

# 交直流柔性互联配电网智能软开关与储能 多目标联合规划方法

安娟, 黄存强, 李俊贤, 刘兴文, 王宇思

(国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810000)

**摘要:**大规模分布式新能源并网的间歇性和不确定性对电力系统的稳定运行带来巨大挑战。智能软开关(SOP)和储能是空间-时间维度上消纳分布式新能源的有效途径,对于提升配电网分布式新能源承载力具有重要作用。为此,综合考虑 SOP 和储能的灵活运行特性,提出了面向新能源承载力提升的 SOP、储能与 DG 双层多目标规划模型。其中,上层模型以配电网全寿命周期总收益、新能源承载能力、系统供电能力、电能质量作为优化目标进行储能与 DG 的选址定容,下层以配电网日总损耗最小为目标优化系统运行状态。将改进的多目标粒子群算法与混合整数二阶锥规划算法相结合对所提模型进行求解,在改进的 IEEE 43 节点交直流柔性互联配电网算例中验证了联合规划方法的有效性,并分析不同场景下的最优方案。

**关键词:**分布式电源;智能软开关;交直流配电网;双层规划;多目标优化

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26156

## A Multi-objective Joint Planning Method for AC-DC Flexible Interconnected Distribution Network Based on Soft Open Point and Energy Storage

AN Juan, HUANG Cunqiang, LI Junxian, LIU Xingwen, WANG Yusi

(Research Institute of Economy and Technology of State Grid Qinghai Electric Power Company,  
Xining 810000, Qinghai, China)

**Abstract:** The intermittency and uncertainty of large-scale distributed new energy bring great challenges to the stable operation of power system. Intelligent soft open point (SOP) and energy storage are effective ways to absorb distributed new energy in spatial and temporal dimension, and play an important role in improving the capacity of distributed new energy in distribution network. Therefore, considering the flexible operation characteristics of SOP and energy storage, a double-layer multi-objective programming model of SOP, energy storage and DGs for the capacity improvement of new energy was proposed. The upper level takes the total life cycle income of the distribution network, the carrying capacity of new energy, the system power supply capacity, and the power quality as the optimization objectives for the location and capacity determination of the units. However, the lower level takes the minimum daily total loss of the distribution network as the goal for the system optimization operation. The improved multi-objective particle swarm optimization algorithm was combined with the mixed integer second-order cone programming algorithm to solve the proposed model. Finally, the effectiveness of the joint programming method was verified in the improved IEEE 43-node AC-DC flexible interconnected distribution network, and the optimal scheme under different scenarios was analyzed.

**Key words:** distributed generation (DG); soft open point (SOP); AC/DC distribution network; double-layer programming; multi-objective optimization

随着全球能源短缺与环境污染问题的日益严重,大力发展新能源已成为未来能源改革的发展方向<sup>[1-2]</sup>。然而大规模分布式电源(distributed

generator, DG)并网的间歇性和随机性给配电网带来了诸如电压波动、功率越限/返送等问题,制约了配电网承载力水平的提高<sup>[3]</sup>,因此急需提出

**基金项目:**国网青海省电力公司科技项目(522830230007)

**作者简介:**安娟(1989—),女,本科,高级工程师,主要研究方向为配电网规划,Email:2945256379@qq.com

有效的规划和运行方法以应对日益增长的DG接入,确保能源供应的稳定性和可靠性,促进能源可持续发展。

目前,为了解决DG并网带来的影响,针对高渗透率DG接入的规划和调节方法已有大量研究。文献[4-6]在规划配电网时采用网络重构的策略,通过改变系统拓扑结构,实现高渗透率场景下DG的规划配置。文献[7]基于并联电容器组、有载调压变压器等离散型设备和SVC等连续无功调节设备,通过优化配电网电压间接提高配电网的承载能力。文献[8]考虑多主体博弈关系,构建考虑利益主体有限理性的配电网多主体博弈协同规划模型,通过多主体间的演化博弈获得配电网网架、分布式电源和储能最佳规划方案。文献[9]考虑各类分布式电源和储能系统并网的影响,建立了主动配电网的双层规划模型,通过协调源-网-荷-储资源来提高新能源的消纳水平。文献[10]以碳排放量最小和投资成本最小为目标,研究了主动管理模式对分布式电源优化配置的影响。文献[11]通过分布式电源逆变器无功控制及网络重构实现DG承载力的提升,同时利用无功控制优化了配电网电能质量。上述文献大多通过建立包含DG规划配置阶段与配电网优化运行阶段的多层优化模型来提高配电网的新能源承载力并改善电能质量,所提方法仅在时间维度上对灵活性资源进行规划配置,未考虑配电网网络结构及空间潮流分布对DG接入容量的影响,因此新能源承载力提升效果有限。

智能软开关(SOP)是一种能取代传统联络开关的电力电子设备,通过SOP可实现配电网不同馈线的柔性互联,在空间维度上优化配电网潮流分布<sup>[12-14]</sup>。因此,国内外对基于SOP的柔性互联配电网规划配置方法进行了研究,文献[15]通过建立规划-运行三层优化模型来配置SOP的容量及位置,从而实现分布式电源的最大化接入。文献[16]提出了考虑SOP与智能负荷联动的配电网灵活性提升方法,并通过改进鲸鱼算法优化求解目标函数,降低系统网损从而间接提升DG的承载力。考虑到储能系统(energy storage system, ESS)能在时间维度上提高配电网运行的灵活性<sup>[17]</sup>,有必要对ESS与SOP的协同规划方法进行研究,从而在时空两维度上实现分布式电源的高效消纳。目前,考虑ESS和SOP的联合规划研究相对较少<sup>[18]</sup>,文献[19]提出了一种由ESS与SOP集

成的ESOP设备的规划方法,以实现配电网的经济灵活运行。文献[20]提出一种面向灵活性提升的ESS和SOP协同规划模型,并通过二阶锥松弛求解最优配置方案。文献[21]计及分布式电源的出力不确定性,构建柔性互联配电网双层鲁棒承载力评估模型,通过对偶理论及松弛方法线性化模型并求解,实现柔性互联拓扑下的DG最大化接入。然而上述考虑SOP和ESS协同规划的文献多从经济性、承载力角度出发,忽略了联合规划对配电网电能质量、供电能力及可靠性等其余指标的影响,未考虑ESS与SOP的多目标联合规划研究。

综上所述,本文以交直流柔性互联配电网为研究对象,构建了面向新能源承载力提升的SOP、储能与DG双层多目标规划模型。该模型上层以配电网全寿命周期总收益、新能源承载能力、系统供电能力、电能质量作为优化目标进行储能和DG的选址定容,下层以配电网日总损耗最小为目标优化系统运行状态,并确定SOP的安装容量。最后,基于改进多目标粒子群算法与混合整数二阶锥规划算法对所提模型进行求解,并从技术经济性角度分析了最优方案的选取方法。

