面向配电网最大供电能力的多层级智能软开关优化配置

王鹤，周子淇，李洋
（东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室，132000，吉林吉林）

摘要：针对配电网馈线容量对于系统最大供电能力提升的限制，提出了一种多层级智能软开关（soft open point，SOP）优化配置策略，通过SOP装置优化配置实现了系统供电能力经济化提升。首先，分析多层级柔性互联配电网的负载均衡特性，得到配电网多层级负载率与SOP接入位置的耦合关系；然后，建立基于负载均衡能力的馈线互济潜能评估模型，以确定SOP最优接入位置；同时，以系统年综合收益最大为目标，建立了基于负荷增长空间分析法的定容优化模型，在最优接入位置的基础上确定SOP最优安装容量；最后，基于IEEE 33节点互联系统以及扩展网络进行验证。结果表明：相较于未考虑负载均衡的配置策略，正常情形下，本文所提策略年综合收益提高26.86%；极端情形下，所提策略负荷日综合收益提高7.09%。与传统SOP装置优化配置策略相比，所提配置策略结合了智能软开关和储能的技术优势，在实际配电网馈线容量差异化背景下，缓解了传统系统馈线末端电压以及容量约束对于最大供电能力提升的限制，在保证系统供电可靠性的前提下有效提升了系统运行经济性。

关键词：配电网；柔性互联；智能软开关；优化配置；负载均衡；最大供电能力
中图分类号：TM727 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxbXXXXXX001 **文章编号**：0253-987X(XXXX)XX-0001-12

Optimal Configuration of Multi-Level Soft Open Points for the Maximum Power Supply Capacity of Distribution Networks

WANG He, ZHOU Ziqi, LI Yang
(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132000, China)

Abstract: To address the limitation imposed by feeder capacity on enhancing the maximum power supply capacity of distribution networks, an optimal configuration strategy for multi-level soft open points (SOPs) is proposed. This strategy achieves an economical improvement in the system′s power supply capacity through the optimal configuration of SOP devices. First, the load balancing characteristics of multi-level flexible interconnected distribution networks are analyzed to determine the coupling relationship between the multi-level load rate of the distribution network and the SOP connection locations. Then, a feeder mutual support potential evaluation model based on load balancing capability is established to determine the optimal SOP connection locations. Meanwhile, with the objective of maximizing the annual comprehensive benefit of the system, a capacity

收稿日期：2026-01-11。
网络出版日期：2026-04-13 网络出版地址：

optimization model based on the load growth space analysis method is developed to determine the optimal installed capacity of SOPs at the identified optimal connection locations. Finally, the proposed method is validated using the IEEE 33-bus interconnected system and its extended network. The results indicate that, compared with the configuration strategy without considering load balancing, the proposed strategy increases the annual comprehensive revenue by 26.86% under normal conditions, and improves the daily comprehensive revenue by 7.09% under extreme conditions. Compared with the traditional optimal configuration strategy for SOP devices, the proposed configuration strategy integrates the technical advantages of soft open points and energy storage. Under the background of differentiated feeder capacities in practical distribution networks, the proposed strategy mitigates the restrictions imposed by feeder end voltage constraints and feeder capacity limitations on the improvement of total supply capacity in traditional systems, and effectively enhances the operational economy of the system while ensuring power supply reliability.

Keywords: distribution network; flexible interconnection; soft open point; optimal configuration; load balancing; total supply capacity

配电网作为连接上级电网与用户的关键环节，对保障供电至关重要[1-2]。传统“闭环设计、开环运行”模式导致配电网结构复杂，常引发台区负荷失衡、电能质量降低、设备无法充分利用，更严重有损系统运行经济性与供电可靠性[3]。现有解决方案中，线路扩容成本高昂，可行性低，而利用互联装置配合调控手段进行负荷转移以提升系统最大供电能力更具现实可行性[4-7]，故其配置策略对配电网经济运行意义重大[8-10]。

目前，在智能软开关(soft open point, SOP)选址定容方面，文献[11-12]在配电网N-1故障情形下，提出了计及新型源荷储的SOP装置优化配置策略，但未考虑在正常运行工况下的适用性。文献[13]考虑投资和运行成本，建立正常运行工况下SOP优化配置双层规划模型，但需采用模拟退火和锥规划混合优化算法进行求解，计算烦琐。现有SOP配置模型目标函数仅考虑建设成本以及网络损耗，未涉及多层级负载均衡指数以及最大供电能力，计算模型有待改进[14-15]。另有文献指出，构建SOP配置与运行双层优化模型的组合方案是未来解决配电网优化问题的可行方法[16-17]。

在柔性互联配电网最大供电能力提升方面，相关研究主要面向双向能量交换型负荷。文献[18-20]以提升配电设备利用率、挖掘配电网供电潜力为目标，根据相应的激励或者电价调节自身用电需求，以实现电网与用户侧之间电能双向传递，进而提高系统运行的经济性，但其未考虑负载均衡优化且提升供电能力作用有限。进一步，有学者研究SOP对柔性互联系统最大供电能力的提升作用。文献[21-22]通过建立考虑多次转供的配电网最大供电能力评估模型，突破传统评估方法的局限性，进一步实现了配电网供电能力的最大化挖掘。文献[23-24]研究了柔性互联配电网最大供电能力计算方法以及提升策略，兼顾了SOP量化评估与运行优化。然而，这些关于柔性互联配电网最大供电能力提升的研究尚未考虑SOP配置策略对于多层级负载均衡特性以及最大供电能力的影响，导致既有研究应用范围存在盲区。在实际情况中，由于负载分布不均衡所导致配电网设备容量无法充分利用的现象十分普遍[25]。现有SOP装置的配置策略在提升供电能力方面仍存在较大不足。

基于此，本文提出一种面向配电网最大供电能力的多层级智能软开关优化配置策略。首先，将馈线分为主干路以及分支路两类，并从图论角度提出了一种拓扑层级自动划分方法，分析了两类馈线负载均衡情况与供区间、供区内负载均衡指数的强相关联系，为配电网中SOP装置多层级接入位置提供了参考。然后，提出了基于负载均衡能力的馈线互济潜能评估方法，基于馈线时序归一化负载率与冗余容量构建负载均衡能力指标，实现了对于馈线动态互济潜能的精准量化，为后续选址层求解SOP装置最优接入位置奠定了基础。其次，提出了考虑各类负荷功率时序特性的负荷增长空间分析法，基于此构建了面向最大供电能力的智能软开关以及储能装置(energy storage system, ESS)定容优化模型，通过SOP、ESS装置最优化配置实现了系统供电能力经济化提升。最后，基于两个IEEE 33节点组成的柔性互联系统及扩展网络，验证本文所提配

