

# 新能源消纳与用户侧响应主从博弈的 配电网智能软开关选址策略

陈骁龙, 孙嘉, 张俊林, 倪良华, 吕干云  
(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:**分布式电源接入配电网后,配电网调控能力不足导致新能源消纳水平低、用户支出经济性指标差,提出一种新能源就地消纳和用户支出主从博弈的配电网智能软开关选址策略的嵌套模型和方法。外层建立以新能源渗透率最大、电能质量指标最佳且计及传统调控手段的模型结构;内层考虑新能源用户消纳的分时电价、储能装置充放电成本和日运行费用因素,构建能满足用户支出成本最低的需求响应模型。调用CPLEX求解器求解混合整数非线性规划模型,用户侧与配电网侧模型通过反复博弈优化决策变量,主从博弈内层优化采用改进粒子群优化算法加快收敛速度。以改进的IEEE 33节点系统为算例进行分析,验证了所提智能软开关选址策略的有效性。

**关键词:**主从博弈;智能软开关选址策略;新能源渗透率;需求响应;新能源消纳

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202307013

## 0 引言

随着新型能源体系建设步伐的加速,以风能、太阳能为代表的清洁可再生能源得以不断接入和利用<sup>[1]</sup>。新能源接入配电网造成了严重的潮流逆送、电压越限等问题。智能软开关(soft open point, SOP)接入配电网采用闭环方式运行,能够有效地提升新能源在配电网中的消纳能力<sup>[2-4]</sup>。目前对于SOP有效提升新能源消纳能力有一些针对性的研究措施<sup>[5-6]</sup>,由于SOP建造和运行维护费用较高,而且效益比会随着配电网中SOP安装容量和位置的不同而变化,因此配电网中SOP的选址研究尤为重要<sup>[7]</sup>。

文献[8]从SOP配置角度出发,考虑风光不确定性基于Wasserstein距离最优场景生成技术,有效解决了求解规模大等问题,并建立了SOP选址定容双层规划模型,通过混合优化算法对SOP合理规划进行求解,求解速度快,收敛精度高。不足之处在于当场景数目较多、网络规模较大时,求解耗时会大幅增加。文献[9]基于SOP的规划问题,引入传统配电网调控手段建立了三层模型,以加权功率传输分布系数指标和网损微增率指标共同进行辅助决策,提高了求解效率。但由于传统调控手段与SOP设备接入需做到相互配合,增加了问题求解的复杂性。文献

[10]根据分布式电源(distributed generation, DG)和负荷的波动性,建立了一种基于随机场景的SOP选址优化模型,通过改进微分进化求解算法求解,有较好的收敛性。但是模型求解复杂度较高,耗时较长。文献[11]结合图论将传统配电网抽象为网络拓扑结构图,分析了SOP多种场景下接入位置的构造规律,验证了SOP在提升消纳能力和改善电能质量方面的优越性。但只考虑了配电网侧的影响,并未考虑用户端支出成本。

目前针对SOP选址问题的研究大多从电网运行的角度出发,很少考虑用户侧对SOP选址带来的影响,用户侧通过安装的储能装置(energy storage system, ESS)低储高放,可以有效提升新能源消纳能力,对SOP的选址产生一定影响。本文提出一种以配电网侧为主体、负荷侧为从体的主从博弈SOP选址模型。首先,构建用户侧与配电网侧进行博弈的策略空间,分层逐步优化用户侧的自身满意度目标函数;其次,配电网侧根据用户侧的应对策略,以自身新能源渗透率最大和电能质量最佳为目标对自身策略空间进行进一步优化,将博弈策略组合结果通过粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)和CPLEX求解器得出SOP选址均衡解;最后,根据新能源渗透率和用户支出成本确定SOP最佳选址方案,以改进的IEEE 33节点系统仿真算例对策略的可行性进行验证。

## 1 主从博弈SOP优化选址模型

本文基于主从博弈理论<sup>[12-14]</sup>,建立以配电网侧为主体、用户侧为从体的主从博弈SOP优化选址模型,主从博弈框图如图1所示。图中:OLTC表示有

收稿日期:2023-02-02;修回日期:2023-06-30

在线出版日期:2023-07-20

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(19KJA510012);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22\_1085)

Project supported by the Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions(19KJA510012) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province(SJCX22\_1085)