## 1 交直流配电网SOP与储能联合规划模型

配电网中DG, SOP和ESS的优化配置问题属于多主体效益均衡下的多目标优化问题。为了综合考虑ESS与SOP配置过程中配电网经济效益、新能源承载力、供电能力、电能质量等因素,本文构建了SOP与储能多目标双层联合规划模型。

### 1.1 上层规划模型

#### 1.1.1 目标函数

1)目标函数1:经济性最优。

配电网经济性主要包括售电收益、配电网运行成本与ESS/SOP投资成本。以配电网收益最高作为优化目标,配电网运行成本主要由配电网与上级电网电能交换成本、DG运行成本以及网络损耗成本构成,如下式所示:

$$\min f_1 = c_s \cdot S_{\text{SOP}} + c_e \cdot S_{\text{ESS}} + C^G - C^S + C^{\text{DG}} + C^{\text{LOSS}} \quad (1)$$

式中: $C^G$ 为配电网与上级电网进行能量交互所产生的成本; $C^S$ 为配电网向用户售电的收益; $C^{\text{DG}}$ 为配电网收购分布式电源电量的成本; $C^{\text{LOSS}}$ 为配

网内网络损耗的成本;  $c_s$  为 SOP 设备在全生命周期内单位容量的等年值成本;  $S_{SOP}$  为配电网内 SOP 安装容量;  $c_E$  为储能设备在全生命周期内单位容量的等年值成本;  $S_{ESS}$  为配电网内储能总安装容量。

各设备在全生命周期内的等年值成本可由其净现值成本核算,表示如下:

$$\begin{cases} c_E = \zeta(r,l)(C_{E,init} + C_{E,rep} - C_{E,sal} + C_{E,om}) \\ c_s = \zeta(r,l)(C_{S,init} + C_{S,om}) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\zeta(r,l) = \frac{T}{365} \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} \quad (3)$$

式中:  $C_{E,init}$ ,  $C_{S,init}$  分别为单位容量储能和 SOP 的初始投资净现值成本;  $C_{E,om}$ ,  $C_{S,om}$  分别为单位容量储能和 SOP 的年运维净现值成本;  $C_{E,rep}$ ,  $C_{E,sal}$  分别为单位容量储能置换成本和折旧收入;  $\zeta(r,l)$  为折算后的资金回收系数;  $r$  为实际贴现率;  $l$  为设备的工作年限;  $T$  为优化周期内的日采样点数。

配电网与上级电网进行能量交互所产生的成本可由下式表示:

$$C^G = \sum_{t=1}^T \lambda_t^G P_{ex,t} \Delta t \quad (4)$$

式中:  $\lambda_t^G$  为  $t$  时段配电网从上级电网购电或售电的价格;  $P_{ex,t}$  为  $t$  时段内配电网与上级电网的交互功率。

配电网收购分布式电源电量的成本  $C^{DG}$  可表示为

$$C^{DG} = \sum_{i=1}^{N_{DG}} \sum_{t=1}^T \lambda_{i,t}^{DG} P_{i,t}^{DG} \Delta t \quad (5)$$

式中:  $N_{DG}$  为系统内 DG 并网数量;  $\lambda_{i,t}^{DG}$  为  $t$  时段第  $i$  个并网 DG 的上网电价;  $P_{i,t}^{DG}$  为  $t$  时段第  $i$  个并网 DG 的输出功率。

2) 目标函数 2: 新能源承载能力最大。

新能源最大承载能力为配电网各节点接入分布式电源容量之和以分布式电源安装容量最大为优化目标,其值  $S_{DG}$  可由下式计算:

$$\min f_2 = -S_{DG} \quad (6)$$

3) 目标函数 3: 系统供电能力最优。

配电网供电能力是系统稳定运行的重要指标。本模型中主要采用支路负荷裕度与变压器负荷裕度两个指标来衡量系统的供电能力,采用归一化方法得到系统供电能力最优目标函数,以系统支路负荷裕度与变压器负荷裕度加权值最小为优化目标,如下式所示:

$$\min f_3 = \lambda_1 I^M + \lambda_2 T^M \quad (7)$$

式中:  $\lambda_1$  为支路负荷裕度的权重系数;  $I^M$  为系统支路负荷裕度;  $\lambda_2$  为变压器负荷裕度的权重系数;  $T^M$  为系统变压器负荷裕度;  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

式(7)中,支路负荷裕度指配电网中某一支路的可开放容量与线路最大容量之间的比值。支路负荷裕度越大,说明支路的可开放容量足够满足实际负荷的需求,反之则可能导致支路过载,具体计算方法如下:

$$I^M = \frac{1}{TN_L} \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in A_L \cup D_L} (I_{lmax} - I_{ij,t}) / I_{lmax} \quad (8)$$

式中:  $A_L$ ,  $D_L$  分别为交流线路集合和直流线路集合;  $N_L$  为系统内总支路数量;  $I_{lmax}$  为支路  $ij$  的电流上限值;  $I_{ij,t}$  为支路  $ij$  在  $t$  时刻的电流有效值。

配电网中变压器负荷裕度的概念与支路负荷裕度相似,为变压器额定容量与实际负荷之间的比值,计算方法如下式所示:

$$T^M = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{S_{max}^T - S_t^T}{S_{max}^T} \quad (9)$$

式中:  $S_{max}^T$  为配电系统中变电站节点变压器的额定容量;  $S_t^T$  为变压器在  $t$  时刻的视在功率。

4) 目标函数 4: 系统电能质量最优。

电压偏差率是衡量配电网电能质量的重要指标,可以用配电网综合电压偏差率来代表,以电压偏差率最小为优化目标,如下式所示:

$$\min f_4 = \frac{1}{TN_D} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in A_N \cup D_N} (|U_{i,t} - U_{i,ref}|) \quad (10)$$

式中:  $A_N$ ,  $D_N$  分别为交流节点集合和直流节点集合;  $N_D$  为系统内总节点数量;  $U_{i,t}$  为  $t$  时段节点  $i$  的电压值;  $U_{i,ref}$  为节点  $i$  的额定电压。

### 1.1.2 约束条件

在上层模型中,主要的约束条件为 DG 的接入容量及接入位置,储能设备的接入容量及接入位置,具体约束如下:

$$S_{DG} \leq \sum_{i \in A_N \cup D_N} \alpha_i S_{DGmax} \quad (11)$$

$$S_{ESS} \leq \sum_{i \in A_N \cup D_N} \beta_i ESS_{max} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in A_N \cup D_N} \alpha_i = N_{DG} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in A_N \cup D_N} \beta_i = N_{ESS} \quad (14)$$