置策略的有效性。

1　基于多层级负荷均衡指数优化的SOP选址策略

本文将柔性互联配电系统结构划分为供区间与供区内两个优化层级，提出了一种基于“供区间-供区内”双层拓扑划分的智能软开关优化配置策略，实现了多层级协同优化。同时，从图论角度提出一种拓扑层级自动划分方法。首先，将配电网抽象为无向图，其中节点集 V 表示配电节点，边集 E 表示馈线线段，并定义上级电源接入点为根节点。然后，通过深度遍历与节点度数分析，识别路径类型——若从某节点至末端节点的路径上除首末端外所有节点度数均为2，则该路径为分支路（仅有一条功率流通路径）；连接至少两条分支路且一端连接根节点的馈线段集合为主干路，如图1所示。

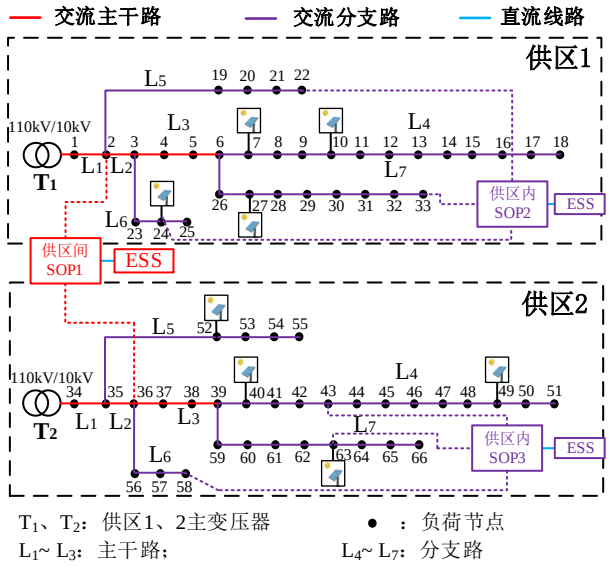

图1　柔性互联配电系统组网形式

Fig. 1 Networking forms of flexible interconnection distribution systems

SOP选址配置策略主要由馈线互济能力评估、选址优化模型构建以及选址方案确定3部分组成，本阶段优化模型计及两个主要目标：供区内负载均衡率和供区间负载均衡率。

1.1　柔性互联配电网负载均衡指标

为定义多层级柔性互联配电网负载均衡指标，将馈线分为主干路以及分支路两大类。如图1所示，各供区内部不同分支馈线间由于所接入负荷时序特性各不相同，各馈线在同一时段负载率存在较大差异，故可将同一供区内部不同馈线通过 SOP_2 和 SOP_3 进行柔性互联以均衡供区内各馈线负载率。不同供区间由于馈线容量、变压器容量、不同类型负荷占比存在差异，各供区首端馈线及变压器在同一时段负载率存在较大差异，故可将不同供区间首端馈线通过 SOP_1 进行柔性互联以均衡供区间负载率。同时，为适应分布式电源及新型负荷的波动性，SOP装置直流母线侧配套接入共享储能单元，以促进不同供区间以及供区内部分支馈线间源荷储的高效互动，实现电能最大化利用。基于上述分析，主干路与分支路的负载均衡情况分别与供区间、供区内负载均衡指数强耦合。

t 时段供区 j 分支馈线间负荷均衡指数计算式为

$$f_{fen,j,t}=\sqrt{\frac{1}{n_{fen,j}}\sum_{i=1}^{n_{fen,j}}\left[\sum_{u\in\Omega_i^n}\frac{P_{u,t}}{c_{fen,i,\max}}-\frac{1}{n_{fen,j}}\sum_{i=1}^{n_{fen,j}}\sum_{u\in\Omega_i^n}\frac{P_{u,t}}{c_{fen,i,\max}}\right]^2} \tag{1}$$

式中：$n_{fen,j}$ 为供区 j 中分支馈线的条数，下标 fen 代表分支；Ω_i^n 为馈线 i 的下游节点集合；$P_{u,t}$ 为 t 时段节点 u 所接入的负荷；$c_{fen,i,\max}$ 为第 i 条分支馈线的最大传输功率。

t 时段供区间负荷均衡指数计算式为

$$f_{zhu,t}=\sqrt{\frac{1}{n_{zhu}}\sum_{i=1}^{n_{zhu}}\left[\sum_{v\in\Omega_i^b}\frac{P_{v,t}^b}{c_{zhu,i,\max}}-\frac{1}{n_{zhu}}\sum_{i=1}^{n_{zhu}}\sum_{v\in\Omega_i^b}\frac{P_{v,t}^b}{c_{zhu,i,\max}}\right]^2} \tag{2}$$

式中：n_{zhu} 为所有柔性互联供区主干馈线总条数，下标 zhu 代表主干；Ω_i^b 为主干馈线 i 的下游支路集合；$P_{v,t}^b$ 为 t 时段分支馈线 v 所接入的负荷总量；$c_{zhu,i,\max}$ 为第 i 条主干馈线的最大传输功率。

1.2　基于负载均衡能力的馈线互济潜能评估

主干馈线位于拓扑结构首端，容量通常较大，负载率相对均匀，其负载均衡主要面向供区间功率互济，目标是挖掘冗余容量以实现下级接入负荷供电能力最大化。分支馈线位于拓扑结构末端，容量通常逐级递减，负载率以及冗余容量受接入负荷特性影响较大，内部易发生局部过载，其负载均衡主要面向供区内负荷转移，目标是通过不同馈线间功率互济缓解局部重载对于供电能力提升的限制。因此，本文分别基于冗余率、负载率构建主干、分支馈线负载均衡能力（load balance capacity，LBC）分层量化指标，通过评估馈线功率盈余/缺额程度，为后续选择SOP装置最优接入位置提供保证，以实现系统负荷均衡指数最优化。具体实施过程如下。

(1)供区间采用主干路24 h归一化平均负载率对供区互济能力进行初步判断,确定供区间大致功率流向后,根据各主干馈线负载均衡指数对SOP互联位置进行具体确定,其步骤如下。