载调压变压器(on-load tap changer, OLTC); SVC表示静止无功补偿器(static var compensator, SVC); CB表示电容器组(capacitor bank, CB)。

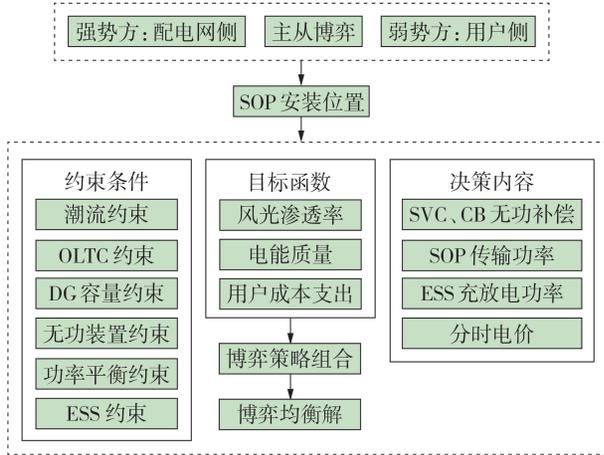


图1 主从博弈框图

Fig.1 Block diagram of Stackelberg game

结合用户负荷特性将ESS作为用户成本支出的一部分,考虑价格型需求响应的不确定性结合风光出力情况制定初始调度计划,并依次计算此时风光渗透率,如果风光渗透率情况不理想,则进一步优化分时电价使用户支出成本发生改变,通过ESS低储高放,改变负荷大小,在提升新能源消纳率的同时降低用户支出成本。

SOP作为可控型电力电子器件<sup>[15-17]</sup>,主要作用是灵活控制有功功率传输并提供必要的无功支撑。SOP接入位置如图2所示。本文以背靠背电压源型变流器的SOP为例,SOP的变流器分别对功率传输和直流电压进行控制,其中SOP的控制变量为变流器有功功率和无功功率。由于中间直流环节的隔离使2台变流器输出的无功功率互不影响,因此只需对变流器内部容量进行约束。

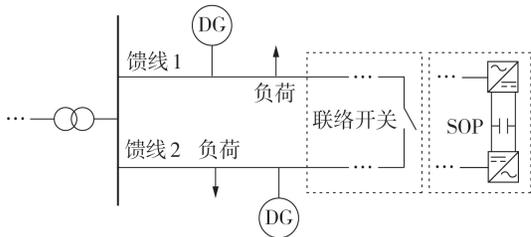


图2 SOP接入位置

Fig.2 Access position of SOP

## 1.1 强势方配电网侧

### 1.1.1 目标函数与决策变量

本文以1d为一个优化周期,建立全天配电网风光渗透率最高及电能质量最优的双目标函数,其数学表达式为:

$$f_1 = \max \eta \quad (1)$$

$$f_2 = \min \varepsilon \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为风光渗透率指标; $\varepsilon$ 为电能质量指标。 $\eta$ 和 $\varepsilon$ 表达式分别为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{N_{DC}} \int_0^{24} P_{PV(WT),i,t} dt}{\sum_{i=1}^{N_{load}} \int_0^{24} P_{L,i,t} dt} \quad (3)$$

$$\varepsilon = D(V) = E(V^2) - E^2(V) \quad (4)$$

式中: $N_{DC}$ 为风光源接入节点总数; $P_{PV(WT),i,t}$ 为光伏(风电)接入节点*i*在*t*时段的出力; $N_{load}$ 为负荷节点总数; $P_{L,i,t}$ 为*t*时段节点*i*的负荷; $D(V)$ 为电压*V*方差; $E(V^2)$ 和 $E^2(V)$ 分别为电压平方的期望和电压期望的平方。模型中将支路的功率、电压作为决策变量。

### 1.1.2 约束条件与控制变量

#### 1) 节点电压和支路电流约束。

节点电压和支路电流约束分别为:

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (5)$$

$$I_{\min} \leq I_{ij,t} \leq I_{\max} \quad (6)$$

式中: $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 分别为节点电压运行上、下限; $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为支路电流上、下限; $U_{i,t}$ 、 $I_{ij,t}$ 分别*t*时段节点*i*的电压值和支路*ij*电流值。

不含发电机、DG、SVC、CB的支路潮流约束为:

