

# 具有源荷不平衡特性的配电网智能软开关和储能联合规划

王 鹏<sup>1</sup>, 李华伟<sup>1</sup>, 张 沛<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

**摘要:** 柔性互联装置的广泛应用使得主动配电网的运行更加可控和灵活。文中提出一种智能软开关和储能设备的协同规划方案,用于均衡具有源荷不平衡特性的配电网的能量分配,以提高配电网的经济性和可靠性。首先,考虑分布式电源出力的不确定性,采用K-means方法构建典型日场景,并在此基础上,以年综合费用最小为目标函数,建立协同规划模型。然后,通过大M法和二阶锥松弛技术,将原始的非线性非凸模型转化为混合整数二阶锥规划模型,并采用综合范数的两阶段分布鲁棒模型,寻找在最恶劣场景概率分布下运行成本最低的规划方案,提升规划模型的鲁棒性。最后,采用两个源荷不平衡的IEEE 33节点主动配电网算例验证了所提规划模型的可行性。

**关键词:** 智能软开关; 储能; 配电网; 不平衡; 规划; 柔性互联

## 0 引言

近年来,分布式电源(distributed generator, DG)的安装不断增加,这些能源与用电负荷中心距离较远,导致能源供需不平衡<sup>[1]</sup>,进而引发了弃风、弃光以及供电可靠性下降等一系列问题。同时, DG带来的间歇性和不确定性加剧了网络之间的功率不平衡<sup>[2]</sup>,这给配电网的规划和调控带来了重大的挑战<sup>[3-4]</sup>。储能系统(energy storage system, ESS)可以从时间角度缓解 DG引起的功率波动,并能有效改善网络的潮流分布<sup>[5]</sup>。智能软开关(soft open point, SOP)作为新型柔性配电装置,可以从空间角度实时控制馈线之间的有功和无功功率,实现对主动配电网(active distribution network, ADN)潮流的灵活调节和线路间的能量转供<sup>[6]</sup>。ESS与SOP的引入可以有效提升ADN供电的平衡性和经济性。

目前,ESS的选址定容成为研究热点。文献[7-10]采用启发式算法确定ESS的选址定容;文献[11]基于集群划分理念,建立了“网-源-储”两步规划模型,以解决高渗透率DG接入配电网所带来的电压波动和网络损耗问题;文献[12]采用集中式和分布式电池储能的协同规划,将集中式电池储能接入输电网、分布式储能接入配电网,结果表明,在输电网中规划电池储能可有效提升DG消纳水平。

针对SOP的规划,文献[13-14]在有源配电网中规划SOP;文献[15]进行了多微网间互联的SOP的选址研究,表明SOP可以显著提升配电网的经济性和可靠性;文献[16]提出了SOP和传统无功补偿装置并存的多手段互补的电压控制方法,未考虑DG消纳的问题;文献[17-18]采用含储能的SOP,以降低损耗、改善电压水平和提升新能源消纳水平,但含储能的SOP的使用受限于SOP两端的位置选择和容量限制,无法充分发挥ESS的灵活性。

针对SOP与ESS的联合规划,文献[19-20]表明最优配置ESS和SOP可以有效提高ADN的经济效益;文献[21]考虑了需求响应和维持电压稳定,对ESS和SOP进行协同规划,提高了配电网效率,增强了灵活性和可靠性;文献[22]提出了SOP-ESS-DG两阶段协调规划方案,第1阶段进行选址与定容、第2阶段进行多目标运行优化;文献[23]考虑配电网的故障成本,建立了SOP和ESS联合接入配电网的两阶段规划模型;文献[24]建立上层ESS规划、中层SOP规划、下层提升灵活性运行优化的ESS和SOP的三层协调规划模型。

为了保证系统的可靠性和经济性,必须在配电网规划中考虑可再生DG的不确定性<sup>[25]</sup>。文献[13, 26]采用场景分析法处理DG不确定性,由于DG具有强随机性和历史数据的局限性,采用多场景分析法得到的规划方案可能存在一定误差。文献[27]为了应对负荷和DG不确定性,构建了两阶段随机规划(stochastic programming, SP)模型,但SP需要进行大量的随机采样,计算量较大,求解效率较低。

收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2024-02-25。

上网日期: 2024-04-28。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB1200802);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(E17JB00020)。

文献[28]提出了考虑充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化(robust optimization, RO)配置方法。文献[29]建立考虑需求响应的 SOP 和 DG 协同规划的分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)规划模型,以避免 SP 和 RO 存在的问题,并在概率分布不确定性下寻找最优解。

文献[19-24]基于一个 ADN 对 SOP 和 ESS 进行规划,无法充分发挥 SOP 柔性互联、多馈线供电的特点,实际的供电网络中常出现 DG 与负荷需求不匹配的情况,导致源荷不平衡现象。针对上述问题,本文提出了在两个具有源荷不平衡特性的 ADN 中对双端 SOP 和 ESS 进行协同规划的方案,通过 SOP 对功率灵活调节的能力,同时调控两个配电网的能量分布,实现能量的供需平衡。首先,采用 K-means 聚类方法初步处理 DG 出力的不确定性;接着,以年综合成本最小为目标函数,对 SOP 和 ESS 进行选址定容;然后,为进一步考虑 DG 不确定性带来的影响,采用两阶段 DRO 模型和 1-范数、 $\infty$ -范数对 DG 不确定场景的分布概率进行约束;最后,采用两个具有源荷不平衡特性的 ADN 对所提规划模型进行有效性分析。

## 1 规划模型

### 1.1 应用场景的描述

本文规划的应用场景是两个具有源荷不平衡特性的配电网的能量供需平衡,通过 SOP 的互联实现对这两个配电网进行灵活可控的潮流调节,从而减少配电网的弃风弃光现象和需求侧响应,降低配电网的运营成本。在含有高比例可再生能源的 ADN 中,由于难以消纳所有 DG,部分 DG 发电可能会被浪费。而在高负荷需求的 ADN 中,发电机很难满足全部负荷需求。当 DG 的出力较高时,可以利用 SOP 将含高渗透率 DG 的 ADN 中的多余能量传输到高负荷需求的 ADN,以促进可再生能源的消纳并满足各节点的负荷需求。这样不仅提高了 ADN 的灵活性和可控性,有效降低了配电网的运营成本,也提高了可再生能源的利用效率,实现了源荷平衡。