式中:  $S_{DGmax}$  为各节点允许接入分布式电源的容量上限;  $ESS_{max}$  为各节点配置储能的容量上限,均为给定值;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  为接入状态,为 0-1 变量,值为 0 表

示该节点不接入分布式电源或储能,1表示接入; $N_{DC}$ 为系统内允许DG接入数量; $N_{ESS}$ 为系统内允许ESS接入数量,两者均为给定值。

## 1.2 下层运行模型

### 1.2.1 目标函数

下层运行模型是在上层给定光伏和储能设备的总接入容量与接入位置后,在满足各种约束条件的基础上求解配电网最优运行状态,以配电网网络损耗与SOP损耗之和最小为目标函数,表示为

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in A_L \cup D_L} R_{ij} I_{ij,t}^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{SOP}} P_{i,t}^{SOP,loss} \quad (15)$$

式中: $R_{ij}$ 为相应线路的阻值; $N_{SOP}$ 为配电网中接入的SOP数量; $P_{i,t}^{SOP,loss}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 个SOP的有功损耗值。

### 1.2.2 约束条件

1)SOP运行约束。本文以背靠背电压源型SOP为研究对象<sup>[22-23]</sup>,并考虑以下相关约束条件。

两端背靠背型SOP某端变流器输出的有功功率应当等于其相连另一端变流器的输入有功功率加上两端变流器产生的功率损耗总和。因此,SOP有功功率平衡约束可描述如下:

$$P_{i,t}^{SOP} + P_{j,t}^{SOP} + P_{i,t}^{SOP,loss} + P_{j,t}^{SOP,loss} = 0 \quad (16)$$

式中: $P_{i,t}^{SOP}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $i$ 相连端口所传输的有功功率; $P_{j,t}^{SOP}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $j$ 相连端口所传输的有功功率; $P_{i,t}^{SOP,loss}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $i$ 相连端口的变流器功率损耗; $P_{j,t}^{SOP,loss}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $j$ 相连端口的变流器功率损耗。

SOP各端换流器的损耗大小与其传输的有功与无功功率的平方和成正比。SOP有功功率损耗约束如下:

$$P_{i,t}^{SOP,loss} = A_i^{SOP} \sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \quad (17)$$

$$P_{j,t}^{SOP,loss} = A_j^{SOP} \sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \quad (18)$$

式中: $A_i^{SOP}$ 为节点 $i$ 处接入的SOP换流器损耗系数; $A_j^{SOP}$ 为节点 $j$ 处接入的SOP换流器损耗系数; $Q_{i,t}^{SOP}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $i$ 相连端口所传输的无功功率; $Q_{j,t}^{SOP}$ 为 $t$ 时间段内SOP与节点 $j$ 相连端口所传输的无功功率。

任意时刻SOP各端口换流器传输的有功与无功功率应小于其额定容量。SOP容量限制约束如下:

$$\sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \leq S_i^{SOP} \quad (19)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \leq S_j^{SOP} \quad (20)$$

式中: $S_i^{SOP}$ 为节点 $i$ 处接入的SOP换流器容量; $S_j^{SOP}$ 为节点 $j$ 处接入的SOP换流器容量。

2)交直流线路潮流约束。以下为交直流配电网支路潮流应满足的约束条件,其中交流支路约束为

$$U_{ij,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \quad (21)$$

$$\forall ij \in A_L, \forall i, j \in A_N$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad \forall ij \in A_L, \forall i \in A_N \quad (22)$$

直流支路约束为

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2R_{ij}P_{ij,t} + R_{ij}^2I_{ij,t}^2 \quad (23)$$

$$\forall ij \in D_L, \forall i, j \in D_N$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad \forall ij \in D_L, \forall i \in D_N \quad (24)$$

式中: $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 $t$ 时刻流过支路 $ij$ 的首端有功和无功功率; $R_{ij}$ 、 $X_{ij}$ 分别为支路 $ij$ 的电阻和电抗。

3)交直流节点功率平衡约束。交流节点功率平衡约束为

$$\begin{cases} \sum_{j \in B_{\kappa,i}} P_{ij,t} = \sum_{j \in B_{\chi,i}} (P_{ji,t} - R_{ji}I_{ji,t}^2) + P_{i,t}^{inj} \\ \sum_{j \in B_{\kappa,i}} Q_{ij,t} = \sum_{j \in B_{\chi,i}} (Q_{ji,t} - X_{ji}I_{ji,t}^2) + Q_{i,t}^{inj} \end{cases} \quad \forall i \in A_N \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{DG} + P_{i,t}^{SOP} - P_{i,t}^{load} - P_{i,t}^{bess} - P_{i,t}^{VSC,AC} = P_{i,t}^{inj} \\ Q_{i,t}^{SOP} - Q_{i,t}^{load} - Q_{i,t}^{VSC,AC} = Q_{i,t}^{inj} \\ P_{i,t}^{bess} = P_{i,t}^{bess-out} + P_{i,t}^{bess-in} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $B_{\kappa,i}$ 、 $B_{\chi,i}$ 分别为交流节点 $i$ 对应的流出/注入线路首末端节点集合; $P_{i,t}^{inj}$ 、 $Q_{i,t}^{inj}$ 分别为节点 $i$ 的注入有功和无功功率; $P_{i,t}^{DG}$ 、 $P_{i,t}^{load}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 上分布式新能源与负荷的有功功率; $Q_{i,t}^{load}$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 上负荷的无功功率; $P_{i,t}^{VSC,AC}$ 、 $Q_{i,t}^{VSC,AC}$ 分别为 $t$ 时刻注入电压源型换流器VSC交流侧的有功和无功功率。

直流节点功率平衡约束为

$$\begin{cases} \sum_{j \in B_{\kappa,i}} P_{ij,t} = \sum_{j \in B_{\chi,i}} (P_{ji,t} - R_{ji}I_{ji,t}^2) + P_{i,t}^{inj} \\ P_{i,t}^{DG} - P_{i,t}^{load} - P_{i,t}^{bess} + P_{i,t}^{VSC,DC} = P_{i,t}^{inj} \\ P_{i,t}^{bess} = P_{i,t}^{bess-out} + P_{i,t}^{bess-in} \end{cases} \quad \forall i \in D_N \quad (27)$$

式中: $B_{\kappa,i}$ 、 $B_{\chi,i}$ 分别为直流节点 $i$ 对应的流出/注入线路首末端节点集合; $P_{i,t}^{VSC,DC}$ 为 $t$ 时刻流出电压源型换流器VSC直流侧的有功功率。