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t}^S + x_{ij} Q_{ij,t}^S) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \quad (7)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_1} (P_{ij,t}^S - r_{ij} I_{ij,t}^2) + P_{j,t} = \sum_{jm \in \Omega_1} P_{jm,t} + \sum_{jm \in \Omega_2} \sigma_j P_{jm,t} + P_{j,t}^{\text{Load}} \quad (8)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_1} (Q_{ij,t}^S - x_{ij} I_{ij,t}^2) + Q_{j,t} = \sum_{jm \in \Omega_1} Q_{jm,t} + \sum_{jm \in \Omega_2} \sigma_j Q_{jm,t} + Q_{j,t}^{\text{Load}} \quad (9)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{(P_{ij,t}^S)^2 + (Q_{ij,t}^S)^2}{U_{i,t}^2} \quad ij \in \Omega_1 \quad (10)$$

$$\sigma_j = \begin{cases} 0 & \text{节点 } j \text{ 接入联络开关} \\ 1 & \text{节点 } j \text{ 不接入联络开关} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为*t*时段节点*j*的有功、无功注入功率; $P_{ij,t}^S$ 、 $Q_{ij,t}^S$ 分别为*t*时段支路*ij*的首端有功、无功功率; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 分别为支路*ij*的电阻、电抗; $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 分别为支路集合和含联络开关支路集合; $\sigma_j$ 为节点*j*接入联络开关状态量; $P_{jm,t}$ 、 $Q_{jm,t}$ 分别为*t*时段支路*jm*的有功、无功功率; $P_{j,t}^{\text{Load}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{Load}}$ 分别*t*时段节点*j*所接负荷消耗的有功、无功功率。

含发电机组、DG、SVC、CB的支路潮流约束为:

$$P_{j,t} = \sum_{j \in \Omega_c} P_{j,t}^G + \sum_{j \in \Omega_{DC}} P_{j,t}^{DG} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} \psi_j P_{j,t}^{SOP} \quad (12)$$

$$Q_{j,t} = \sum_{j \in \Omega_c} Q_{j,t}^G + \sum_{j \in \Omega_{DC}} Q_{j,t}^{DG} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} \psi_j Q_{j,t}^{SOP} + \sum_{j \in \Omega_{SVC}} Q_{j,t}^{SVC} + \sum_{j \in \Omega_{CB}} Q_{j,t}^{CB} \quad (13)$$

$$\psi_j = \begin{cases} 0 & \text{节点 } j \text{ 接入 SOP} \\ 1 & \text{节点 } j \text{ 不接入 SOP} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{j,t}^C$ 、 $P_{j,t}^{DC}$  分别为发电机组和 DG 在  $t$  时段节点  $j$  处的实际有功出力;  $Q_{j,t}^C$ 、 $Q_{j,t}^{DC}$  分别为发电机组和 DG 在  $t$  时段节点  $j$  处的实际无功出力;  $Q_{j,t}^{SVC}$ 、 $Q_{j,t}^{CB}$  分别为 SVC、CB 在  $t$  时段节点  $j$  处的无功补偿量;  $\Omega_G$ 、 $\Omega_{DG}$ 、 $\Omega_{SOP}$ 、 $\Omega_{SVC}$ 、 $\Omega_{CB}$  分别为接入发电机组、DG、SOP、SVC、CB 的节点集合;  $\psi_j$  为节点  $j$  接入 SOP 状态量;  $P_{j,t}^{SOP}$ 、 $Q_{j,t}^{SOP}$  分别为 SOP 的变流器在  $t$  时段节点  $j$  的有功、无功功率。

2) SOP 约束。

SOP 有功功率约束为:

$$P_{i,t}^{SOP} + P_{i,t}^{SOP,L} + P_{j,t}^{SOP} + P_{j,t}^{SOP,L} = 0 \quad (15)$$

$$P_{i,t}^{SOP,L} = \alpha_i^{SOP} \sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \quad (16)$$

$$P_{j,t}^{SOP,L} = \alpha_j^{SOP} \sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \quad (17)$$

SOP 无功功率约束为:

$$-\beta_i S_{i,t}^{SOP} \leq Q_{i,t}^{SOP} \leq \beta_i S_{i,t}^{SOP} \quad (18)$$

$$-\beta_j S_{j,t}^{SOP} \leq Q_{j,t}^{SOP} \leq \beta_j S_{j,t}^{SOP} \quad (19)$$