### 1.2 目标函数

ADN 的规划以年综合成本最小为目标函数  $F$ ,包括折算到每年的投资规划费用  $C^{\text{INV}}$  和模拟运行费用  $C^{\text{OPE}}$ ,如式(1)所示。投资成本包括安装 ESS 和 SOP 的成本;模拟运行成本包括设备维护费用  $C^{\text{MAI}}$ 、向上级电网购电费用  $C_{z,t}^{\text{PZ}}$ 、需求侧管理(demand-side management, DSM)费用  $C_{z,t}^{\text{DSM}}$  和弃风弃光惩罚费用  $C_{z,t}^{\text{DIS}}$ 。具体的数学模型如下:

$$\min F = C^{\text{INV}} + C^{\text{OPE}} \quad (1)$$

$$\tau^a = \frac{r_d^a (1 + r_d^a)^{L_T^a}}{(1 + r_d^a)^{L_T^a} - 1} \quad (2)$$

$$C^{\text{INV}} = \tau^{\text{ESS}} \sum_{i \in B_{\text{ESS}}} (c^{\text{ESS,P}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} + c^{\text{ESS,E}} E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}) + \tau^{\text{SOP}} \sum_{ij \in B_{\text{SOP}}} (c^{\text{SOP}} S_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}}) \quad (3)$$

$$C^{\text{OPE}} = C^{\text{MAI}} + C_{z,t}^{\text{PZ}} + C_{z,t}^{\text{DSM}} + C_{z,t}^{\text{DIS}} \quad (4)$$

$$C^{\text{MAI}} = \sum_{i \in B_{\text{ESS}}} c^{\text{ESS,MAI}} E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} + \sum_{ij \in B_{\text{SOP}}} c^{\text{SOP,MAI}} S_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}} \quad (5)$$

$$C_{z,t}^{\text{PZ}} = 365 \sum_{z \in \Omega_z} D_z \sum_{i \in \Omega_T} \sum_{i \in B_{\text{PG}}} c_{z,t}^{\text{P}} P_{i,z,t}^{\text{PG}} \quad (6)$$

$$C_{z,t}^{\text{DSM}} = 365 \sum_{z \in \Omega_z} D_z \sum_{i \in \Omega_T} \sum_{i \in B_{\text{DSM}}} c^{\text{DSM}} P_{i,z,t}^{\text{DSM}} \quad (7)$$

$$C_{z,t}^{\text{DIS}} = 365 \sum_{z \in \Omega_z} D_z \sum_{i \in \Omega_T} \left( \sum_{i \in B_{\text{PVG}}} c^{\text{PVG,DIS}} P_{i,z,t}^{\text{PVG,DIS}} + \sum_{i \in B_{\text{WTG}}} c^{\text{WTG,DIS}} P_{i,z,t}^{\text{WTG,DIS}} \right) \quad (8)$$

式中:下标“ $z$ ”表示第  $z$  个典型日;下标“ $t$ ”表示  $t$  时段;下标“ $i$ ”表示在节点  $i$  上; $\tau^a$  为设备  $a$  的现值转等年值系数, $a \in \{\text{ESS}, \text{SOP}\}$ ;  $r_d^a$  为设备  $a$  的贴现率; $L_T^a$  为设备  $a$  的使用年限; $c^{\text{ESS,P}}$  和  $c^{\text{ESS,E}}$  分别为 ESS 单位功率和容量的投资成本; $P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}$  和  $E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}$  分别为 ESS 实际的安装功率和容量; $c^{\text{SOP}}$  和  $S_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}}$  分别为 SOP 单位容量投资成本和线路  $ij$  上 SOP 的实际安装容量; $c^{\text{ESS,MAI}}$  和  $c^{\text{SOP,MAI}}$  分别为 ESS 和 SOP 单位安装容量的年维护成本; $D_z$  为场景概率; $c_{z,t}^{\text{P}}$  为发电机向上级电网购电价格; $P_{i,z,t}^{\text{PG}}$  为发电机发出的有功功率; $c^{\text{DSM}}$  为可中断负荷中断单位电量的补偿成本; $P_{i,z,t}^{\text{DSM}}$  为可中断负荷的负荷中断量; $c^{\text{PVG,DIS}}$  和  $c^{\text{WTG,DIS}}$  分别为光伏发电机(photovoltaic generator, PVG)和风力发电机(wind turbine generator, WTG)的单位弃光、弃风惩罚成本; $P_{i,z,t}^{\text{PVG,DIS}}$  和  $P_{i,z,t}^{\text{WTG,DIS}}$  分别为弃光和弃风的功率; $B_{\text{ESS}}, B_{\text{SOP}}, B_{\text{PG}}, B_{\text{DSM}}, B_{\text{PVG}}$  和  $B_{\text{WTG}}$  分别为 ESS 待选节点集合、SOP 待选线路集合、发电机节点集合、参与需求管理的负荷节点集合、PVG 安装节点集合和 WTG 安装节点集合; $\Omega_z$  和  $\Omega_T$  分别为典型日场景和模拟运行时段集合。

### 1.3 约束条件

#### 1.3.1 设备安装约束

##### 1) SOP 安装约束

$$\begin{cases} 0 \leq s_{ij}^{\text{SOP}} \leq s_{\max,ij}^{\text{SOP}} L_{ij}^{\text{SOP}} & \forall ij \in B_{\text{SOP}} \\ s_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}} = s_{ij}^{\text{SOP}} S_{\text{unit}}^{\text{SOP}} & \forall ij \in B_{\text{SOP}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $s_{ij}^{\text{SOP}}$  为线路  $ij$  上 SOP 单位安装容量; $s_{\max,ij}^{\text{SOP}}$  为线路  $ij$  上 SOP 的最大安装容量; $L_{ij}^{\text{SOP}}$  为 0-1 变量,值为

0表示线路 $ij$ 不安装SOP;  $S_{\text{unit}}^{\text{SOP}}$ 为SOP的单位安装容量。

### 2) ESS安装约束

$$\begin{cases} 0 \leq e_i^{\text{ESS}} \leq e_{\text{max},i}^{\text{ESS}} L_i^{\text{ESS}} & \forall i \in B_{\text{ESS}} \\ 0 \leq p_i^{\text{ESS}} \leq p_{\text{max},i}^{\text{ESS}} L_i^{\text{ESS}} & \forall i \in B_{\text{ESS}} \\ E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} = e_i^{\text{ESS}} E_{\text{unit}}^{\text{ESS}} & \forall i \in B_{\text{ESS}} \\ P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} = p_i^{\text{ESS}} P_{\text{unit}}^{\text{ESS}} & \forall i \in B_{\text{ESS}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $e_i^{\text{ESS}}$ 和 $p_i^{\text{ESS}}$ 分别为ESS单位容量和单位功率的决策变量;  $e_{\text{max},i}^{\text{ESS}}$ 和 $p_{\text{max},i}^{\text{ESS}}$ 分别为ESS的最大安装容量和功率的决策变量;  $L_i^{\text{ESS}}$ 为0-1变量,其值为0表示节点 $i$ 不安装ESS,其值为1表示节点 $i$ 安装ESS;  $E_{\text{unit}}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{\text{unit}}^{\text{ESS}}$ 分别为ESS的单位安装容量和单位安装功率。