4) VSC 运行约束。

电压源型换流器 VSC 为交直流线路的连接点,其等效模型如图 1 所示,其约束包括容量约束和线路功率约束。

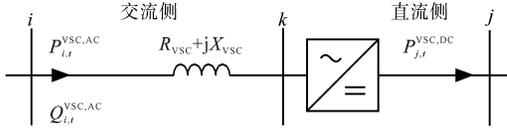


图1 VSC 稳态等效结构

Fig.1 VSC steady-state equivalent structure

VSC 的容量约束和无功功率约束如下式所示:

$$(P_{i,t}^{VSC,AC})^2 + (Q_{i,t}^{VSC,AC})^2 \leq S_{i,VSC}^2 \quad (28)$$

$$-P_{i,t}^{VSC,AC} \tan[\cos^{-1}(F_{VSC})] \leq Q_{i,t}^{VSC,AC} \leq P_{i,t}^{VSC,AC} \tan[\cos^{-1}(F_{VSC})] \quad (29)$$

式中: \$S\_{i,VSC}\$ 为节点 \$i\$ 处 VSC 的额定视在功率; \$F\_{VSC}\$ 为 VSC 的最小功率因数。

VSC 功率约束为

$$\begin{cases} P_{i,t}^{VSC,AC} - R_{i,VSC} I_{ik,t}^2 = P_{j,t}^{VSC,DC} \\ Q_{i,t}^{VSC,AC} - X_{i,VSC} I_{ik,t}^2 = 0 \\ U_{k,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(R_{i,VSC} P_{i,t}^{VSC,AC} + X_{i,VSC} Q_{i,t}^{VSC,AC}) + (R_{i,VSC}^2 + X_{i,VSC}^2) I_{ik,t}^2 \\ I_{ik,t}^2 U_{i,t}^2 = (P_{i,t}^{VSC,AC})^2 + (Q_{i,t}^{VSC,AC})^2 \end{cases} \quad (30)$$

式中: \$R\_{VSC}, X\_{VSC}\$ 分别为 VSC 等效电阻和电抗; \$i\$ 为交流节点, \$i \in A\_N\$; \$j\$ 为直流节点, \$j \in D\_N\$; \$k\$ 为 VSC 交流端口节点; \$U\_{k,t}\$ 为 \$t\$ 时刻 VSC 端口电压有效值。

5) 交直流节点电压约束:

$$U_{li} \leq U_{i,t} \leq U_{ui} \quad \forall i \in A_N \cup D_N \quad (31)$$

式中: \$U\_{ui}, U\_{li}\$ 为交直流节点 \$i\$ 的电压限值。

6) 交直流线路通道约束:

$$|I_{ij,t}| < I_{max} \quad \forall ij \in A_L \cup D_L \quad (32)$$

式中: \$I\_{max}\$ 为支路 \$ij\$ 上电流最大值。

7) 配电网主变功率约束:

$$\begin{cases} \sqrt{P_{ex,t}^2 + Q_{ex,t}^2} \leq S_{max}^T \\ P_{ex,t} = \sum_{j \in B_{co}} P_{0j,t} \\ Q_{ex,t} = \sum_{j \in B_{co}} Q_{0j,t} \\ P_{ex,t} \geq -\delta S_{max}^T \end{cases} \quad (33)$$

式中: \$P\_{ex,t}, Q\_{ex,t}\$ 分别为 \$t\$ 时刻交直流配电网与上级电网交互的有功无功; \$\delta\$ 为交直流配电网允许向上级电网返送功率比例。

8) 储能系统运行约束。

考虑储能荷电状态 SOC 对电池寿命的影响,需设定储能实时容量的上下限值,可表示为

$$\begin{cases} ESS_{i,t+\Delta t} = ESS_{i,t} + k_{bi} P_{i,t}^{bess-in} \Delta t + \frac{P_{i,t}^{bess-out} \Delta t}{k_{bo}} \\ \eta_{i,min} S_{ESS,i} \leq ESS_{i,t} \leq \eta_{i,max} S_{ESS,i} \\ 0 \leq S_{ESS,i} \leq \beta_i ESS_{max} \\ \sum_{i \in A_N \cup D_N} S_{ESS,i} = S_{ESS} \end{cases} \quad (34)$$

式中: \$ESS\_{i,t}, ESS\_{i,t+\Delta t}\$ 分别为节点 \$i\$ 上 \$t\$ 和 \$t+\Delta t\$ 时刻的储能剩余容量值; \$\eta\_{min}, \eta\_{max}\$ 分别为 SOC 的最小值和最大值; \$S\_{ESS,i}\$ 为节点 \$i\$ 上配置的储能容量; \$P\_{i,t}^{bess-in}, P\_{i,t}^{bess-out}\$ 分别为节点 \$i\$ 上储能 \$t\$ 时刻充电功率与放电功率; \$k\_{bi}, k\_{bo}\$ 分别为储能充放电效率; \$\beta, S\_{ESS}\$ 为上层模型的决策变量,在下层模型中为已知量。

由于储能电池经变流器接入电网,因此储能系统的充放电功率不仅受到每块电池充放电倍率的影响,还受并网变流器容量限制,其约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{bess-in} \leq U_{i,ch,t} P_{i,ch}^{max} \\ U_{i,dis,t} P_{i,dis}^{max} \leq P_{i,t}^{bess-out} \leq 0 \\ U_{i,ch,t} + U_{i,dis,t} \leq 1 \end{cases} \quad (35)$$

式中: \$U\_{i,ch,t}, U\_{i,dis,t}\$ 分别为节点 \$i\$ 储能 \$t\$ 时刻的充、放电状态, \$U\_{i,ch,t}=1\$ 表示该时刻储能充电, \$U\_{i,dis,t}=1\$ 表示放电; \$P\_{i,ch}^{max}, P\_{i,dis}^{max}\$ 分别为节点 \$i\$ 上储能最大充放电功率限值。

9) DG 接入容量约束:

下层优化模型中对 DG 的接入数量与容量也应加以限制, DG 装机约束如下:

$$\begin{cases} S_{DG,i} \leq \alpha_i S_{DG,max} \\ P_{i,t}^{DG} \leq S_{DG,i} \\ \sum_{i \in A_N \cup D_N} S_{DG,i} = S_{DG} \end{cases} \quad (36)$$

式中: \$S\_{DG,i}\$ 为节点 \$i\$ 上配置的 DG 容量; \$\alpha, S\_{DG}\$ 为上层模型的决策变量,在该层中为已知量。

1.3 双层优化模型求解方法

所提双层规划模型属于混合整数非线性非凸模型,采用改进的多目标粒子群算法 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 与二阶锥规划 (second-order cone programming, SOCP) 混合方法对模型求解,其中, MOPSO 用于获得上层 DG 与储能选址定容方案, SOCP 用于求解下层最优运行状态。