SOP 容量约束为:

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

$$\sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \leq S_j^{SOP} \quad (21)$$

式中:  $P_{i,t}^{SOP}$ 、 $Q_{i,t}^{SOP}$  分别为 SOP 的变流器在  $t$  时段节点  $i$  的有功、无功功率;  $S_i^{SOP}$ 、 $S_j^{SOP}$  及  $P_{i,t}^{SOP,L}$ 、 $P_{j,t}^{SOP,L}$  分别为 SOP 的变流器在  $t$  时段节点  $i$ 、 $j$  的安装容量及传输损耗; 由于损耗不可忽略,  $\alpha_i^{SOP}$ 、 $\alpha_j^{SOP}$  分别为 SOP 变流器在节点  $i$ 、 $j$  处的损耗系数;  $\beta_i$ 、 $\beta_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的无功功率约束系数。

3) 其他约束。

配电网中传统调控手段包含 OLTC 调节, OLTC 主要用于电压调整, 当电压波动超过一定值时, 增加 OLTC 进行调节以保证电压稳定, 具体表达式见附录 A 式(A1)、(A2); 无功装置包含进行离散无功补偿的 CB 和进行连续无功调节的 SVC, 具体表达式见附录 A 式(A3)–(A6); 有功调节主要以 ESS 和 DG 自身调节为主, 具体表达式分别见附录 A 式(A7)–(A11)和式(A12)、(A13)。

根据以上调节措施构建系统潮流的约束条件。将 OLTC 档位选择、无功补偿装置补偿容量、ESS 容量和 SOP 的有功功率、无功功率作为控制变量。

## 1.2 弱势方用户侧

将用户侧定义为主从博弈模型的从体部分。用户侧接收配电网侧更新的分时电价, 进行用电量调整, 减少用户支出成本。此外由于用户端装备了 ESS, 通过 ESS 的充、放电特性削峰填谷, 从而进一步增加风光出力的消纳, 同时由于风光电价与发电机组电价的不同进而反馈到配电网端, 重新计算风光

渗透率, 通过反复循环, 不仅可以减少用户支出成本, 还能够有效提升 DG 的渗透率。

用户的用电量会因多种因素作用发生变化, 其中价格波动的影响最大, 价格和用电量两者的波动关系如图 3 所示。引入价格需求弹性系数  $\kappa_{t_1, t_2}$  如式(22)所示, 构建价格需求弹性系数矩阵  $H$  如式(23)所示。价格需求弹性系数分为自弹性系数和交叉弹性系数, 分别表示同一时间下用电量和价格的关系以及不同时间下用电量和价格的关系<sup>[18-19]</sup>。

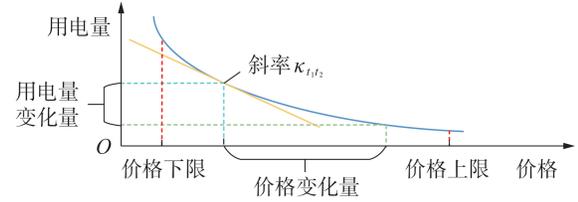


图3 价格需求弹性系数

Fig.3 Elasticity coefficient of price demand

$$\kappa_{t_1, t_2} = \frac{E_b(t_1) - E_f(t_1)}{E_f(t_1)} \cdot \frac{C_b(t_2) - C_f(t_2)}{C_f(t_2)} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} E_b(1) \\ \vdots \\ E_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_f(1) \\ \vdots \\ E_f(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_f(1) & & \\ & \ddots & \\ & & E_f(t) \end{bmatrix} \times$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{C_b(1) - C_f(1)}{C_f(1)} \\ \vdots \\ \frac{C_b(t) - C_f(t)}{C_f(t)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中:  $E_f(t_1)$ 、 $E_b(t_1)$  分别为采用分时电价前、后  $t_1$  时段用电量, 单位为  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $C_f(t_2)$ 、 $C_b(t_2)$  分别为采用分时电价前、后  $t_2$  时段用电价格, 单位为元 / ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ); 矩阵  $H$  由价格需求弹性系数  $\kappa_{t_1, t_2}$  构成。