### 1.3.2 设备安装后的运行约束

#### 1) 支路潮流约束

$$\sum_{j \in B_x} P_{ij,z,t} = \sum_{j \in B_x} (P_{ji,z,t} - r_{ij} I_{ij,z,t}) + P_{i,z,t}^{\text{inj}} \quad \forall i \in B_N \quad (11)$$

$$\sum_{j \in B_x} Q_{ij,z,t} = \sum_{j \in B_x} (Q_{ji,z,t} - x_{ij} I_{ij,z,t}) + Q_{i,z,t}^{\text{inj}} \quad \forall i \in B_N \quad (12)$$

$$V_{j,z,t} = V_{i,z,t} - 2(r_{ij} P_{ij,z,t} + x_{ij} Q_{ij,z,t}) + (x_{ij}^2 + r_{ij}^2) I_{ij,z,t} \quad \forall ij \in B_L \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{i,z,t}^{\text{inj}} = P_{i,z,t}^{\text{PG}} + P_{i,z,t}^{\text{PVG}} + P_{i,z,t}^{\text{WTG}} + P_{i,z,t}^{\text{SOP}} + \\ P_{i,z,t}^{\text{ESS}} - P_{i,z,t}^{\text{load}} + P_{i,z,t}^{\text{DSM}} \\ Q_{i,z,t}^{\text{inj}} = Q_{i,z,t}^{\text{PG}} + Q_{i,z,t}^{\text{PVG}} + Q_{i,z,t}^{\text{WTG}} + Q_{i,z,t}^{\text{SOP}} - \\ Q_{i,z,t}^{\text{load}} + Q_{i,z,t}^{\text{DSM}} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{ij,z,t}^2 + Q_{ij,z,t}^2 = I_{ij,z,t}^2 V_{i,z,t} \quad \forall ij \in B_L \quad (15)$$

式中:  $B_k$ 为子节点集合;  $B_x$ 为父节点集合;  $B_N$ 和 $B_L$ 分别为负荷节点集合和线路集合;  $P_{ij,z,t}$ 和 $Q_{ij,z,t}$ 分别为支路 $ij$ 上流过的有功功率和无功功率;  $r_{ij}$ 和 $x_{ij}$ 分别为支路 $ij$ 的电阻和电抗;  $P_{i,z,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{inj}}$ 分别为注入的有功功率和无功功率;  $V_{i,z,t}$ 为电压幅值的平方;  $I_{ij,z,t}$ 为支路 $ij$ 上流过的电流幅值的平方;  $P_{i,z,t}^{\text{PG}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{PG}}$ 分别为发电机发出的有功功率和无功功率;  $P_{i,z,t}^{\text{PVG}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{PVG}}$ 分别为PVG发出的有功功率和无功功率;  $P_{i,z,t}^{\text{WTG}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{WTG}}$ 分别为WTG发出的有功功率和无功功率;  $P_{i,z,t}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{SOP}}$ 分别为SOP发出的有功功率和无功功率;  $P_{i,z,t}^{\text{ESS}}$ 为ESS发出的有功功率;  $P_{i,z,t}^{\text{load}}$ 和 $Q_{i,z,t}^{\text{load}}$ 分别为有功负荷和无功负荷;  $Q_{i,z,t}^{\text{DSM}}$ 为可中断负荷的无功负荷。

#### 2) 节点电压约束

$$V_{\text{min},t}^2 \leq V_{i,z,t}^2 \leq V_{\text{max},t}^2 \quad \forall i \in B_N \quad (16)$$

式中:  $V_{\text{min},t}$ 和 $V_{\text{max},t}$ 分别为电压幅值的下限和上限。

#### 3) 支路电流约束

$$0 \leq I_{ij,z,t} \quad \forall ij \in B_L \quad (17)$$

#### 4) DG出力约束

$$\begin{cases} P_{\text{min}}^{\text{PG}} \leq P_i^{\text{PG}} \leq P_{\text{max}}^{\text{PG}} & \forall i \in B_{\text{PG}} \\ Q_{\text{min}}^{\text{PG}} \leq Q_i^{\text{PG}} \leq Q_{\text{max}}^{\text{PG}} & \forall i \in B_{\text{PG}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{min}}^{\text{PG}}$ 和 $P_{\text{max}}^{\text{PG}}$ 分别为DG有功出力 $P_i^{\text{PG}}$ 的下限和上限;  $Q_{\text{min}}^{\text{PG}}$ 和 $Q_{\text{max}}^{\text{PG}}$ 分别为DG无功出力 $Q_i^{\text{PG}}$ 的下限和上限。

#### 5) SOP运行约束

本文研究的SOP的典型拓扑见文献[30]。设定SOP向节点注入功率为正方向,建立SOP运行约束如下:

$$P_{i,z,t}^{\text{SOP}} + P_{j,z,t}^{\text{SOP}} + P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}} + P_{j,z,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (19)$$

$$P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}} = \mu_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,z,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,z,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (20)$$

$$P_{j,z,t}^{\text{SOP,L}} = \mu_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{j,z,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,z,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (21)$$

$$\sqrt{(P_{i,z,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,z,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}} \quad (22)$$

$$\sqrt{(P_{j,z,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,z,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_{ij,\text{int}}^{\text{SOP}} \quad (23)$$

式中:  $\mu_i^{\text{SOP}}$ 为SOP某一端变流器的损耗系数;  $P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}}$ 为SOP某一端变流器的有功损耗。

#### 6) ESS运行约束

$$\eta_{i,z,t}^{\text{cha}} + \eta_{i,z,t}^{\text{dis}} \leq 1 \quad \forall i \in B_{\text{ESS}} \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,z,t}^{\text{cha}} \leq \eta_{i,z,t}^{\text{cha}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \\ 0 \leq P_{i,z,t}^{\text{dis}} \leq \eta_{i,z,t}^{\text{dis}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} E_{i,z,t+1}^{\text{ESS}} = E_{i,z,t}^{\text{ESS}} + \alpha_i^{\text{cha}} P_{i,z,t}^{\text{cha}} - \frac{P_{i,z,t}^{\text{dis}}}{\alpha_i^{\text{dis}}} \\ \alpha_{i,\text{min}}^{\text{ESS}} E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \leq E_{i,z,t}^{\text{ESS}} \leq \alpha_{i,\text{max}}^{\text{ESS}} E_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\eta_{i,z,t}^{\text{cha}}$ 和 $\eta_{i,z,t}^{\text{dis}}$ 分别表示ESS充、放电状态,均为0-1变量;  $P_{i,z,t}^{\text{cha}}$ 和 $P_{i,z,t}^{\text{dis}}$ 分别为ESS充、放电功率;  $E_{i,z,t}^{\text{ESS}}$ 为ESS电量;  $\alpha_i^{\text{cha}}$ 和 $\alpha_i^{\text{dis}}$ 分别为充、放电效率系数,均为常数;  $\alpha_{i,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 和 $\alpha_{i,\text{min}}^{\text{ESS}}$ 分别为考虑ESS寿命等因素设置的上、下限。