本文采用的改进 MOPSO 算法考虑粒子收敛速度慢和易早熟等问题,以粒子与全局最优解的位置差距值指导惯性权重取值,采用精英保留策略并引入交叉变异操作,以此提高算法在迭代寻优过程中的准确性和种群多样性,改善传统 PSO

算法存在的易早熟问题。SOCP 是线性空间中凸锥上的优化方法,在电力系统规划问题中已有广泛应用<sup>[24]</sup>,本文采用 SOCP 对下层交直流配网的运行状态进行优化,需要将目标函数与非线性约束条件通过凸松弛与变量替代的方式线性化,具体锥转化过程可参考文献[25],本文不再赘述。本文所提多目标双层规划模型的求解流程图如图2所示。

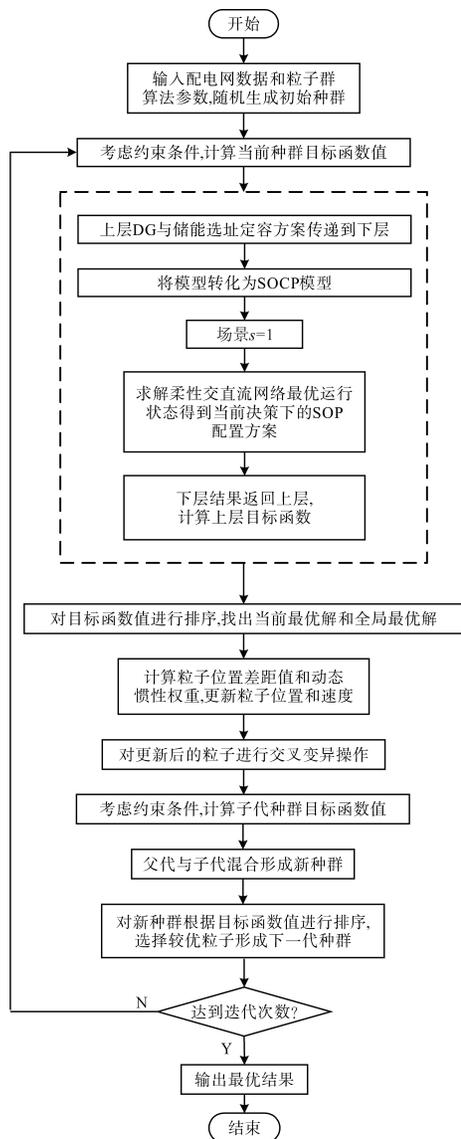


图2 双层模型计算流程

Fig.2 Double-layer model calculation process

具体求解步骤如下:

步骤1:输入 DG、配电网及粒子群算法参数,随机生成初始种群;

步骤2:将粒子群中 DG 和 ESS 的位置( $\alpha$  和  $\beta$ )及容量( $S_{DC}$  和  $S_{ESS}$ )传递至下层运行模型,并通过 SOCP 方法求得 SOP 接入容量( $S_{SOP}$ )以及配电网各运行参数( $P_{ex}I^M, T^M, U$ );

步骤3:将下层运行参数返回至上层模型,上层模型目标函数作为适应度值,根据式(1)、式(6)、式(7)、式(10)计算当前种群的适应度值;

步骤4:对种群进行非支配排序,找出当前最优解和全局最优解;

步骤5:计算粒子位置差距值和动态惯性权重,根据约束条件更新粒子位置和速度;

步骤6:对更新后的粒子进行交叉变异操作,计算子代种群适应度值;

步骤7:将父代与子代混合形成新种群,对新种群进行非支配排序,选择较优粒子形成下一代种群;

步骤8:重复步骤2直至迭代完成并输出最优的决策变量。

## 2 算例分析

### 2.1 算例参数设置

本文将 IEEE 33 节点系统改为 43 节点交直流柔性互联配电网,并对上文所提出的双层规划模型及方法进行验证分析,规划期为 20 a。该交直流配电网具有两条直流线路,如图3所示,直流线路上各节点负荷情况如表1所示,直流节点负荷规模与交流节点负荷规模一致,交流节点负荷参数见文献[26],交流部分额定电压为 12.66 kV,直流部分额定电压为  $\pm 10$  kV, VSC 容量为 500 kV·A, SOP 安装容量的最小单位为 100 kV·A,最大安装容量为 500 kV·A, SOP 每端变流器功率损耗系数为 0.02。配电网变压器容量为 10 MV·A,最大允许返送功率不超过变压器容量的 20%。其余参数同 IEEE 33 节点标准算例<sup>[27]</sup>。

分布式电源以光伏为例,一天为 24 个采样值,以年内 8 760 h 数据为基础,选用 K-means 算法聚类得到典型日的源荷单位容量曲线如图4所示。系统节点电压标幺值范围 0.95~1.05, SOC 的范围为 0.2~1, SOP 与储能设备相关参数如表2所示。

表1 直流线路负荷情况

Tab.1 Load in DC line

节点	负荷/kW	节点	负荷/kW
34	90	39	40
35	60	40	50
36	60	41	80
37	100	42	90
38	80	43	100

粒子群算法的参数设置为:种群规模取100,迭代次数取200,变异率为0.05,交叉率为0.1,惯性系数 $\omega_{\min}$ 取0.4, $\omega_{\max}$ 取0.9,动态学习因子取值为 $c_{1k}=2.5+(0.5-2.5)k/gen$ 和 $c_{2k}=0.5+(2.5-0.5)k/gen$ , $k$ 为当前迭代次数, $gen$ 为总迭代次数。测试环境为12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H CPU,主频2.70 GHz,内存16 GB,开发环境Win 11 64位,仿真软件为Matlab R2020b。

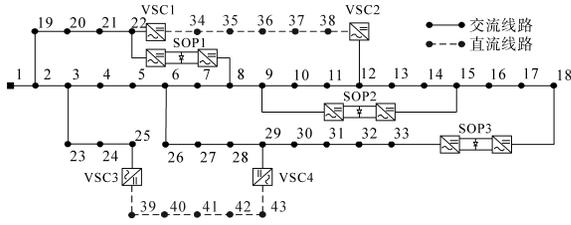


图3 43节点交直流配电网拓扑

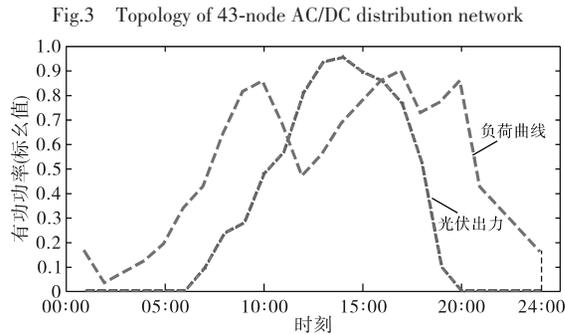


图4 DG出力与负荷曲线

Fig.4 DG out put and load curve

表2 SOP与储能设备参数

Tab.2 SOP and storage device parameters

参数	数值
贴现率	0.08
经济使用年限/a	20
SOP单位容量投资成本/[元·(kV·A) <sup>-1</sup> ]	1 000
SOP损耗系数	0.02
SOP运行维护系数	0.01
储能容量成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1 000
储能功率成本/[元·(kW) <sup>-1</sup> ]	1 500
储能运行维护费用/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.019 5