## 1.3 主从博弈模型结构

将强势方配电网侧作为博弈主体, 弱势方用户侧作为博弈从体, 用户侧采用分时电价会对配电网侧新能源渗透率产生影响, 一方面分时电价会使用户侧用电量发生变化, 另一方面, 用户侧 ESS 采用低储高放策略, 使配电网的出力随之变化, 因此在此基础上对式(3)进行变换, 新能源渗透率模型  $f_1$  和用户侧满意度  $S$  联合构成强势方配电网侧目标函数。  $f_1$  和  $S$  表达式分别为:

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{DG}} \int_0^{24} P_{PV(WT), i, t} dt}{\sum_{i=1}^{N_{load}} \int_0^{24} P_{L, i, t} dt} - S \quad (24)$$

$$S = \sum_{t=1}^{24} \frac{E_b(t)}{E_f(t)} \frac{C_f(t)}{C_b(t)} \quad (25)$$

相较于采用分时电价前,采用分时电价后的用电量较大,用户支出成本较小,此时用户满意度高。由于主从博弈弱势方跟随强势方,分时电价变化后,将对用户侧各部分支出产生影响,用户满意度也随之变化,具体的用户支出如下:

$$f_3 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + S \quad (26)$$

$$C_1 = \sum_{t=1}^{24} P_{pv} z_{1,t} + \sum_{t=1}^{24} P_{wt} z_{2,t} + \sum_{t=1}^{24} (P_{total} - P_{pv} - P_{wt}) C_t \quad (27)$$

$$C_2 = \sum_{i \in \Omega_{ESS}} \frac{(k_a P_{e,i} + k_b E_{e,i}) r (1+r)^l}{8760 [(1+r)^l - 1]} T \quad (28)$$

$$C_3 = \sum_{i \in \Omega_{ESS}} \int_0^T (k_c |P_i^{\text{discharge}}(t) - P_i^{\text{charge}}(t-1)|) dt \quad (29)$$

$$C_4 = \sum_{i \in \Omega_{ESS}} (P_i^{\text{discharge}} - P_i^{\text{charge}}) C_i \quad (30)$$

式中: $C_1$ 为用户支出成本,风电、光伏、发电机组出力的价格不同,对应的总用户支出成本不同; $z_{1,t}$ 、 $z_{2,t}$ 分别为 $t$ 时段光伏、风电电价; $C_t$ 为采用分时电价后 $t$ 时段的实时电价; $C_2$ 、 $C_3$ 分别为ESS的日投资和日运行费用; $C_4$ 为ESS在充电和放电时的成本支出差; $P_{pv}$ 、 $P_{wt}$ 、 $P_{total}$ 分别为光伏、风电、包含风光总发电下所对应的用电量; $k_a$ 、 $k_b$ 、 $k_c$ 分别为ESS功率成本系数、能量成本系数、运行管理成本系数, $k_a$ 、 $k_b$ 、 $k_c$ 值分别取1550元/kW、1190元/(kW·h)、0.55; $P_{e,i}$ 、 $E_{e,i}$ 分别为节点 $i$ 的ESS额定功率和额定容量; $r$ 和 $l$ 分别为ESS的贴现率和使用年限; $P_i^{\text{charge}}$ 、 $P_i^{\text{discharge}}$ 分别为节点 $i$ 处ESS的充、放电功率; $\Omega_{ESS}$ 为包含ESS的节点集合; $T$ 为1个调度周期。

## 2 模型的求解

配电网侧潮流计算中含二次项和整数项,无法通过线性规划直接求解,需要将混合整数非线性规划问题先转换为二阶锥规划问题再进行求解,具体过程见附录B式(B1)~(B5)。

本文建立的模型为混合整数非线性规划模型,通过二阶锥规划和非线性规划2种方式求解该模型。采取二阶锥松弛线性化处理、整数变量转换等手段来优化模型结构。首先,设置基本参数,主要包含配电网拓扑结构、支路阻抗、CB、DG、SVC等参数;其次,设置时段约束,包括DG、CB、SVC出力、电压和电流的二次项及支路传输功率;最后,基于MATLAB平台,使用YALMIP工具包建模后,调用CPLEX求解器对模型进行求解。