#### 7) DG运行约束

$$\begin{cases} P_{\text{min},i}^{\text{DG}} \leq P_{i,z,t}^{\text{DG}} \leq P_{\text{max},i}^{\text{DG}} & \forall i \in B_{\text{DG}} \\ Q_{\text{min},i}^{\text{DG}} \leq Q_{i,z,t}^{\text{DG}} \leq Q_{\text{max},i}^{\text{DG}} & \forall i \in B_{\text{DG}} \\ Q_{\text{max},i}^{\text{DG}} = P_{\text{max},i}^{\text{DG}} \tan \theta_i^{\text{DG}} & \forall i \in B_{\text{DG}} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $\text{DG} \in \{\text{WTG}, \text{PVG}\}$ ;  $P_{\text{max},i}^{\text{DG}}$ 和 $P_{\text{min},i}^{\text{DG}}$ 分别为DG有功功率上、下限;  $Q_{\text{max},i}^{\text{DG}}$ 和 $Q_{\text{min},i}^{\text{DG}}$ 分别为DG无功功率上、下限;  $\theta_i^{\text{DG}}$ 为DG功率因数角;  $B_{\text{DG}}$ 为DG的节点集合。

#### 8) DSM约束

DSM包括许多措施,本文仅考虑常见的可中断负荷措施。该措施可以在系统峰值负荷、紧急状态下中断或者切除部分负荷,表示如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,z,t}^{\text{DSM}} \leq P_{\max,i,z,t}^{\text{DSM}} & \forall i \in B_{\text{DSM}} \\ Q_{i,z,t}^{\text{DSM}} = P_{i,z,t}^{\text{DSM}} \tan \theta_{i,z}^{\text{L}} & \forall i \in B_{\text{DSM}} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $P_{\max,i,z,t}^{\text{DSM}}$  为负荷最大允许中断量;  $\theta_{i,z}^{\text{L}}$  为负荷额定功率因数角。

## 2 分布鲁棒模型的建立

考虑到上述规划模型为混合整数非线性非凸模型,本文首先采用大M法将原模型进行线性化;再使用二阶锥松弛(second-order cone relaxation, SOCR)技术将线性化后的模型转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)模型;最后,为了考虑风光不确定性对规划的影响,采用DRO模型提升规划方案的鲁棒性。

### 2.1 模型转化

#### 2.1.1 大M法

约束式(25)中存在非线性项,如  $\eta_{i,z,t}^{\text{cha}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}$  和  $\eta_{i,z,t}^{\text{dis}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}$ 。以  $\eta_{i,z,t}^{\text{cha}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}}$  为例,假设一个变量等于该非线性项,采用大M法进行线性化等效如下:

$$h_{i,z,t} = \eta_{i,z,t}^{\text{cha}} P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \quad \forall i \in B_{\text{ESS}} \quad (29)$$

$$-M(1 - \eta_{i,z,t}^{\text{cha}}) + P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \leq h_{i,z,t} \leq M(1 - \eta_{i,z,t}^{\text{cha}}) + P_{i,\text{int}}^{\text{ESS}} \quad (30)$$

$$-M\eta_{i,z,t}^{\text{cha}} \leq h_{i,z,t} \leq M\eta_{i,z,t}^{\text{cha}} \quad (31)$$

式中:  $M$  为一个非常大的实数。

#### 2.1.2 SOCR

将约束式(15)、式(20)一式(23)进行凸松弛,得到下列SOCR形式约束:

$$\| [2P_{ij,z,t}, 2Q_{ij,z,t}, I_{ij,z,t} - V_{i,z,t}]^T \|_2 \leq I_{ij,z,t} + V_{i,z,t} \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \| [P_{i,z,t}^{\text{SOP}}, Q_{i,z,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 &\leq 2 \frac{P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} \mu_i^{\text{SOP}}} \frac{P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} \mu_i^{\text{SOP}}} \\ \| [P_{j,z,t}^{\text{SOP}}, Q_{j,z,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 &\leq 2 \frac{P_{j,z,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} \mu_j^{\text{SOP}}} \frac{P_{j,z,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} \mu_j^{\text{SOP}}} \end{aligned} \right. \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \| [P_{i,z,t}^{\text{SOP}}, Q_{i,z,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 &\leq 2 \frac{S_{ij}^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \frac{S_{ij}^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \\ \| [P_{j,z,t}^{\text{SOP}}, Q_{j,z,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 &\leq 2 \frac{S_{ij}^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \frac{S_{ij}^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \end{aligned} \right. \quad (34)$$

至此,规划模型由原始的混合整数非线性非凸规划问题转化为MISOCP问题,从而可以利用商业软件实现高效求解,转化后的模型如式(35)所示。

$$\begin{cases} \min F = C^{\text{INV}} + C^{\text{OPE}} \\ \text{s.t. 式(9)一式(14)、式(16)一式(19)、} \\ \quad \text{式(24)、式(26)一式(34)} \end{cases} \quad (35)$$

## 2.2 分布鲁棒规划模型

### 2.2.1 DG不确定集构建

求解式(35)得到的规划方案最优性取决于每个场景聚类结果的精度。然而,ADN实际运行面临DG强随机性的影响,无法准确获得场景概率分布。为了弥补不足,本文构建了基于综合范数的置信区间,用于描述生成DG场景概率分布的波动的不确定集,其概率分布的置信度为<sup>[31]</sup>:

$$\Pr \| p - p_0 \|_1 \leq \theta_1 \geq 1 - N \exp\left(\frac{-2K\theta_1}{N}\right) \quad (36)$$

$$\Pr \| p - p_0 \|_\infty \leq \theta_\infty \geq 1 - N \exp(-2K\theta_\infty) \quad (37)$$

式中:  $\Pr(\cdot)$  为概率函数;  $p$  为概率分布的实际值;  $p_0$  为概率分布的预测值;  $\theta_1$  和  $\theta_\infty$  分别为1-范数和 $\infty$ -范数概率偏差的允许限值;  $K$  和  $N$  分别为样本场景数和离散场景数。

本文采用基于1-范数和 $\infty$ -范数的置信度  $\alpha_1$ 、 $\alpha_\infty$ , 则对应的概率偏差的允许值为:

$$\theta_1 = \frac{N}{2M} \ln \frac{2N}{1 - \alpha_1} \quad (38)$$

$$\theta_\infty = \frac{1}{2M} \ln \frac{2N}{1 - \alpha_\infty} \quad (39)$$

根据式(36)一式(39)可得概率分布的置信度集合  $P_{\text{odds}}$  为:

$$P_{\text{odds}} = \left\{ p_z \left\{ \begin{aligned} \sum_{z=1}^N p_z = 1 \\ p_z \geq 0, z \in \{1, 2, \dots, N\} \\ \sum_{z=1}^N |p_z - p_{z,0}| \leq \theta_1 \\ \max |p_z - p_{z,0}| \leq \theta_\infty \end{aligned} \right. \right\} \quad (40)$$