## 2.2 规划结果及分析

基于上述参数及求解方法对交直流柔性互联配电网智能软开关与储能多目标联合规划模型进行求解,由于上层模型为多目标优化问题,得到的解是一组 Pareto 最优解集,如图5所示。本文选择基于优劣解距离法(TOPSIS)的多属性决策法,将各备选方案与正、负理想方案进行比较,最后获得最优解<sup>[27-28]</sup>,优劣解距离法的指标权重值如表3所示。最后,SOP,ESS以及DG的最优

规划方案如表4所示,方案对应的指标如表5所示。

表3 指标权重值

Tab.3 Index weight value

类别	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
指标权重	0.312	0.370	0.223	0.095

表4 配网中各设备规划方案

Tab.4 Configuration scheme of distribution network

类型	接入节点	接入容量[(MW)/(MW·h)/(MV·A)]
DG	2,3,13,43	6,3,1.36,1.54
ESS	24,32,43	0.1,0.7,1.2
SOP	8—22,9—15,18—33	0.4,0.3,0.3

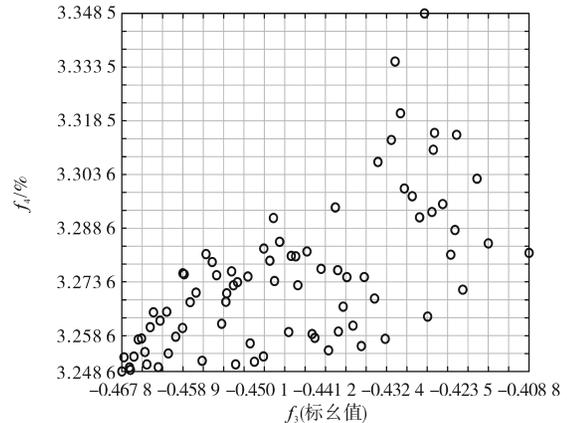
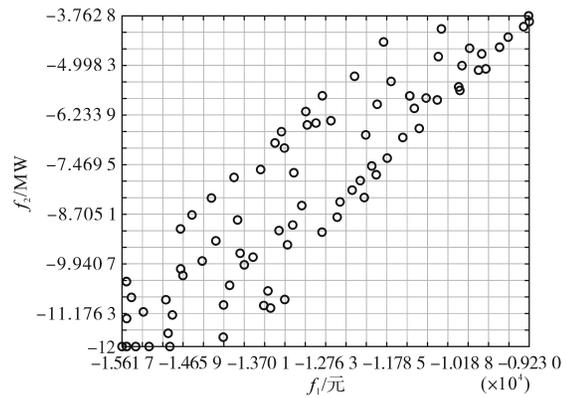


图5 Pareto前沿解集

Fig.5 Pareto frontier

表5 配网最优运行结果

Tab.5 Optimal operation of distribution network

系统指标参数	数值
配电网年售电收益/万元	823.7
储能年等值成本/万元	62.24
SOP年等值成本/万元	11.18
网络损耗率/%	1.05
电压偏差率/%	3.25
综合支路负荷裕度/%	47.62
综合变压器负荷裕度/%	36.07

图6对比分析了柔性互联交直流配电网中采用DG、储能与SOP协同规划方法和未规划前,SOP所传输有功功率。由图6可知,对于SOP 9—15,对比规划前其传输的功率有大幅提升。

对于SOP 8-22,在规划前,主要在午间光伏大发时段承担了一部分功率的传输,在其余时段传输功率较小;规划后,SOP 8-22不仅在午间由光伏容量大的馈线向光伏容量小的馈线传输了大量多余的发电功率,而且在其余光伏发电较少的时段内,还承担了大量由高负载馈线向低负载馈线传递功率的作用。可以看出,经过联合规划配置后,SOP与光伏间配合作用更好,根据光伏出力和负荷需求的变化,灵活改变了潮流的大小和方向,显著提升了系统的调节能力。

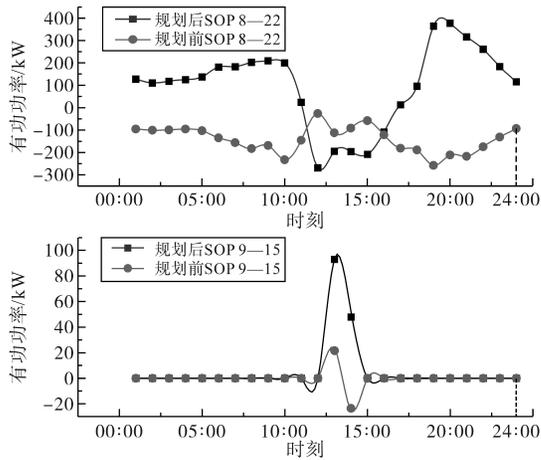


图6 规划前、后SOP传输有功功率

Fig.6 The SOP active power transmission before and after planning

图7展示了典型日内交直流柔性配电网中储能的充放电功率大小。

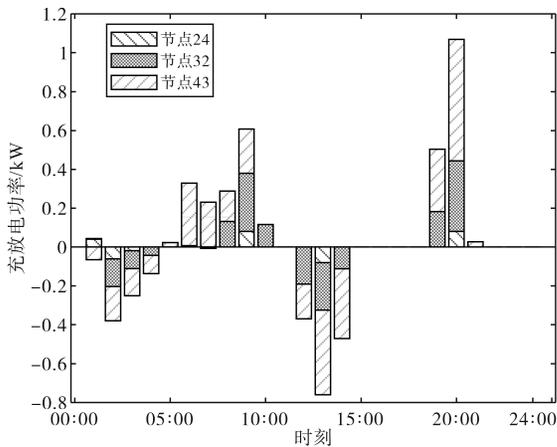


图7 储能充放电功率

Fig.7 Energy storage charging and discharging power

从图7中可以看出,各节点的储能设备主要在夜间负荷低谷时段(00:00—05:00)与午间光伏大发时段(11:00—14:00)进行充电,一方面在负荷低谷时段通过充电进行峰谷套利,另一方面储能能在午间的充电功率更大,与光伏出力最高的时段高度重合,表明储能电池通过消纳午间系统中过量的光伏发电量,实现时间维度上的功率转