基于主从博弈的SOP优化选址模型,可以从配电网侧和用户侧两部分进行求解。博弈模型中以内外层嵌套的方式进行空间划分,内、外层分别作为用户方策略空间和配电网策略空间,如附录C图C1所示。多次迭代计算后得内、外层策略空间组合。

内、外层策略空间组合求解过程中,首先将用户

支出成本和配电网侧新能源渗透率作为目标函数,主从博弈在计算时通过初始变量由改进PSO得到强势方与弱势方策略空间第1次的内、外层优化策略空间集合,此时得到的新集合即为第2次迭代所需策略集合。

对上述策略集使用改进PSO求解。公式如下:

$$\mathbf{v}_{\chi,d}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{\chi,d}^k + c_1 r_1 (\mathbf{P}_{\chi,d} - \mathbf{x}_{\chi,d}) + c_2 r_2 (\mathbf{G}_{\chi,d} - \mathbf{x}_{\chi,d}) \quad (31)$$

$$\mathbf{x}_{\chi,d}^{k+1} = \mathbf{x}_{\chi,d}^k + \mathbf{v}_{\chi,d}^k \quad (32)$$

式中: $\omega$ 为惯性权重; $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子; $r_1$ 、 $r_2$ 为 $[0,1]$ 中的随机数; $k$ 为迭代次数; $\mathbf{v}_{\chi,d}^{k+1}$ 、 $\mathbf{v}_{\chi,d}^k$ 分别为粒子 $\chi$ 在第 $k+1$ 、 $k$ 次迭代的 $d$ 维速度向量; $\mathbf{x}_{\chi,d}^{k+1}$ 、 $\mathbf{x}_{\chi,d}^k$ 分别为粒子 $\chi$ 在第 $k+1$ 、 $k$ 次迭代的 $d$ 维位置向量; $\mathbf{P}_{\chi,d}$ 、 $\mathbf{G}_{\chi,d}$ 分别为在粒子 $\chi$ 处的 $d$ 维个体极值和群体极值向量。

PSO在极值迭代过程中更新当前最优解,并与历史最优解进行对比,有效地控制每个粒子的速度与位置。传统PSO存在搜索精度不高、容易陷入局部最优等缺点,因此作了以下两方面改进。

1)均匀化步长构建初始解。提出一种均匀化步长策略,将步长进行均匀划分,得一组均匀解,与随机解构成新的初始解,保持解的多样性。

2)增减变量搜索。迭代得到粒子的当前最优解,不急于更新粒子的速度和位置,而是分别对粒子个体最优解的某一维数据取一定数值的增量或减量进行搜索,获得此时适应度最小值,与粒子当前解比较,记录下最优解,提高每次迭代收敛速度与精度。

由强势方新能源渗透率对应求解得到的风光出力及负荷作为初始粒子,种群规模设置为10,根据主从博弈SOP优化选址模型,分别运行改进前、后的PSO进行求解,粒子数设为10,最大迭代次数设为100。收敛情况如图4所示。可以看出改进PSO的迭代次数减少且收敛速度变快。

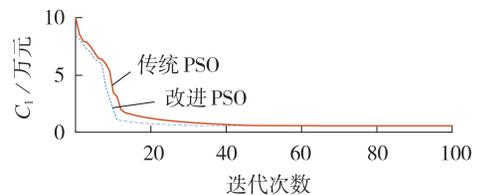


图4 传统PSO与改进PSO迭代对比

Fig.4 Comparison of traditional PSO and improved PSO iterations

## 3 算例分析

### 3.1 算例系统

本文在IEEE 33节点系统中增设含联络开关(或SOP)支路,对提出的主从博弈SOP优化选址模型及方法进行验证分析。节点33为平衡节点,基准电压为12.66 kV,基准容量为1 MV·A,负荷容量为5.08+j2.55 MV·A,SOP容量为1000 kV·A。改进

后的 IEEE 33 节点系统包括 32 条支路和 5 条联络开关备选支路,如附录 C 图 C2 所示。图中:含联络开关的支路分别为支路 11-21、24-28、7-20、8-14、17-32,后文中分别简述为支路 A—E。在特定位置安装 DG、SVC、CB 和 ESS,具体相关参数见附录 C 表 C1—C3 所示。

