, *et al.* Calculation method of limit line loss of distribution network under influence of high-penetration distributed generation[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(4): 21–31.
- [20] 王辉, 王勇, 张晓滨, 等. 构网型分布式电源渗透率高的微电网潮流计算及优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 35–43.
- WANG Hui, WANG Yong, ZHANG Xiaobin, *et al.* Power flow calculation and optimization control of the microgrid with high penetration of grid-forming distributed generators[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 35–43.
- [21] 徐恒辉, 姚杰, 周萍, 等. 基于运行数据的光伏电站状态评估方法研究[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(5): 450–456.
- XU Henghui, YAO Jie, ZHOU Ping, *et al.* Research on photovoltaic power plant state evaluation based on operating data[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(5): 450–456.
- [22] 印云刚, 刘闯, 何其新, 等. 基于改进狼群算法的含风电配电网无功优化[J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(3): 1–7.
- YIN Yungang, LIU Chuang, HE Qixin, *et al.* Reactive power optimization of wind power distribution network based on improved wolf pack algorithm[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(3): 1–7.
- [23] TOLABI H B, ALI M H, SHAHRIN BIN MD AYOB, *et al.* Novel hybrid fuzzy-Bees algorithm for optimal feeder multi-objective reconfiguration by considering multiple-distributed generation[J]. Energy, 2014, 71: 507–515.
- [24] 陈红坤, 夏方舟, 袁栋, 等. 直流配电网中含光伏的电动汽车快速充电站优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 53–60.
- CHEN Hongkun, XIA Fangzhou, YUAN Dong, *et al.* Optimal configuration scheme of fast electric vehicle charging station with photovoltaic in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 53–60.
- [25] 王青松, 谢兴生, 周光临. 一种改进的非支配排序遗传算法[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(5): 28–32, 36.
- WANG Qingsong, XIE Xingsheng, ZHOU Guanglin. An improved non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Information Technology and Network Security, 2019, 38(5): 28–32, 36.
- [26] 杨彪, 颜伟, 莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61–67.

- YANG Biao, YAN Wei, MO Jingshan. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 61–67.
- [27] 黄越辉, 卢慧, 李建华, 等. 新能源极端出力特性及典型电力电量平衡场景研究 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 1–9.
- HUANG Yuehui, LU Hui, LI Jianhua, *et al.* A study on the characteristics of renewable energy extreme output and typical power and energy balancing scenarios for new type power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 1–9.
- [28] 杨彪, 李佳蓉, 魏子珂. 美国分布式能源发展对我国的启示 [J]. 中国电力企业管理, 2024(25): 94–96.
- [29] 呼斯乐, 王渊, 于源, 等. 考虑风光不确定性与灵活性指标的园区综合能源系统最优调度 [J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(1): 15–21.
- HU Sile, WANG Yuan, YU Yuan, *et al.* Optimal dispatching of integrated energy system in industrial parks considering wind and solar uncertainty and flexibility indicators[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(1): 15–21.
- [30] 李思能, 刘志勇, 曾庆彬. 高比例新能源接入的输电网外送通道与储能分布鲁棒优化协同规划方法 [J]. 广东电力, 2024, 37(1): 49–59.
- LI Sineng, LIU Zhiyong, ZENG Qingbin. Distributionally robust optimization collaborative planning method for transmission network external channel and energy storage with high proportion of renewable energy[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(1): 49–59.

作者简介:

刘文军 (1986—), 男, 高级工程师, 从事配电台区柔性互联、微电网等研究, E-mail: wenjunliu1346@163.com;

董伟杰 (1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事分布式电源并网技术、微电网等研究, E-mail: dongweijie@bistu.edu.cn.

(责任编辑 杨彪)

Multi-objective Optimization Control Strategy for Soft Open Point in Distribution Network with High Penetration of DG

LIU Wenjun^{1,2}, DONG Weijie³, CHEN Yuanyang⁴, HE Shuyun^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, JIA Dongqiang⁵

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410007, China; 3. Beijing University of Information Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China; 4. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410004, China; 5. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: A multi-objective optimization control strategy for distribution station SOP is proposed to enhance the distributed generation (DG) consumption capability of the distribution network by utilizing multi soft open point (SOP). By analyzing the access mode of SOP in the distribution network and considering its role in distributed power consumption and peak shaving, a multi-objective model was constructed to maximize the daily consumption of distributed energy, minimize control costs, and minimize the deviation of daily net load of feeder lines. Conduct simulation comparison and verification using an improved distribution network example. The results indicate that SOP integration is beneficial for improving the consumption of new energy and achieving load balancing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52237008), Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. (No.5216A222000S).

Keywords: soft open point; distribution network; distributed estimation; multi-objective optimization