移,平抑了午间光伏尖峰,提高了配电网对光伏的消纳能力。在日内其余时刻,储能集中在上午与晚间负荷高峰时段进行放电,平抑负荷尖峰部分,同时配合SOP空间上转移功率的作用,使馈线间功率流动都更加均衡,提高了系统的供电能力,并降低了网络损耗。

图8~图10对比分析了柔性交直流配电网在规划前后系统内全天电压分布、电压波动最大节点(节点14)的电压变化以及午间光伏大发时段的线路负载情况。

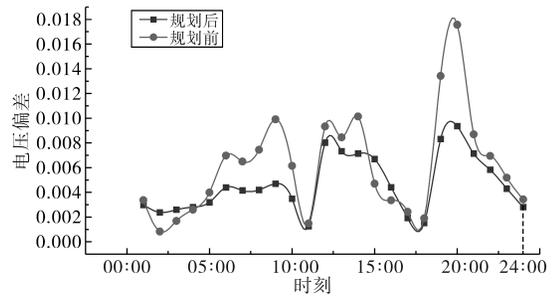


图8 规划前后系统电压偏差

Fig.8 Diagram of example system voltage deviation before and after planning

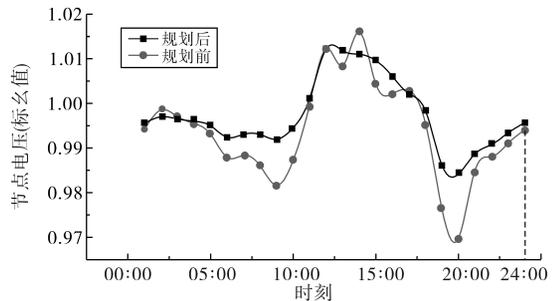


图9 规划前、后电压波动最大节点电压情况

Fig.9 The node voltage with maximum voltage fluctuation before and after planning

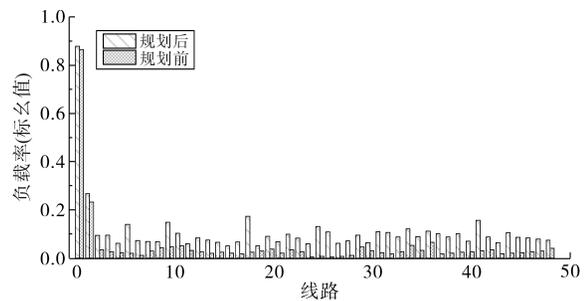


图10 规划前、后线路负载率对比

Fig.10 Comparison of line load rate before and after planning

由图8~图10可以看出,与规划前相比,经过联合规划后的柔性交直流配电网,各设备之间的互补性更强,规划方案更适合当前配网结构、性能更优,可降低系统电压偏差,改善电压波动情况与支路负载分布,提高系统的灵活性与可靠性。

表2为目前各设备的投资运维成本,考虑后续技术进步与规模化应用后成本的下降,本文分析各设备成本下降前后系统的经济性灵敏度。设文中储能设备变流器的功率取其容量的50%,设置贴现率为0.08,光伏和SOP的经济使用年限均为20 a,储能经济适用年限为8 a,各设备成本下降为原来的50%,以配电网作为收益主体,光伏上网电价为0.227元/(kW·h),售电电价为0.5元/(kW·h),得到SOP与储能设备配置后取得新增光伏承载能力的经济效益随新增光伏承载容量的变化情况如图11所示。

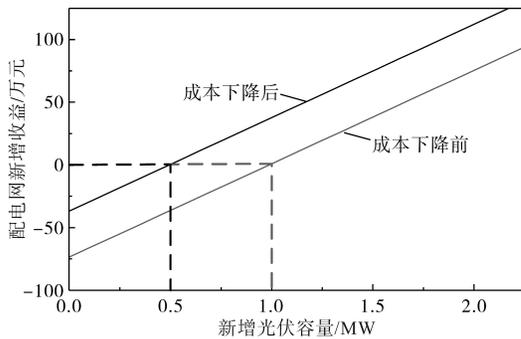


图11 配电网新增收益随新增光伏容量变化情况

Fig.11 Distribution network additional revenue changes with the addition of photovoltaic capacity

由图11可知,在现有SOP与储能设备成本下,安装储能与SOP后提升的光伏承载能力提高至1.0 MW时即可获得经济收益,本文所提出的配置方案可提高最大光伏承载容量0.8 MW,虽然成本略微增加13.89万元,但储能与SOP协同配合的调节能力可显著提高配电网供电能力、降低系统网络损耗,为确切可行的配置方案。当考虑技术改进与规模化应用后,SOP与储能设备成本下降时,当安装储能与SOP后提升的光伏承载能力提高0.5 MW时即可获得经济收益,本文提出的配置方案对应增加经济收益为22.81万元。由此可见,本文所提出的SOP与储能设备联合规划策略,不会造成过多的成本投入即可改善配电网的电能质量,提高供电灵活性,且在技术改进与成熟应用后可以取得可观的经济效益。

### 2.3 不同算法求解性能对比分析

本节对比传统多目标优化算法与本文所提算法的性能,对比算例同2.1节,测试环境同上。最优解选取方案均采用TOPSIS多属性决策法。从求解精度及时间两方面对比分析本文所提方法与采用传统MOPSO算法(传统算法动态学习因子不变,且仅考虑变异和交叉)的混合算法的

性能,结论如表6所示。

表6 不同算法对比结果

Tab.6 Comparison results of different algorithms

	$f_1/\text{万元}$	$f_2/\text{MW}$	$f_3(\text{标么值})$	$f_4/\%$	$T_s/h$
所提方法	-1.56	-11.9	-0.42	3.25	83
传统方法	-1.06	-10.5	-0.48	3.08	95

表6中, $f_1, f_2, f_3, f_4$ 分别为各目标的函数值, $T_s$ 为求解方法的时间。由表6可知,本文所提求解方法的求解速度优于传统方法。此外,本文所提方法在经济性及新能源承载力指标上均优于传统方法,正因为新能源接入容量变小,传统方法求得的供电能力及电能质量要稍微优于本文所提方法,但两者均满足实际运行要求。本文重点关注新能源的承载力,因此综合以上分析,本文所提方法优于传统方法。

值得注意的是,本文的重点在于通过ESS和SOP的联合规划,在时间-空间尺度上优化配电网的潮流分布,从而提升新能源的承载力,是从稳态层面考虑的优化问题,然而配电网中增加电力电子设备后其故障率及稳定性可能会变差,因此,若考虑故障率等因素,实际的配置方案需要统筹考虑。