①通过式(3)计算得出各供区主干馈线24 h归一化平均负载率后,根据式(4)所述条件按轻重载情况对供区性质进行划分。若供区m主干馈线平均负载率小于系统主干馈线整体平均负载率,则将其对应末端节点置入集合$\Omega_{\Psi,zhu}^{LBC+}$中,否则置入集合$\Omega_{\Psi,zhu}^{LBC-}$中。供区性质划分后可为下一步供区间互联节点确定提供参考。

$$\begin{cases}\beta_{\lg,zhu}^{k}=\dfrac{1}{n_{zhu,k}}\displaystyle\sum_{i=1}^{n_{zhu,k}}\beta_{\lg,zhu,i}^{k}\\ \beta_{\lg,zhu,i}^{k}=\displaystyle\sum_{t=1}^{24}\omega_t\beta_{zhu,i}^{k}(t)\end{cases}\tag{3}$$

$$\beta_{\lg,zhu}^{m}<\frac{1}{N_{DSA}}\sum_{k=1}^{N_{DSA}}\beta_{\lg,zhu}^{k}\tag{4}$$

式中:$\beta_{\lg,zhu}^{k}$为供区k主干馈线24 h归一化负载率平均值;$\beta_{\lg,zhu,i}^{k}$为供区k第i段主干馈线24 h归一化负载率;$n_{zhu,k}$为供区k主干馈线总数;$\beta_{zhu,i}^{k}(t)$为t时段供区k第i段主干馈线负载率;ω_t为一天内各小时负载率权重系数(由主客观赋权法确定);N_{DSA}为系统内供区总数。

②根据供区性质划分结果,选取$\Omega_{\Psi,zhu}^{LBC-}$集合中最小$\Psi_{k,i}^{LBC,zhu}$值所对应馈线末端节点与$\Omega_{\Psi,zhu}^{LBC+}$集合中最大$\Psi_{k,i}^{LBC,zhu}$值所对应馈线末端节点进行互联,以实现供区间负载均衡效果最优。$\Psi_{k,i}^{LBC,zhu}$计算步骤如为

$$\begin{cases}\Psi_{k,i}^{LBC,zhu}=\dfrac{c_{zhu,i}^{red-\lg,k}}{\max(C_{zhu}^{k})}\\ c_{zhu,i}^{red-\lg,k}=C_{zhu,i}^{k}(\beta_{zhu}^{\max}-\beta_{\lg,zhu,i}^{k})\end{cases}\tag{5}$$

式中:$c_{zhu,i}^{red-\lg,k}$为供区k第i条主干馈线24 h归一化冗余容量;$\max(C_{zhu}^{k})$为供区k主干馈线最大容量,$C_{zhu,i}^{k}$为供区k第i条主干馈线容量;$\beta_{zhu}^{\max}$为主干馈线负载率上限值,本文取0.9。

(2)供区内采用分支路24 h归一化平均负载率对馈线互济能力进行初步判断,按所提判据对各馈线进行大致分类后,根据各分支馈线冗余容量对供区内部SOP互联位置进行具体确定,其步骤如下。

①首先,通过式(6)计算得出各供区分支馈线24 h归一化平均负载率;其次,根据式(7)所述条件按轻重载情况对馈线性质进行划分,若供区k中分支馈线m平均负载率小于系统主干馈线整体平均负载率,则将其对应末端节点置入集合$\Omega_{\Psi,fen}^{LBC+}$中,否则置入集合$\Omega_{\Psi,fen}^{LBC-}$中;最后,根据馈线性质划分,为下一步供区内互联节点确定提供参考。

$$\begin{cases}\beta_{\lg,fen}^{k}=\dfrac{1}{n_{fen}^{k}}\displaystyle\sum_{i=1}^{n_{fen}^{k}}\beta_{\lg,fen,i}^{k}\\ \beta_{\lg,fen,i}^{k}=\displaystyle\sum_{t=1}^{24}\omega_t\beta_{fen,i}^{k}(t)\end{cases}\tag{6}$$

$$\beta_{\lg,fen,m}^{k}<\beta_{\lg,fen}^{k},\ m\in\Omega_k\tag{7}$$

式中:$\beta_{\lg,fen}^{k}$为供区k分支馈线24 h归一化负载率平均值;$\beta_{\lg,fen,i}^{k}$为供区k第i条分支馈线24 h归一化负载率;$\beta_{fen,i}^{k}(t)$为t时段供区k第i段主干馈线负载率;n_{fen}^{k}为供区k分支馈线总数。

②根据馈线性质划分结果,对$\Omega_{\Psi,fen}^{LBC-}$集合中各元素按$\Psi_{k,i}^{LBC,fen}$值降序排列并筛选序列中前2位元素作为负待互联节点;同理,对$\Omega_{\Psi,fen}^{LBC+}$集合中各元素按$\Psi_{k,i}^{LBC,fen}$值升序排列并同样筛选序列中前2位元素作为正待互联节点,$\Psi_{k,i}^{LBC,fen}$计算步骤为

$$\begin{cases}\Psi_{k,i}^{LBC,fen}=\beta_{\lg,fen,i}^{k}-\rho_{fen}\dfrac{c_{fen,i}^{red-\lg,k}}{\max(C_{fen,i}^{k})},\ i\in\Omega_k\\ c_{fen,i}^{red-\lg,k}=C_{fen,i}^{k}(\beta_{fen}^{\max}-\beta_{\lg,fen,i}^{k})\end{cases}\tag{8}$$

式中:$c_{fen,i}^{red-\lg,k}$为供区k第i条分支馈线24 h归一化冗余容量;$\max(C_{fen,i}^{k})$为供区k分支馈线段i所在馈线最大容量;$C_{fen,i}^{k}$为供区k第i条分支馈线容量;$\beta_{fen}^{\max}$为分支馈线负载率上限值,本文取0.95;ρ_{fen}为负载冗余度修正系数,本文取0.8。

通过将上述步骤得到的待互联节点按照以下规则进行组合,得到初步SOP选址方案:

(1)由于馈线容量从前至后依次递减,易出现馈线段负载率前轻后重的现象,考虑到自身内部互联有悖于配置经济性原则,故规定供区内同一SOP装置各端口需接入不同馈线;

(2)为实现分支馈线间负载均衡效果最优的同时最大化降低系统负载率,规定分支馈线每种互联方案包含两个正待互联节点和一个负待互联节点。

1.3 选址优化模型目标函数

将配电网SOP装置初步选址方案导入以供区间负荷均衡指数和供区内分支馈线间负荷均衡指数加权最小为目标的优化模型,通过比较各方案目标值确定SOP最终安装位置,从而最大限度降低互联系统负载不均衡度。目标函数f_1为

$$\begin{cases}\min f_1=\dfrac{1}{T}\displaystyle\sum_{k=1}^{N_{DSA}}\left(\alpha_{zhu}\sum_{t=1}^{T}\omega_t f'_{zhu,k,t}+\alpha_{fen}\sum_{t=1}^{T}\omega_t f'_{fen,k,t}\right)\\ \alpha_{zhu}+\alpha_{fen}=1\\ \displaystyle\sum_{t=1}^{24}\omega_t=1\end{cases}\tag{9}$$