式中:  $p_z$  和  $p_{z,0}$  分别为第  $z$  个场景的概率分布的实际值和预测值。

### 2.2.2 构建DG不确定性的两阶段DRO模型

为了寻求上述不确定分布在最恶劣情况下的最优规划方案,将式(35)所示确定性规划模型中的相关变量划分为第1阶段变量  $x$  和第2阶段变量  $y$ 。第1阶段为已知DG出力场景的概率分布,求出最小化目标函数值,用于确定DRO模型的下界值;第2阶段为已知第1阶段求解结果,寻找置信区间内最恶劣场景的概率分布,从而确定DRO模型的上界值。

$$\begin{cases} \min_x a^T x + \max_{p_z \in P_{\text{odds}}} \min_y \sum_{z=1}^N p_z c^T y \\ \text{s.t. } E y \geq d, K y = 0, F x + G y \geq h, \\ \quad \|J y\| = l^T y + l^T x, A x \geq b, B x = 0 \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [s_{ij}^{\text{SOP}}, e_i^{\text{ESS}}, p_i^{\text{ESS}}]^T \\ \mathbf{y} = [P_{ij,z,t}, Q_{ij,z,t}, I_{ij,z,t}, P_{i,z,t}^{\text{WTG}}, P_{i,z,t}^{\text{PVG}}, P_{i,z,t}^{\text{PG}}, P_{i,z,t}^{\text{SOP}}, P_{i,z,t}^{\text{ESS}}, \\ P_{i,z,t}^{\text{load}}, P_{i,z,t}^{\text{DSM}}, P_{i,z,t}^{\text{SOP,L}}, Q_{i,z,t}^{\text{WTG}}, Q_{i,z,t}^{\text{PVG}}, Q_{i,z,t}^{\text{PG}}, Q_{i,z,t}^{\text{SOP}}, \\ Q_{i,z,t}^{\text{load}}, Q_{i,z,t}^{\text{DSM}}, E_{i,z,t}^{\text{ESS}}]^T \end{cases} \quad (42)$$

式中： $c$ 、 $a$ 为目标函数式(1)对应的系数列向量； $A$ 、 $B$ 、 $E$ 、 $K$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $J$ 为对应约束下变量的系数矩阵； $b$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $l$ 为常数列向量。式(41)中， $E\mathbf{y} \geq d$ 表示优化模型中的不等式约束，包括式(16)至式(18)、式(26)的第2行、式(27)和式(28)的第1行； $K\mathbf{y} = 0$ 为等式约束，包括式(11)至式(14)、式(19)、式(26)的第2行、式(28)的第2行； $F\mathbf{x} + G\mathbf{y} \geq h$ 包括式(25)； $\|J\mathbf{y}\| = l^T \mathbf{y} + l^T \mathbf{x}$ 包括式(32)至式(34)； $A\mathbf{x} \geq b$ 包括式(9)的第1行、式(10)的第1、2行； $B\mathbf{x} = 0$ 包括式(9)的第2行、式(10)的第3、4行。

### 3 DRO模型的求解

针对上述两阶段RO模型，本文采用列约束生成(C&CG)算法进行求解，将式(41)进行分解得到主问题的目标函数与迭代约束如下：

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{a}^T \mathbf{x} + g \quad (43)$$

$$\text{s.t. } g \geq \sum_{z=1}^N P_z^k c^T \mathbf{y}^k \quad (44)$$

式中： $g$ 为辅助变量；上标“ $k$ ”表示第 $k$ 次迭代； $P_z^k$ 为每次迭代离散场景的概率，第1次迭代为预测的概率分布，其余每次迭代的概率分布由子问题得出。求解上述主问题可以得到满足已知概率分布的最优规划方案 $\mathbf{x}^*$ 和模型下界。子问题的目的是已知主问题求解的最优规划方案 $\mathbf{x}^*$ ，寻找DG出力的最差概率分布 $P_z^k$ ，代入主问题用于下一轮迭代计算。

子问题的目标函数为：

$$f(\mathbf{x}^*) = \max_{P_z \in P_{\text{odds}}} \min_{\mathbf{y}} \sum_{z=1}^N p_z c^T \mathbf{y} \quad (45)$$

式(45)内外层max-min的优化问题约束条件不相关，故可以将式(45)分为两步求解，即先求解内层的最优化问题，再求解外层max问题，以获得模型的上界。具体表示如下：

$$\Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*) = \min_{\mathbf{y}} c^T \mathbf{y} \quad (46)$$

$$f(\mathbf{x}^*) = \max_{P_z \in P_{\text{odds}}} \sum_{z=1}^N p_z \Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*) \quad (47)$$

式中：上标“\*”代表该变量的最优解； $\Gamma(\cdot)$ 为内层最优解函数； $P_{\text{odds}}$ 为综合范数模糊集。

约束式(40)构建的概率分布不确定集为一个非线性约束，需要引入辅助变量进行线性化表达，转换为：

$$P_{\text{odds}} = \left\{ p_z \begin{cases} \sum_{z=1}^N (p_z^+ + p_z^-) \leq \theta_1 \\ p_z^+ + p_z^- \leq \theta_{\infty} \\ \delta_z^+ + \delta_z^- \leq 1 \\ 0 \leq p_z^+ \leq \delta_z^+ \theta_1 \\ 0 \leq p_z^- \leq \delta_z^- \theta_1 \\ p_z = p_{z,0} + p_z^+ - p_z^- \end{cases} \right. \quad (48)$$

式中： $p_z^+$ 和 $p_z^-$ 分别为场景 $z$ 的概率分布 $p_z$ 相对于预测分布 $p_{z,0}$ 的正偏移量和负偏移量； $\delta_z^+$ 和 $\delta_z^-$ 分别为正、负偏移量的辅助变量，均为布尔变量。

综上，无论是主问题还是子问题，皆为混合整数线性规划问题，可以用商业软件进行求解，求解流程图见附录A图A1。

### 4 算例分析

本文采用两个具有源荷不平衡特性的IEEE 33节点系统，验证规划方案的有效性和性能。所提出的规划模型在MATLAB中使用Yalmip进行编译，并采用商业优化软件Gurobi求解，编译环境为英特尔酷睿i7-7700K 4.20 GHz CPU和32 GB RAM。

#### 4.1 规划模型的求解

本文所采用的IEEE 33节点系统的连接方式见附录A图A2。将两个IEEE 33节点系统分别命名为NY与NZ，其额定电压为12.66 kV，电压允许波动范围为0.95~1.05 p.u.，每个子系统的总基础负荷为3.715 MW和2.3 Mvar。系统的基础数据和参数见文献[32]。在系统NY的节点18、22、29上各安装1个WTG，节点9、19、25上各安装1个PVG。在系统NZ的节点18上安装1个WTG，节点6和30上各安装1个PVG。每个子系统的不同节点、相同时段的风机出力和光伏出力相同。采用的基准电价来源于北京市峰谷电价，每个子系统的负荷和电价曲线见附录A图A3。

本文原始场景如附录A图A4所示，通过K-means聚类<sup>[33]</sup>对场景进行削减，得到风电和光伏出力的预测场景。所聚类的场景曲线如附录A图A5所示，其场景概率如附录B表B1所示，规划方案所需的其他参数见表B2。