## 3 结论

本文针对柔性交直流配电网中DG、储能与SOP多种设备的优化配置问题,提出了一种考虑配电网全寿命周期总收益、新能源承载能力、系统供电能力、电能质量等指标的多目标联合规划模型,并提出改进的粒子群算法与二阶锥规划混合算法结合进行求解。在改进的43节点柔性交直流配电网进行了有效性分析,分析所得主要结论如下:

1) 本文提出的多目标联合规划模型不仅考虑了配电网新能源承载力的提升,还兼顾配电网运行经济性与系统整体电能质量的提高。相比于规划前,SOP传输的功率明显增大并且在多时段中都起到了功率传输作用,灵活改变了潮流的空间分布,和储能时间维度上的配合显著提升了系统DG的承载力。

2) 本文提出的基于改进粒子群与二阶锥规划的混合算法,能良好适用于大规模混合整数非线性规划问题,结合最优方案评价策略,可得到满足不同评价指标的交直流柔性配电网最优配置方案,改善配电网电能质量,提高新能源承载

能力,并取得一定的经济效益。

#### 参考文献

- [1] 陈国平,梁志峰,董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-379.  
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379.
- [2] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [3] BAZRAFSHAN M, GATSIS N, DALL' ANESE E. Placement and sizing of inverter-based renewable systems in multi-phase distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 918-930.
- [4] 倪识远,张林焱. 考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 38-47.  
NI Shiyuan, ZHANG Linyao. Multi-objective bi-level optimal dispatch method of an active distribution network considering dynamic reconfigurations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 38-47.
- [5] 葛少云,张有为,刘洪,等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1526-1536.  
GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, et al. Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1526-1536.
- [6] 马丽叶,王玉翠,王楚通. 主动配电网中计及网络重构的分布式电源鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 94-101.  
MA Liye, WANG Yucui, WANG Chutong. Robust planning of distributed generators in active distribution network considering network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 94-101.
- [7] 丛雨,原帅,王昊,等. 基于改进多目标灰狼算法和二阶锥规划的主动配电网多时间尺度无功/电压优化控制[J]. 现代电力, 2025, 42(4): 765-777.  
CONG Yu, YUAN Shuai, WANG Hao, et al. Multi-time scale reactive power/voltage optimal control for active distribution network based on improved grey wolf optimizer and second-order cone programming[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(4): 765-777.
- [8] 刘自发,张子腾. 考虑多主体博弈的配电网源网荷储协同规划[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5046-5058.  
LIU Zifa, ZHANG Ziteng. Collaborative planning of distribution network source-network-load-storage considering multi-agent game[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5046-5058.
- [9] 侯帅辉,张新燕,代玥,等. 计及储能配合与需求侧响应的主动配电网分布式电源规划[J]. 现代电子技术, 2022, 45(23): 132-137.  
HOU Shuaihui, ZHANG Xinyan, DAI Yue, et al. Distributed power planning for active distribution network considering energy storage coordination and demand side response[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(23): 132-137.
- [10] 杨东俊,涂智福,徐敬友,等. 计及低碳排放和需求侧管理的主动配电网双层规划[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(7): 709-715.  
YANG Dongjun, TU Zhifu, XU Jingyou, et al. Bi-level planning of active distribution network considering low carbon emissions and demand side management[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(7): 709-715.
- [11] 王强强,姚良忠,盛万兴,等. 主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.  
WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, SHENG Wanxing, 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.
- [12] FUAD K S, HAFEZI H, KAUHANIEMI K, et al. Soft open point in distribution networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 210550-210565.
- [13] FARZAMNIA A, MARJANI S, GALVANI S, et al. Optimal allocation of soft open point devices in renewable energy integrated distribution systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 9309-9320.
- [14] 张沈习,王浩宇,李然,等. 考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 48-61.  
ZHANG Shenxi, WANG Haoyu, LI Ran, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48-61.
- [15] 张江,刘谦,李毓林,等. 计及智能软开关的分布式电源优化配置研究[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 96-104.  
ZHANG Jiang, LIU Qian, LI Yulin, et al. Research on optimal configuration of distributed generation considering soft open point[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 96-104.
- [16] 王天宇,李晓露,柳劲松,等. 考虑 SOP 与智能负载特性的配电网灵活性提升方法[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 47-57.  
WANG Tianyu, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. A method for improving the flexibility of distribution networks considering soft open point and smart load characteristics[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 47-57.
- [17] 王成山,季节,冀浩然,等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.  
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [18] 张忠会,雷大勇,李俊,等. 基于自适应  $\epsilon$ -支配多目标粒子群

- 算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
- ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive  $\varepsilon$ -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [19] HUANG Zitong, XU Yonghai, CHEN Lin, et al. Coordinated planning method considering flexible resources of active distribution network and soft open point integrated with energy storage system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(23): 5273-5285.
- [20] 何叶, 杨晓东, 吴红斌, 等. 面向新型配电系统灵活性提升的智能软开关与储能系统协调规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 142-150.
- HE Ye, YANG Xiaodong, WU Hongbin, et al. Coordinated planning of soft open point and energy storage system for flexibility enhancement of new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 142-150.
- [21] 葛少云, 侯亭玉, 吴鸣, 等. 柔性互联配电网分布式电源承载能力分布鲁棒优化模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 140-148.
- GE Shaoyun, HOU Tingyu, WU Ming, et al. Distributionally robust optimization model of hosting capability for distributed generators in flexible interconnected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 140-148.
- [22] 肖峻, 刚发运, 蒋迅, 等. 柔性配电网: 定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1435-1446.
- XIAO Jun, GANG Fayun, JIANG Xun, et al. Flexible distribution network: definition, morphology and operation mode[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1435-1446.
- [23] 孟明, 魏怡, 朱国林, 等. 基于智能软开关的交直流主动配电网优化控制策略研究[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 1-7.
- MENG Ming, WEI Yi, ZHU Guolin, et al. Research on optimal control strategy of ac/dc active distribution networks based on soft open point[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 1-7.
- [24] 张忠会, 雷大勇, 蒋昌辉, 等. 基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.
- ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 70-85.
- [25] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.
- LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and Big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.
- [26] 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.
- [27] 南琦琦, 穆云飞, 董晓红, 等. 电动汽车快速充电网络综合评估指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 83-91.
- NAN Qiqi, MU Yunfei, DONG Xiaohong, et al. Comprehensive evaluation index system and method for fast charging network of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 83-91.
- [28] ELGHANAM E, NDIAYE M, HASSAN M S, et al. Location selection for wireless electric vehicle charging lanes using an integrated TOPSIS and binary goal programming method: a UAE case study[J]. IEEE Access, 2023, 11: 94521-94535.

收稿日期: 2024-09-05

修改稿日期: 2024-11-26