考虑到 SOP 安装位置的局限性,SOP 的安装位置选择在含联络开关支路处(替换后的支路在后文中以支路 a—e 简述表示),通过主从博弈选址模型对安装的位置进行优化选择。设置以下 7 种 SOP 安装模式进行对比:①无 SOP;②单 SOP,在含联络开关支路中安装 1 组 SOP;③双 SOP,在 2 条含联络开关支路中各安装 1 组 SOP;④混合安装,在 2 条含联络开关支路中分别安装 1 组 SOP 和联络开关;⑤当 DG 装机容量占比增大时,对比无 SOP、单 SOP、双 SOP 以及混合安装模式;⑥考虑季节特性 DG 出力波动时,对比无 SOP、单 SOP、双 SOP 以及混合安装模式;⑦考虑 SOP 容量变化时,对比无 SOP、单 SOP、双 SOP 以及混合安装模式。

### 3.2 仿真结果

从新能源渗透率和用户支出成本的角度,根据所建主从博弈模型,对 SOP 安装位置进行最优选择,得到各安装方案下对应的新能源渗透率和用户支出成本。

无 SOP、在含联络开关支路中安装单 SOP(表中以 a—e 形式表示)以及在 2 条含联络开关支路中安装双 SOP(表中以(a,b)等形式表示)的系统评估指标对比结果如附录 C 表 C4 所示。由表可知:不同 SOP 安装模式对 DG 消纳和用户支出成本都有一定影响;在单支路安装 SOP 方案中,在支路 c 安装 SOP 时,可以保证风光渗透率(31.53%)最大且用户支出成本(0.5493 万元)最低,与无 SOP 时相比,渗透率提升了 1.46%,用户总支出减少了 0.015 万元,有效提升了风光消纳和用户侧满意度;当安装 2 组 SOP 时可看到在支路 a、c 安装 SOP 能获得最大风光渗透率(30.81%),此时用户支出成本(0.5573 万元)最低,与无 SOP 时相比,风光渗透率提升了 0.74%,用户支出成本减少了 0.0071 万元。

任选 2 条支路分别连接 SOP 和联络开关得到的系统评估指标对比结果如附录 C 表 C5 所示(表中(a,B)表示在支路 a 中安装 SOP、在支路 B 中安装联络开关,其余表示形式类似)。由表可知:混合安装模式(c,A)下,风光渗透率(31.36%)最大,用户支出成本(0.5558 万元)最低,并且此时电能质量相对较好,相较于无 SOP 时,渗透率提升了 1.2%,用户支出成本减少了 0.0067 万元。

下面考虑 DG 的装机容量增大以及考虑季节特性 DG 出力波动是否对 SOP 位置选择产生影响,分析如下:

1)当 DG 装机容量占比分别提升至 40% 和 50% 时,对比无 SOP、单 SOP、双 SOP 以及混合安装模式时风光渗透率最佳和用户支出成本最低对应的情况,具体如附录 D 表 D1 所示;

2)当考虑季节特性 DG 出力波动时,对比无 SOP、单 SOP、双 SOP 以及混合安装模式时风光渗透率最佳和用户支出成本最低的情况,具体如附录 D 表 D2 所示。

由表 D1 数据结果可知:当 DG 装机容量占比达到 40% 时,与无 SOP 相比,单 SOP 安装模式下风光渗透率提升了 1.77%,并且提升显著的是支路 a 安装 SOP,风光渗透率达到了 41.39%;当 DG 装机容量占比达到 50% 时,支路 c 安装 SOP 时风光渗透率(52.20%)最大;当 DG 装机容量占比由 40% 变化至 50% 时,双 SOP 安装模式的安装位置从(a,c)变为(a,b)。这说明 DG 装机容量占比发生变化时风光渗透率随之变化,同时会影响到 SOP 的安装位置,支路 c 不再作为 SOP 的最佳安装位置。

由表 D2 数据结果可知:考虑季节特性 DG 出力波动变化对风光渗透率和用户支出成本具有一定影响,但对总体位置选择并无影响;单 SOP 安装模式下选支路 c 进行安装,以获得最佳指标;双 SOP 安装模式下,选支路 a、c 进行安装,风光渗透率提升最大,用户支出成本最低。

综合表 D1、D2 可知:当 DG 装机容量占比不同或考虑季节特性导致 DG 出力波动时,风光渗透率和用户支出成本受到明显的影响,但对 SOP 的选址结果影响较小。