式中：f_1为24 h归一化负荷均衡指数；$f'_{zhu,t}$和$f'_{fen,t}$分别为t时段供区间主干馈线均衡指数和供区内分支馈线负荷均衡指数，其具体计算方法如式(1)、(2)所示；α_{zhu}和α_{fen}分别为供区间主干馈线负荷均衡指数权重系数和供区内分支馈线负荷均衡指数权重系数；T为时间段数。

将负荷均衡指数转化为决策变量的线性函数，对式(1)、(2)进行变量替换，即

$$\begin{cases}f'_{zhu,k,t}=\dfrac{1}{n^k_{zhu}}\displaystyle\sum_{v=1}^{n^k_{zhu}}\beta'_{v,t}=\dfrac{1}{n^k_{zhu}}\sum_{mn\in\Omega^{zhu}_k}\left(\dfrac{\tilde{I}_{mn,t}}{I^2_{mn,\max}}-\dfrac{1}{n_{zhu}}\sum_{mn\in\Omega^{zhu}_k}\dfrac{\tilde{I}_{mn,t}}{I^2_{mn,\max}}\right)\\ f'_{fen,k,t}=\dfrac{1}{n^k_{fen}}\displaystyle\sum_{v=1}^{n^k_{fen}}\beta'_{v,t}=\dfrac{1}{n^k_{fen}}\sum_{mn\in\Omega^{fen}_v}\left(\dfrac{\tilde{I}_{mn,t}}{I^2_{mn,\max}}-\dfrac{1}{n_{fen,j}}\sum_{mn\in\Omega^{fen}_v}\dfrac{\tilde{I}_{mn,t}}{I^2_{mn,\max}}\right)\end{cases}\tag{10}$$

式中：$\beta'_{v,t}$为t时段馈线v的负荷均衡指数；Ω^{zhu}_k、Ω^{fen}_k分别为供区k主干馈线和分支馈线的集合；$\tilde{I}_{mn,t}$为t时段馈线mn通过电流的平方；$I_{mn,\max}$为馈线mn最大允许电流。

考虑到各馈线所带负荷功率波动以及分布式电源出力的时序性，为实现选址方案对于24 h负载均衡指数的最优化，本文采用改进熵权法和改进层次分析法的主客观赋权法对指标赋权，具体过程如附录A所示。通过平衡主观判断和客观属性，以确定各时段权重系数ω_t，实现24 h负载率归一化。

1.4　选址优化模型约束条件

1.4.1　N-0运行安全约束

基于计及储能接入的配电网N-0安全运行相关约束[26]为

$$\begin{cases}\boldsymbol{C}_V=\{\boldsymbol{V}|V_{r,\min}\leq V_r\leq V_{r,\max},\forall r\in\{1,2,\cdots,u\}\}\\ \boldsymbol{C}_C=\{[\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}},\boldsymbol{S}_{\mathrm{T}}]|S_{\mathrm{B},j}\leq c_{\mathrm{B},j},\forall j\in\{1,2,\cdots,n\};\\ S_{\mathrm{T},i}\leq c_{\mathrm{T},i},\forall i\in\{1,2,\cdots,p\}\}\\ 其中:S_{\mathrm{T},i}=\displaystyle\sum_{j\in T_i}S_{\mathrm{B},j}\\ S_{\mathrm{B},j}=\sum(F_j+S_{ESS,j}+S_{Loss,j}+S_{SOP,j})\\ S_{ESS,j}=S^{RTS}_{ESS,j}(t)=[S^{RTS}_{ESS,j,d}(t),S^{RTS}_{ESS,j,c}(t)]\end{cases}\tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{C}_V$为节点电压幅值约束；$\boldsymbol{V}=[V_1,V_2,\ldots,V_r,\ldots,V_u]$为$C_V$的节点电压向量；$V_{r,\min}$和$V_{r,\max}$分别为$V_r$的下限和上限；$\boldsymbol{C}_C$为元件容量约束，元件包括线路和主变压器(后文简称主变)两种；$\boldsymbol{S}_B=[S_{\mathrm{B},1},S_{\mathrm{B},2},\cdots,S_{\mathrm{B},j},\cdots,S_{\mathrm{B},n}]$为线路视在功率幅值向量；$c_{\mathrm{B},j}$为线路$j$的容量；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{T}}=[S_{\mathrm{T},1},S_{\mathrm{T},2},\cdots,S_{\mathrm{T},i},\cdots,S_{\mathrm{T},p}]$为主变视在功率幅值向量；$c_{\mathrm{T},i}$为主变$i$的容量；$j\in T_i$表示馈线段$j$出自变压器$i$对应的母线；$F_j$为馈线$j$所带净负荷；$S_{ESS,j}$为馈线段$j$连接共享储能装置出力；$S_{Loss,j}$为馈线段$j$网络损耗；$S_{SOP,j}$为馈线段$j$连接SOP装置传输容量；$S^{RTS}_{ESS,j,d}(t)$、$S^{RTS}_{ESS,j,c}(t)$分别为馈线段$j$连接共享储能装置$t$时段放、充电功率。

1.4.2　SOP装置运行约束

考虑到端口容量约束，SOP第i个端口的传输功率$S_{sn,i}(t)$应小于自身容量S^{SOP}_i

$$S_{sn,i}(t)=\sqrt{\left(P^{SOP}_{s,i}(t)\right)^2+\left(Q^{SOP}_{s,i}(t)\right)^2}\leqslant S^{SOP}_i\tag{12}$$

此外，SOP还需满足有功功率守恒约束

$$\sum_{i\in\Omega_{SOP}}P^{SOP}_{s,i}(t)=0\tag{13}$$

式中：Ω_{SOP}为SOP所有端口集合。

1.4.3　直流侧共享储能装置运行约束

本小节所述共享储能装置运行约束主要由荷电状态约束、充放电功率约束、充放电状态约束3部分构成，公式为

$$S_{BL}(t+1)=S_{BL}(t)+\eta_{BL,ch}P_{BL,ch}(t)-\frac{P_{BL,dis}(t)}{\eta_{BL,dis}}\tag{14}$$

$$S_{BL,\min}\leq S_{BL}(t)\leq S_{BL,\max}\tag{15}$$

$$v_{BL,ch}(t)+v_{BL,dis}(t)\leq 1\tag{16}$$

$$\begin{cases}0\leq P_{BL,ch}(t)\leq v_{BL,ch}(t)P_{BL,ch,\max}\\ 0\leq P_{BL,dis}(t)\leq v_{BL,dis}(t)P_{BL,dis,\max}\end{cases}\tag{17}$$