#### 4.2 规划的结果与分析

为了说明本文所提SOP柔性互联与ESS的协同规划具有最好的经济效益，规划时选取2个SOP、4个ESS并设定以下4种规划方案进行比较。

方案1: NY和NZ的配电网中分别安装2个ESS，其中，待选ESS的节点为整个配电网节点。

方案2: NY和NZ的配电网中规划的2个SOP

的其中一端连接NY配电网,另一端连接NZ配电网,待选安装节点为两个配电网的联络开节点。

方案3:NY和NZ的配电网中分别规划1个SOP和2个ESS,其中,SOP两端连接在同一个配电网。

方案4:NY和NZ的配电网中分别规划2个ESS,同时,待选规划的2个SOP的其中一端连接NY配电网,另一端连接NZ配电网。

方案1至4中规划方案的各项费用如表1所示,得到的规划方案见附录B表B3。从表1可以看出,方案3和4相比于方案2和1,无论是SOP采用双端接入同一个配电网还是两端互联不同配电网,SOP与ESS的联合规划都比其单独规划带来更高的经济效益,这说明了在配电网中协同安装SOP和ESS的经济性。同时,方案1和2仍然存在DSM费用,表明SOP或ESS的单独规划无法解决具有源荷不平衡特性的配电网的能量分配问题,这说明了在配电网中协同安装SOP和ESS的必要性。

表1 不同方案下配电网规划费用  
Table 1 Planning cost of distribution network with various schemes

方案	总成本/ 万元	投资成 本/万元	DSM成 本/万元	运行成本/ 万元	维护成 本/万元
方案1	2 774.4	47.6	92.1	2 630.4	4.36
方案2	2 876.0	8.7	137.7	2 728.8	0.80
方案3	2 766.7	52.6	78.2	2 631.2	4.80
方案4	2 716.0	60.7	0	2 649.8	5.60

方案4在整体上比方案3具有更好的经济效益。虽然方案4的投资成本比方案3高出0.81万元,但是方案4的总费用比方案3减少了50.7万元。方案4所减少的费用源于SOP同时改善了NY和NZ两个系统中的网络潮流,以及将NY系统中多余的DG功率传递给NZ系统。这样,可以实现两个子系统之间功率的自愈,避免了DSM,故管理成本为0。同时,从运行成本的增加也可以证明上述结论的正确性。

图1和图2分别为方案3和方案4的功率平衡示意图。可以看出,在1~7 h期间,风机功率充沛,负荷需求低,且此期间电价为谷电价,无论是方案3还是方案4,ESS在此期间进行充电,为风电的消纳提供空间。随后,在8~11 h时段内,负荷需求上升,同时光伏发电量也增加,方案3和4都成功将光伏发电量顺利消纳,并实现了功率的平衡。

在尖峰负荷期间,方案3无法实现系统内功率平衡,故NZ系统需要进行DSM。相比之下,方案4采用将NY系统中的大量分布式电能传递给NZ系

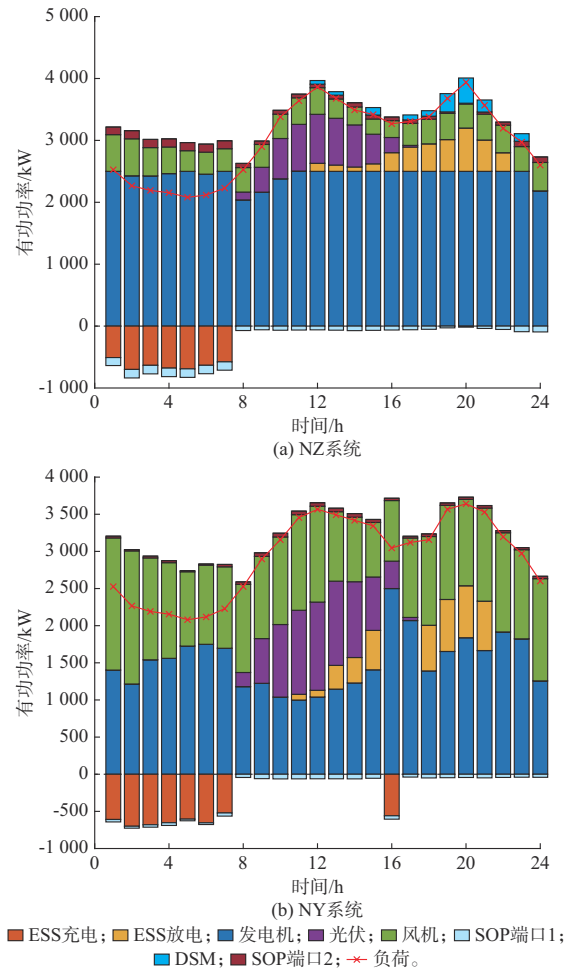


图1 方案3中系统功率平衡情况  
Fig. 1 System power balance situation in scheme 3

统的方式,实现了整体的功率自愈。随后,在负荷需求略微下降、光伏出力也有所下降的情况下,方案3和4的ESS都能够通过出力补充部分能量缺失。但是在某些时段,方案3仍需要进行DSM。例如,在19~21 h的负荷尖峰时段,由于光伏无法为系统供电,导致出现大量能量缺口。这时,方案3和4的ESS进行了大量出力,但方案3仅靠ESS出力无法实现功率平衡。因此,在此期间进行了大量的DSM,导致方案3的经济性下降。

附录A图A6(a)和(b)分别为方案3和4的两个SOP输出的有功和无功功率。可以看出,方案3的SOP主要集中在配电网潮流改善上,特别是无功潮流改善,以促进DG的消纳和发电机功率传输。而方案4的SOP则旨在实现NY和NZ两个配电网的能量平衡,故提升了SOP的安装容量。大容量的SOP不仅可以实现功率传输,还能够充分提供补偿无功功率的能力,从而改善网络中的无功潮流分布。综上所述,方案4较方案3更具优势。