式中：$S_{BL}(t)$为t时段共享储能装置的荷电量；$P_{BL,ch}(t)$和$P_{BL,dis}(t)$分别为t时段共享储能装置的充电功率和放电功率；$\eta_{BL,ch}$和$\eta_{BL,dis}$分别为充电效率和放电效率；$S_{BL,\min}$和$S_{BL,\max}$分别为共享储能装置荷电量的最小和最大值；$v_{BL,ch}(t)$和$v_{BL,dis}(t)$分别为共享储能装置充电和放电状态变量，若处于充电状态则$v_{BL,ch}(t)=1$、$v_{BL,dis}(t)=0$，若处于放电状态则$v_{BL,ch}(t)=0$、$v_{BL,dis}(t)=1$；$P_{BL,ch,\max}$和$P_{BL,dis,\max}$分别为共享储能装置的最大充电功率和最大放电功率。

按照上述目标函数以及约束条件，将每种初步SOP选址方案导入选址优化模型进行遍历求解，按照全网负荷均衡指数最优原则，选出SOP最优选址方案。该方案在进行运行优化后各供区间主干馈线以及供区内分支馈线负载率差值应控制在最小化范围内，即应实现负载均衡效果最优，为后续SOP定容部分确定初始建模环境。

2 基于负荷增长空间分析法的SOP定容策略

SOP定容配置策略主要由负荷增量设置、定容优化模型构建以及配置方案确定3部分组成。本阶段优化过程计及两个主要目标：最大供电能力与智能软开关、储能装置综合费用，配置流程如图2所示。

考虑到选址层模型以最小化多层级负载均衡指数为目标，其求解过程需要输入SOP与ESS装置的初始预设容量。在首次迭代中，初始预设容量需参照负荷水平以及传统SOP装置优化配置等典型文献经验值设定。然而，经定容层模型求解得出的最终容量与初始预设值通常相差较大，原选址方案不一定保证系统负载均衡效果最优，进而不一定确保最终配置结果经济性最优。因此，必须将定容层求解容量作为初始预设容量回代至选址模型，校验原选址方案是否仍然为候选方案集中负载均衡指数最优所对应方案。若是，则输出配置结果；若不是，则将更新的SOP最优选址方案导入定容优化层中再次进行求解，直至选址方案通过校验为止。本文选址层通过初步筛选以及运行优化模型精确计算和最优性回代校验避免了选址方案多解情况的出现，保证了结果的全局最优性。

2.1 负荷增量设置

为更好地贴近配电网实际运行情况，对于配电网不同区域采用不同的负荷增量设置原则，在日间时段(6:00—20:00)主要对工业区以及商业区以现有负载成倍率增加的形式设置负荷增量，在夜间时段(20:00—次日6:00)主要对居民区以及商业区考虑新建电动汽车充电桩的形式设置负荷增量。负荷增长空间分析法具体实施细则如下：

(1)获取电网结构参数，参考基础负荷水平确定SOP、ESS初步容量，设定各区域负荷初值$P_{i,L0}$。

(2)基于选址模型得出的SOP最优接入位置，形成面向最大供电能力的新网络拓扑，构建面向系统综合收益以负荷增长倍数最大为目标的SOP、ESS定容模型。

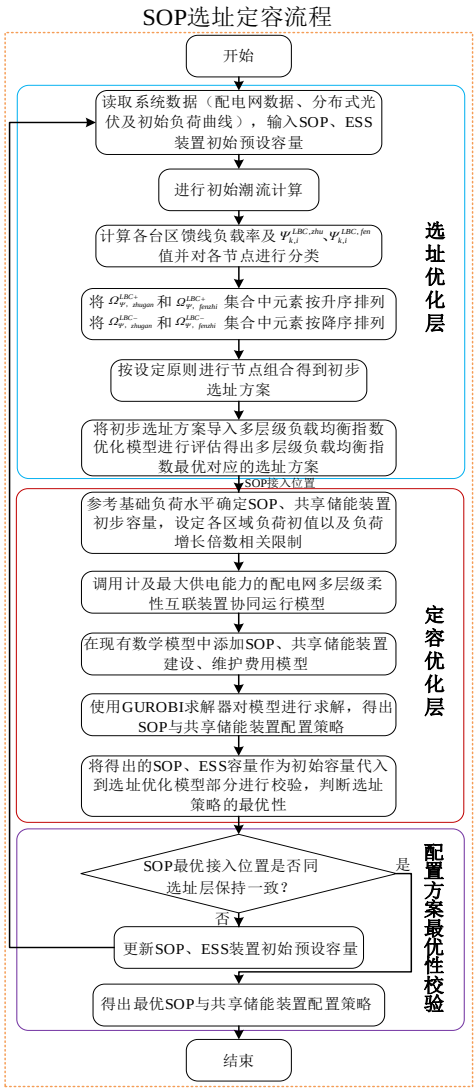

图2 多层级智能软开关装置优化配置策略

Fig. 2 Optimal configuration strategy for multi-level soft open point devices

(3)求解定容模型，在确定SOP、ESS配置方案的同时按各区域最大负荷增量对24 h各时段配电系统负荷结果进行计算，得到最大供电能力值。

考虑到配电网运行的经济性，提升最大供电能力(total supply capacity，TSC)目的在于增加售电收益，但过度强调提升TSC则会导致SOP、ESS相应投资成本过高，有悖于经济性原则，故本文定容部分目标函数将二者予以结合，旨在确定更具有现实可行性的SOP配置方案。

2.2 定容优化模型目标函数与约束条件

2.2.1 目标函数

基于选址优化模型确定的SOP最优接入位置，配电网最大供电能力是指在满足安全运行准则前

提下系统所能供应的最大负荷，其模型为

$$\begin{cases}\max L_{TSC}=\sum_{i=1}^{N_{node}}P_i\\ \text{s.t.}\quad \text{式(11)}\end{cases}\tag{18}$$

式中：L_{TSC}为TSC值，即系统内所有节点所接入负荷之和的最大值；i为节点编号，$i=1,2,\cdots,N_{node}$，N_{node}为系统负荷节点总数；P_i为节点i接入负荷有功功率。

本小节目标函数中电网运行收益主要包括智能软开关装置接入后负荷增长空间ΔP_{ij}带来的售电收益、SOP装置建设、维护总费用C_{SOP}，以及储能装置建设和维护总费用C_{ESS}。

负荷增长空间ΔP_{ij}与最大供电能力的关系为

$$\max L_{TSC}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8\,760}P_{ij}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8\,760}\left(P_{ij}^{base}+\Delta P_{ij}\right)\tag{19}$$

式中：P_{ij}^{base}为第i个节点j时段原有基础负荷；n为系统中节点总数。

电网运行总收益f_2为

$$\max f_2=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8\,760}\Delta P_{ij}c_{ij}-(C_{SOP}+C_{ESS})\tag{20}$$

式中：c_{ij}为第i个节点j时段电价。

维护总费用C_{SOP}计算式为

$$\begin{cases}C_{SOP}=C_1+C_2\\ C_1=\dfrac{d(1+d)^y}{(1+d)^y-1}c_{sop}S_{sop}\\ C_2=\varepsilon c_{\text{sop}}S_{\text{sop}}\end{cases}\tag{21}$$

式中：C_1为SOP折算到每年的固定投资费用；C_2为SOP年运维费用；d为贴现率；y为SOP的经济使用年限；c_{sop}为SOP单位容量投资成本；S_{sop}为SOP安装容量；ε为SOP年运维费用系数。

储能装置建设和维护总费用C_{ESS}计算式为

$$\begin{cases}C_{ESS}=C_{in}+C_{om}\\ C_{in}=\lambda_{ky}\sum_{j\in S_{es}}c_{E,ess}E_{j,ess},\ \text{其中}\lambda_{ky}=\dfrac{k(1+k)^z}{(1+k)^z-1}\\ C_{om}=\lambda_{om}C_{in}\end{cases}\tag{22}$$

式中：C_{in}、C_{om}分别为储能系统初始投资成本、运维成本；λ_{ky}为投资折现系数；k为折现率；z为储能系统寿命周期；$c_{E,ess}$为储能系统单位容量投资成本；λ_{om}为储能装置运维成本等效系数。

2.2.2　约束条件

为保证互联系统最大供电能力场景下的运行可靠性，本小节约束条件除选址约束(11)～(17)外，加入N-1安全约束，即

$$P_{F_i}=\sum_{k\in\Omega(F_i)}P_k^{F_i}+P_i^{SOP}\leqslant C_i^F,\forall\psi\notin F,\forall F_i\in F\tag{23}$$

$$P_{T_i}=\sum_{F_i\in\Omega(T_i)}\left(\sum_{k\in\Omega(F_i)}P_k^{F_i}+P_i^{SOP}\right)\leqslant C_i^T,\forall\psi\notin T,\forall T_i\in T\tag{24}$$

$$\sqrt{\left(P_i^{SOP}\right)^2+\left(Q_i^{SOP}\right)^2}\leqslant C_i^{SOP},\forall F_i^{SOP}\in F^{SOP}\tag{25}$$

式中：ψ为故障集合，本文中考虑变电站主变以及馈线出口故障两种极端情况；F、T、F^{SOP}分别为馈线、主变、SOP装置集合；$\Omega(F_i)$为馈线F_i下游负荷节点集合；$\Omega(T_i)$为主变T_i下游馈线集合；$P_k^{F_i}$为馈线F_i上第k个节点有功负荷；P_i^{SOP}、Q_i^{SOP}分别为第i个SOP装置转移有功、无功功率；C_i^F、C_i^T、C_i^{SOP}分别为第i个馈线、主变、SOP装置额定容量。

2.3　配置策略确定与校验

2.3.1　配置策略确定

基于上述目标函数以及约束条件，在定容部分得出SOP、ESS具体容量后，将其回代到选址优化模型部分，使其替换原选址模型中SOP、ESS初步容量，判断该配置策略在基础负荷水平下是否仍然满足选址策略的最优性，即多层级负载均衡指数最小。若满足条件，则输出该最优SOP与共享储能装置配置策略；否则，按照更新SOP最优接入位置，重复定容部分直至校验通过为止。

2.3.2　鲁棒性校验

针对光伏波动、突发负荷等极端运行场景，对所得配置策略以最小化弃负荷成本(即最大化系统综合收益)为目标进行鲁棒性验证，其目标函数为

$$\max f_3=f_2-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8\,760}(P_{ban,ij}c_{ij})\tag{26}$$

式中：$P_{ban,ij}$为第i个节点j时段弃负荷量，计算公式为

$$P_{ban,ij}=\lambda_{load,i}P_{ij}^{TSC}-P_{ij}\tag{27}$$

其中，$\lambda_{load,i}$为节点i突发负荷增长系数，P_{ij}^{TSC}为3.2节负荷增长空间最大时第i个节点j时段负荷接入量，P_{ij}为第i个节点j时段负荷实际消纳量，三者之间的约束关系为

$$\lambda_{down,i}\lambda_{load,i}\leqslant P_{ij}/P_{ij}^{TSC}\leqslant\lambda_{load,i}\tag{28}$$

其中，$\lambda_{down,i}$为节点i弃负荷下限。

最终，通过比较系统综合收益以及极端运行场景下系统各区域负荷保供比例，综合评价配置策略合理性。

3　算例分析

本文以两个IEEE33节点柔性互联系统为算例

背景，其结构如第1节图1所示。其中，两互联系统中分支路L_4、L_5接入典型居民负荷，L_6接入典型商业负荷，L_7接入典型工业负荷。为系统考虑新能源与负荷的不确定性，本文选取为期1 a、时间步长为1 h的全年历史光伏及各类负荷数据，采用K-means聚类方法对上述数据进行场景生成与约简，得到节点各类负荷和光伏出力的典型日时序曲线如图3所示，具体过程见附录B。

SOP初始容量取0.5 MV·A，ESS初始容量取1 MW·h。本文设置6种场景用于后续模型验证与结果对比分析。场景1未设置SOP互联；场景2为传统互联选址策略，其仅面向馈线末端电压治理，未考虑负载均衡以及供电能力；场景3、4仅考虑互联系统最大供电能力；场景5、6在考虑互联系统最大供电能力的基础上计及多层级负载均衡，为本文所提优化方法。24 h各时段权重系数ω_t如表1所示，各场景具体情况如表2所示。本文通过Matlab语言编程并调用Yalmip工具箱和Gurobi求解器对模型进行求解。