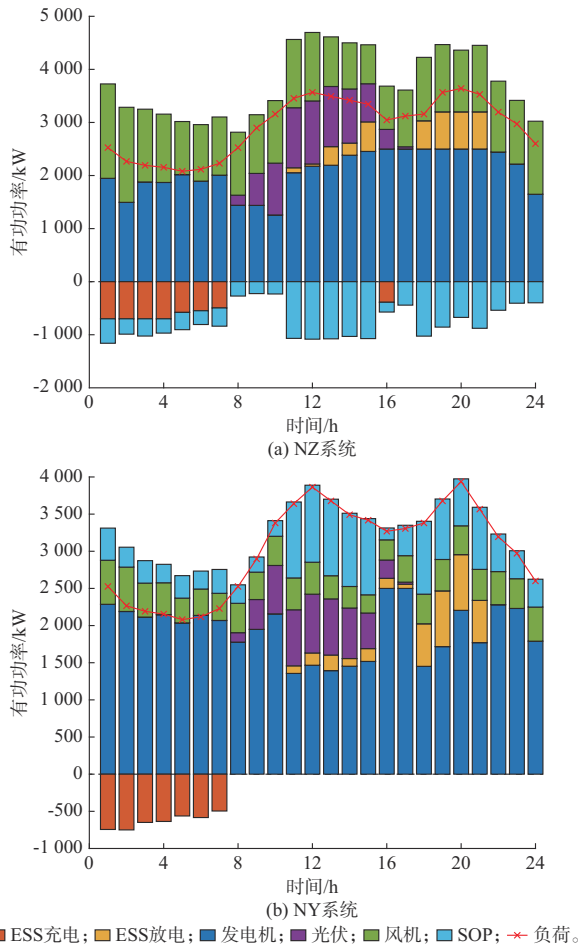


图2 方案4中系统功率平衡情况  
Fig. 2 System power balance situation in scheme 4

### 4.3 多端SOP与双端SOP对比分析

由文献[6]可知,多端SOP可以用更少的换流器实现多条馈线的功率交换。本文进一步选取以下3个方案进行对比分析。

方案5:在规划期间选取1个三端SOP、1个双端SOP、4个ESS,其余要求同方案2。

方案6:在规划期间选取2个三端SOP、4个ESS,其余要求同方案2。

方案7:在规划期间选取2个三端SOP、4个ESS,但设定三端SOP的单位安装费为双端SOP的1.5倍(多出一个换流器价格),其余要求同方案2。

由表2可知,方案5至7都可以对具有源荷不平衡特性的配电网实现均衡馈电,说明了安装多端SOP也能实现配电网供需平衡。同时,方案5的总综合成本最低,原因如下:1)三端SOP可以实现多条馈线的功率调节,故三端SOP能以更小的容量实现对网络能量的灵活控制,从而降低了投资成本;2)三端SOP可以更好地对网络损耗进行改善(方案5的日网络损耗为1 486 kW,方案6的日网络损

耗为1 511 kW,方案7的日网络损耗为1 524 kW),以提升系统的供电能力,从而降低上级电网的出力,进而降低购电成本。对比方案7和4,当考虑三端SOP与双端SOP的单位容量投资成本不同时,方案7较方案4的综合成本增加了3.9万元,三端SOP主要作用是对NY和NZ配电网有功功率平衡进行调节,无法提供合适的无功能量,不能充分实现其潮流灵活可控的能力,导致其日网络损耗上升,降低了系统供电能力,这表明三端SOP所带来的多馈线的功率交换优势被高昂的投资成本所掩盖。综上所述,当投资成本相同时,三端SOP可在调节两个配电网能量分布的同时,更好地调节配电网潮流分布,提升整个系统的经济性。

表2 不同方案下的规划结果  
Table 2 Planning results of various schemes

方案	总成本/ 万元	投资成 本/万元	DSM成 本/万元	运行成本/ 万元	维护成 本/万元
方案5	2 708.2	59.5	0	2 643.2	5.5
方案6	2 704.5	58.9	0	2 640.2	5.4
方案7	2 720.1	60.2	0	2 653.4	5.5

为了更全面地探究三端与双端SOP所带来的经济效益,本文设计了14个方案,相应的SOP单位容量投资成本分别为1 050、1 100、1 110、1 120、1 130、1 140、1 150、1 200、1 250、1 300、1 350、1 400、1 450、1 500元/(kV·A)。图3展示了上述14个方案的三端SOP单位投资成本对年综合规划成本的影响。可以看出,综合规划成本总体呈上升趋势,但并不完全呈线性关系。当三端SOP单位容量投资成本低于1 120元/(kV·A)时,三端SOP比双端SOP拥有更好的经济效益。因此,在实际工程中,三端和双端SOP的优劣还需进一步商榷。

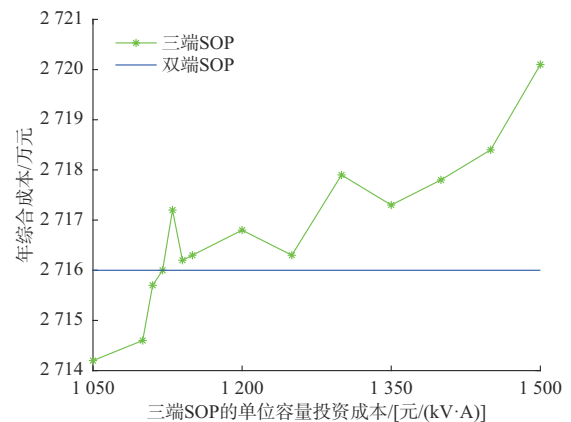


图3 三端SOP单位投资成本对总成本的影响曲线  
Fig. 3 Influence curve of three-terminal SOP unit investment costs on total costs

#### 4.4 不同置信区间下的结果对比及 C&CG 算法有效性分析

为了研究不同置信区间的年综合运行成本的变化情况,本节以方案4为基础条件,对综合范数的置信系数 $\alpha_1$ 和 $\alpha_\infty$ 进行调整,所得到的年综合成本如附录B表B4所示。由表B4可知,随着 $\alpha_1$ 和 $\alpha_\infty$ 的增加,系统的年综合运行成本随之增加,这是因为 $\alpha_1$ 和 $\alpha_\infty$ 的增加导致置信区间的扩大,进而导致DG出力处于最恶劣的情况增加,使得NY和NZ系统需要从上级电网调度更多的能量以实现功率的平衡,增加了从上级电网购电的成本,从而使总成本增加。

本文选用方案2的算例对C&CG算法的可行性和有效性进行验证。其中,文献[34]对C&CG算法的最优性和可行性进行了证明。附录A图A7显示了C&CG算法的迭代情况。可以看到,在第3次迭代中上、下界收敛,验证了C&CG算法的有效性。

## 5 结语

本文提出了考虑具有源荷不平衡特性的ADN对SOP和ESS设备的协同规划。首先,建立了以年综合成本最低为目标的规划模型,采用大M法和SOCP技术将原来的混合整数非线性非凸模型转化为MISOCP模型;然后,采用1-范数和 $\infty$ -范数描述DG不确定集,以构建两阶段分布鲁棒模型;最后,采用两个IEEE 33节点系统算例进行分析,得到如下结论:

1)本文所采用的SOP连接方案可以充分利用SOP灵活调控功率的能力,实现两个配电网的能量供需平衡,同时改善了两个配电网的有功和无功潮流分布,提升了系统的供电能力,提高了ADN的运行灵活性。

2)本文对比了三端和双端SOP在具有源荷不平衡特性的配电网中的优劣性,三端和双端SOP都可以实现系统的能量平衡,且当三端SOP单位容量投资成本低于1 120元/(kV·A)时,因其多馈线供电能力,降低了网络损耗,提升了系统的经济性。但随着成本的增加,其优势逐渐被高昂的投资费用所掩盖。