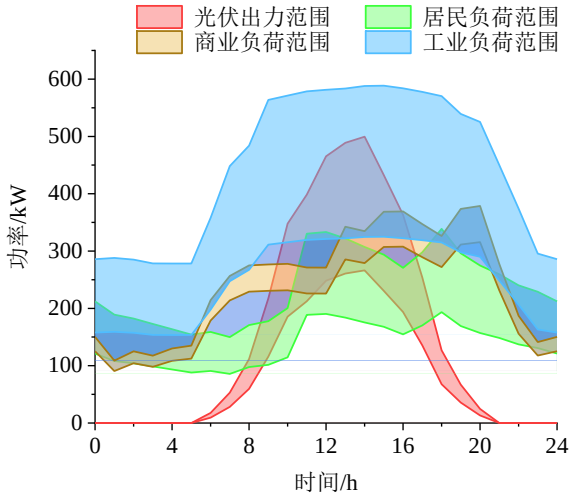

图3 节点分布式光伏和各类负荷典型日时序曲线功率范围

Fig. 3 Power range of typical daily time-series curves for node distributed photovoltaic and various loads

表1 24 h各时段权重系数

Table 1 Weight coefficients for each period of 24 h

时段/h	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8
ω_t	0.002 3	0.003 0	0.003 9	0.004 8	0.005 8	0.015 6	0.016 5	0.017 0
时段/h	8—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	14—15	15—16
ω_t	0.016 7	0.053 1	0.059 2	0.070 8	0.062 4	0.055 0	0.018 2	0.019 8
时段/h	16—17	17—18	18—19	19—20	20—21	21—22	22—23	23—24
ω_t	0.105 7	0.131 0	0.142 2	0.125 6	0.023 1	0.024 5	0.012 3	0.011 5

表2 各场景SOP设置、负载均衡、供电能力、光伏及负荷情况

Table 2 SOP configurations, load balancing, power supply capacity, photovoltaic, and load conditions in different scenarios

场景	SOP互联	计及负载均衡	计及最大供电能力	光伏、负荷情况
1				正常
2	√			正常
3	√		√	正常
4	√		√	极端
5(本文策略)	√	√	√	正常
6(本文策略)	√	√	√	极端

3.1 选址模型验证

本文先基于馈线互济能力评估方法对相应节点进行分类，筛选出待选节点，各类型待选节点负载均衡能力计算结果如附录C表C1所示。然后，根据各馈线负载均衡能力数值，按照设定原则对其组合得到SOP初步接入位置，在一定程度上减少了模型计算量。最后，将SOP初步接入位置节点组合导入运行优化层进行计算，得到各节点组合对应的负载均衡指数，并以此为依据确定最终SOP接入方案，具体结果如附录C表C2所示。

基于传统互联选址，对于线路末端电压治理的需求设置对照试验(场景2中供区内SOP均接入馈线末端)。本文通过运行优化层计算得到负载均衡指数，并以此为依据从SOP待选接入位置中择优选出最终SOP接入方案，各场景SOP接入位置如附录C表C3所示。

3种场景下多层级负载均衡指数对比结果见附录C图C1。由图C1可知，相较于传统选址方法，本文选址方法在节点电压符合国家标准(不超过标准值±7%)[27]的前提下，多层级负载均衡指数更低。

因此，在以最小化该指数为优化目标时，本文选址方法更具优势。

3.2　定容模型验证

选用场景2、3、5作为对比方案以验证本文定容模型的有效性，算例设备参数设置如下：SOP装置贴现率为0.08，经济使用年限为20 a，单位容量投资成本为1 000 元/kV·A，运行维护成本系数为0.01；ESS装置贴现率为0.10，经济使用年限为20 a，单位容量投资成本为1 500 元/kV·A，运行维护成本系数为0.02。各区域分时电价如图4所示，各区域负荷增量设置如图5所示。

利用Gurobi求解器对定容模型求解，得到各场景下SOP定容结果以及对应系统年综合收益与系统各区域最大供电能力，并对SOP配置方案进行二次校验，结果如附录C表C4～C6所示。

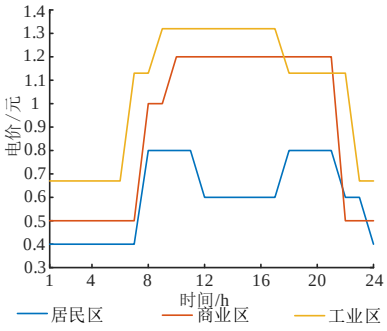

图4　区域电价时序图

Fig. 4 Electricity prices timing diagrams of each area

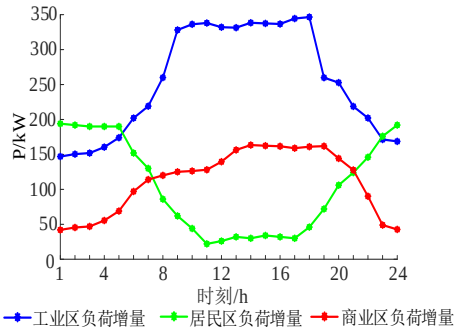

图5　各区域负荷增量功率时序图

Fig. 5 Load incremental power timing diagrams of each area

根据对比结果可知，在年综合收益方面，本文方案（场景5）要比场景2高18.77%、比场景3高26.86%。在最大供电能力方面，本文方案比场景2在工业区高25.96%，比场景3在工业区高27.39%。值得注意的是，虽然场景5相较于场景2及场景3，居民区、商业区最大供电能力值有所减少，但由于供区内部各区域功率互济特性较好，其工业区对应数值大幅增加，综合收益均优于另外两种场景。

将场景5中SOP、ESS具体配置方案，回代到选址优化模型进行校验，从附录C表C6中校验结果可以看出，3.1节所得选址策略多层级负载均衡指数仍然保持最小，即保证了选址策略的最优性。

3.3　运行结果分析

3.3.1　系统最大供电能力分析

各区域24 h最大供电能力对比图见附录C图C2。可以看出，未互联系统由于不具备无功补偿能力，当负荷增长较大时易发生电压越限情况，因此该情景下各区域TSC值普遍较低。负荷最大水平下场景2、3各供区内SOP上游馈线负载率时序图见附录C图C3，由于在实际电网中馈线容量从前至后依次递减，因而场景2中的SOP装置易受末端馈线容量限制从而影响其功率互济能力发挥，同时场景3由于未计及馈线负载均衡能力评估从而导致供区内SOP未接入最优位置，相连上游馈线容量限制使其功率互济能力未得到充分发挥，本文配置策略能够识别馈线容量薄弱区域进行SOP经济配置，相较于未考虑负载均衡配置策略，本文所提策略24 h综合最大供电能力提高0.84%。

3.3.2　配置方案鲁棒性验证

为验证本文所提配置策略的鲁棒性，本小节假设光伏波动和负荷突增这两种情况同时发生以对比不同场景下各区域弃电比例，具体内容见附录D。

3.4　规模化网络运行结果分析

为验证本文所提配置策略在规模化配电网中应用的可行性，本节将所提方法扩展至更大规模的改进IEEE 69节点互联系统进行验证，具体内容见附录E。

4　结　论

为实现柔性互联配电网多层级负载均衡优化以及最大供电能力提升，本文提出一种计及多层级负荷均衡指数与综合运行收益的配电网智能软开关装置优化配置策略。本文研究结论如下。

（1）本文提出的智能软开关联合储能装置优化配置方法可用于配电网互联设备容量选择，结合了智能软开关和储能的技术优势，在实际配电网馈线容量差异化背景下，缓解了传统系统馈线末端电压以及容量约束对于最大供电能力提升的限制，为规模化新型负荷接入背景下智能软开关设备配置提供经济合理的方案。

(2)本文提出的馈线负载均衡能力指标结合多层级负荷均衡指数优化模型可在系统节点电压水平满足要求的基础上确定负荷均衡效果最优节点组合作为SOP安装位置,为定容部分提升最大供电收益奠定基础。

(3)在通过选址模型得出SOP安装位置的基础上,本文基于负荷增长空间分析法对SOP进行定容。考虑不同区域分时电价与SOP、ESS建设维护综合费用模型,相较于未考虑负载均衡的配置策略,正常情形下,本文所提策略年综合收益提高26.86%。极端情形下,在各区域弃负荷比例以及总弃负荷电量相差甚小的前提下,本文所提策略负荷保供量在工业区高24.69%,日综合收益提高7.09%,在保证系统供电可靠性的前提下有效提升了系统的经济运行能力。

参考文献:

[1] 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):3986-4000.
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): 3986-4000.

[2] 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.

[3] 王灿,吴耀文,孙建军,等. 基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):77-85.
Wang Can, Wu Yaowen, Sun Jianjun, et al. Bi-layer load balancing method in active distribution network based on flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 77-85.

[4] 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.

[5] 朱建昆,高红均,贺帅佳,等. 考虑供电能力提升的低压配电网柔性互联规划[J]. 高电压技术,2024,50(8):3545-3554.
Zhu Jiankun, Gao Hongjun, He Shuaijia, et al. Flexible interconnection planning of low-voltage station area distribution network considering power supply capacity improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3545-3554.

[6] Wang Guanghe, Lei Xiang, Wu Han, et al. A comprehensive network restoration model for active distribution network considering forecast uncertainty [J]. IEEE Access, 2021, 9: 130997-131005.

[7] Su Jun, Lie T T, ZAMORA R. Integration of electric vehicles in distribution network considering dynamic power imbalance issue [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5913-5923.

[8] 贺春光,王林峰,曹媛,等. 考虑综合收益的多电压等级配电网柔性互联装置协同规划方法[J]. 中国电力,2025,58(1):78-84.
He Chunguang, Wang Linfeng, Cao Yuan, et al. Collaborative planning method of flexible interconnection devices for multi-voltage level distribution network considering integrated profits[J]. Electric Power, 2025, 58(1): 78-84.

[9] 彭寒梅,尹棠,肖千皓,等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. 中国电力,2024,57(8):117-129.
Peng Hanmei, Yin Tang, Xiao Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution networks with high proportion of distributed generation [J]. Electric Power, 2024, 57(8): 117-129.

[10] Zhang Lu, Tong Bo, Wang Zhaoqi, et al. Optimal configuration of hybrid AC/DC distribution network considering the temporal power flow complementarity on lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3857-3866.

[11] 李昀宸,吕志鹏,刘文龙,等. 柔性互联配电台区联合优化配置[J]. 高电压技术,2023,49(10):4223-4231.
Li Yunchen, Lü Zhipeng, Liu Wenlong, et al. Coordinated optimize configuration of flexible interconnection of distribution station area [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4223-4231.

[12] Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active

electrical distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.

[13] 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): 1889-1896.
Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, 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): 1889-1896.

[14] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与SOP损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 69-78.
Wei Chengzhi, Li Junhao, Tu Chunming, et al. Optimal regulation and control strategy for flexible interconnected distribution network considering loss characteristics of transformers and soft open points[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 69-78.

[15] 蒋玮, 苏晓云, 何晋伟, 等. 交直流配电网中柔性软开关接入的规划-运行协同优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 33-43.
Jiang Wei, Su Xiaoyun, He Jinwei, et al. Collaborative planning-operation optimization method for access of soft open points in AC-DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 33-43.

[16] Qin Qing, Han Bei, Li Guojie, et al. Capacity allocations of SOPs considering distribution network resilience through elastic models [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107371.

[17] Wang Jian, Zhou Niancheng, Chung C Y, et al. Coordinated planning of converter-based DG units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.

[18] 张博, 马梓耀, 王辰, 等. 含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 28-37.
Zhang Bo, Ma Ziyao, Wang Chen, et al. Resilience improvement strategy for urban AC/DC hybrid distribution network with photovoltaic-storage-charging integrated station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 28-37.

[19] 葛少云, 孙昊, 刘洪, 等. 考虑可靠性与故障后负荷响应的主动配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 77-84.
Ge Shaoyun, Sun Hao, Liu Hong, et al. Power supply capability evaluation of active distribution network considering reliability and post-fault load response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 77-84.

[20] 李娟, 张梁, 钱广超, 等. 规模化电动汽车接入下柔性配电网馈线负载平衡方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(9): 53-61.
Li Juan, Zhang Liang, Qian Guangchao, et al. Feeder load balancing method for flexible distribution network with large-scale electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(9): 53-61.

[21] Wang Xiaoxue, Yang Wenquan, Liang Dong. Multi-objective robust optimization of hybrid AC/DC distribution networks considering flexible interconnection devices[J]. IEEE Access, 2021, 9: 166048-166057.

[22] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2281.
Zhu Jiaqi, Dong Shufeng, Xu Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2281.

[23] SARANTAKOS I, ZOGRAFOU-BARREDO N M, HUO Da, et al. A reliability-based method to quantify the capacity value of Soft open points in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5032-5043.

[24] SARANTAKOS I, GREENWOOD D M, ZOGRAFOU-BARREDO N M, et al. A probabilistic method to quantify the capacity value of load transfer [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106238.

[25] 罗佳龙, 傅晓帆, 袁旭峰, 等. 基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 123-132.
Luo Jialong, Fu Xiaofan, Yuan Xufeng, et al. Event-triggered dynamic consistency algorithm based feeder load balancing control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 123-132.

[26] 肖峻, 张诗豪. 有源配电网安全域的体积: 定义、算法与分析[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1196-1205.
Xiao Jun, Zhang Shihao. Volume of active distribution network security region: definition, algorithm and analysis[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1196-1205.

[27] GB/T 12325-2008 电能质量 供电电压偏差[S].

（编辑 陶晴）