3)本文考虑了置信度对年综合成本的影响。随着置信度的增加,DG出力处于恶劣情况的概率增加,系统趋于“保守”,使得系统向上级电网购电成本增加,以实现能量的平衡。

本文研究可以为源荷不平衡的配电网中SOP和ESS的规划提供一定参考,但没有给出明确的源荷不平衡定义。此外,本文仅采用两个节点相同的配电网进行算例分析,限制了SOP在实际应用中的

推广。后续将致力于构建源荷不平衡指标,并深入研究规划节点不同的大规模配电网所引起的混合整数问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 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] LIU Z, MILANOVIĆ J V. Probabilistic estimation of voltage unbalance in MV distribution networks with unbalanced load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 693-703.
- [3] BAZRAFESHAN 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] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [5] 池源,郭莹霏,孟庆昊,等.主动配电网储能应用新形态:虚拟配电变压器与馈线[J].电力系统自动化,2023,47(12):163-175.  
CHI Yuan, GUO Yingfei, MENG Qinghao, et al. New form of energy storage application in active distribution network: virtual distribution transformers and feeders [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 163-175.
- [6] 王成山,宋关羽,李鹏,等.基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J].电力系统自动化,2016,40(22):168-175.  
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [7] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等.基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J].电网技术,2014,38(12):3405-3411.  
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [8] 杨炼,范春菊,郇能灵,等.基于继电保护与改进算法的储能电站选址定容[J].电工技术学报,2015,30(3):53-60.  
YANG Lian, FAN Chunju, TAN Nengling, et al. Energy storage station locating and sizing based on relay protection and improved algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 53-60.
- [9] NICK M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating



- direction method of multipliers [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 72: 33-39.
- [10] 安东, 杨德宇, 武文丽, 等. 基于改进多目标蜉蝣算法的配网电池储能系统最优选址定容[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(10): 31-39.
- AN Dong, YANG Deyu, WU Wenli, et al. Optimal location and sizing of battery energy storage systems in a distribution network based on a modified multi-objective mayfly algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(10): 31-39.
- [11] 胡迪, 丁明, 毕锐, 等. 基于集群划分的网-源-储多目标两步规划[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 95-104.
- HU Di, DING Ming, BI Rui, et al. Two-step planning of grid-resource-storage based on cluster partition [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 95-104.
- [12] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(20): 23-32.
- CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(20): 23-32.
- [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): 1889-1897.
- 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): 1889-1897.
- [14] 熊正勇, 陈天华, 杜磊, 等. 基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 129-137.
- XIONG Zhengyong, CHEN Tianhua, DU Lei, et al. Optimal allocation of soft open point in active distribution network based on improved sensitivity analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 129-137.
- [15] 张孝军, 林湘宇, 吴宇奇, 等. 兼顾微配网运行经济性与可靠性的智能软开关选址优化[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 138-145.
- ZHANG Xiaojun, LIN Xiangning, WU Yuqi, et al. Sitting optimization of soft open point considering operation economy and reliability of micro-distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 138-145.
- [16] 郑焕坤, 石甜静. 基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 117-123.
- ZHENG Huankun, SHI Tianjing. Bi-level optimization of distribution network based on soft open point and reactive power compensation device [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 117-123.
- [17] BAGHBAN-NOVIN S, HAMIDI A, GOLSHANNAVAZ S, et al. E-SOP's contribution in a techno-economic and clean operation of distribution networks: a multi-objective optimization approach based on linear models [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(2): e12235.
- [18] 于文山, 黎明, 由蕤. 含储能的三端SOP对主动配电网的潮流优化研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(3): 101-110.
- YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui. Power flow optimization study on active distribution network based on three-terminal sop with energy storage system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 101-110.
- [19] BAI L Q, JIANG T, LI F X, et al. Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1082-1091.
- [20] 黄志强, 陈业伟, 毛志鹏, 等. 柔性多状态开关与分布式储能系统联合接入规划[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(14): 29-37.
- HUANG Zhiqiang, CHEN Yewei, MAO Zhipeng, et al. Joint access planning of soft open point and distributed energy storage system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(14): 29-37.
- [21] PAMSHETTI V B, SINGH S P. Coordinated allocation of BESS and SOP in high PV penetrated distribution network incorporating DR and CVR schemes [J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(1): 420-430.
- [22] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中DG、SOP与ESS的两阶段协调规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 71-82.
- WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 71-82.
- [23] JIA Y X, LI Q, LIAO X, et al. Research on the access planning of SOP and ESS in distribution network based on SOCP-SSGA [J]. *Processes*, 2023, 11(6): 1844.
- [24] 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.
- [25] ZENG B, ZHANG J H, YANG X, et al. Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1153-1165.
- [26] NICK M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [27] PARK H, BALDICK R. Stochastic generation capacity expansion planning reducing greenhouse gas emissions [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(2): 1026-1034.
- [28] 石锦凯, 鲍彦, 陈振, 等. 计及充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(20): 49-58.
- SHI Jinkai, BAO Yan, CHEN Zhen, et al. Robust optimization configuration method of energy storage for charging

- stations considering charging load uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 49-58.
- [29] LIU H, LI J K, ZHANG S D, et al. Distributionally robust co-optimization of the demand-side resources and soft open points allocation for the high penetration of renewable energy[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(4): 713-725.
- [30] 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.
- [31] 高海淑, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 32-41.  
GAO Haishu, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Scenario clustering based distributionally robust comprehensive optimization of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 32-41.
- [32] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [33] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.  
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [34] ZENG B, ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method [J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.

王 鹏(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:配电网运行与规划、综合能源规划等。E-mail:wangpeng1@bjtu.edu.cn

李华伟(1970—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统仿真与控制技术。E-mail:hwli@bjtu.edu.cn

张 沛(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统调度运行、电力系统规划、新能源预测与消纳。E-mail:peizhang166@qq.com

(编辑 王梦岩)

## Joint Planning of Soft Open Point and Energy Storage in Distribution Networks with Source-Load Imbalance Characteristics

WANG Peng<sup>1</sup>, LI Huawei<sup>1</sup>, ZHANG Pei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education on Smart Power grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The wide application of flexible interconnection devices makes the operation of active distribution networks more controllable and flexible. This paper proposes a cooperative planning scheme of soft open points and energy storage devices for balancing the energy distribution in distribution networks with source-load imbalance characteristics in order to improve the economy and reliability of distribution networks. First, considering that the distributed generator output has uncertainty, the K-means method is used to construct a typical-day scenario, based on which a cooperative planning model is established with the minimum annual comprehensive cost as the objective function. Then, the original nonlinear nonconvex model is transformed into a mixed-integer second-order cone planning model by the big-M method and second-order cone relaxation techniques, and a two-stage distributionally robust model with integrated paradigms is used to find the planning scheme that can obtain the lowest operating cost under the probability distribution in the worst scenario in order to improve the robustness of the planning model. Finally, the feasibility of the proposed planning model is verified through the case with two source-load imbalanced IEEE 33-bus active distribution networks.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB1200802) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. E17JB00020).

**Key words:** soft open point; energy storage; distribution network; imbalance; planning; flexible interconnection