表 1 对比了 SOP 选取最优安装位置时,考虑与不考虑主从博弈模型时不同 SOP 安装模式下系统的风光渗透率。通过对比可得:相较于不考虑主从博弈模型情况,采用本文所提主从博弈模型后,系统的风光渗透率均有明显提升,新能源消纳效果更好。

表 1 不同模式下渗透率结果对比

Table 1 Comparison of permeability rate results under different models

SOP 安装模式	渗透率 / %		SOP 安装模式	渗透率 / %	
	不考虑主从博弈	考虑主从博弈		不考虑主从博弈	考虑主从博弈
无 SOP	28.74	30.07	双 SOP	29.77	30.81
单 SOP	29.94	31.53	混合安装	29.85	31.36

测试环境为英特尔 i7-6700HQ CPU 2.60 GHz, 16 GB 内存,操作系统为 WIN11 64 bit,开发环境为 MATLAB R2021a。基于传统 PSO 和改进 PSO 对所提主从博弈模型进行求解计算,对比结果如表 2 所示。由表可知:与传统 PSO 相比,所提改进 PSO 在求解相同规模配电网模型时,求解速度更快,收敛到最优解用时更短。

表2 传统PSO与改进PSO优化对比  
Table 2 Optimization comparison between traditional PSO and improved PSO

优化算法	收敛时间/s	收敛到最优解次数
传统 PSO	138.3325	67
改进 PSO	61.7952	34

以春季为例,当DG装机容量占比为30%时,设SOP容量分别为300、800 kV·A,无SOP、单SOP、双SOP以及混合安装模式时SOP选址结果及风光渗透率、用户支出成本对比结果如附录D表D3所示。由表可知:当SOP容量不同时,风光渗透率和用户支出成本略有不同,但对SOP选址结果及风光渗透率、用户支出成本的影响较小。

## 4 结论

本文针对配电网中的SOP选址问题,建立了以配电网侧为强势方和用户侧为弱势方的主从博弈模型,实现了配电网新能源渗透率最大和用户支出成本最低的目标,通过具体算例验证了模型和算法的有效性和可行性。得到如下结论:

1) SOP接入配电网后能够提升配电网侧的风光渗透率,有效改善新能源消纳能力;

2) SOP安装数量及位置对配电网侧风光渗透率有一定影响,数量过多不一定能提高风光渗透率,反而可能会降低风光渗透率;

3) 所建立的主从博弈SOP选址模型能够有效地改善配电网中新能源消纳并降低用户支出成本。

随着DG不断接入配电网,配电网的不确定性增大,给新能源消纳能力带来新的挑战,考虑SOP的运行控制方式和DG多场景对配电网SOP选址结果的影响将是笔者下一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Analysis of key factors of new energy consumption and research on solutions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [3] 董雷,吴怡,张涛,等. 基于强化学习的含智能软开关主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(6):59-68.  
DONG Lei, WU Yi, ZHANG Tao, et al. Reinforcement learning based double-layer optimization method for active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 59-68.
- [4] 秦红霞,王成山,刘树,等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(20):17-23.  
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.
- [5] 丛鹏伟,唐巍,娄铨伟,等. 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1263-1272.  
CONG Pengwei, TANG Wei, LOU Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1263-1272.
- [6] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [7] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.
- [8] 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. SOP planning method of intelligent soft-switching in active distribution network considering the operation characteristics of distributed power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896.
- [9] 陈彦焜,耿光超,江全元,等. 考虑传统调控手段的配电网SOP选址定容方法[J]. 高电压技术,2020,46(4):1181-1188.  
CHEN Yaoyu, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. SOP location and constant capacity method for distribution network considering traditional control means[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1181-1188.
- [10] XIAO H, PEI W, LI K. Optimal sizing and siting of soft open point for improving the three phase unbalance of the distribution network [C] // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. Jeju, South Korea: IEEE, 2018: 2080-2084.
- [11] 叶雨晴,马啸,林湘宁,等. 基于动态GA编码的柔性多状态开关选址策略[J]. 高电压技术,2020,46(4):1171-1180.  
YE Yuqing, MA Xiao, LIN Xiangning, et al. Location strategy of flexible multi-state switch based on dynamic GA coding [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1171-1180.
- [12] 邱革非,何超,骆钊,等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):66-72.  
QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 66-72.
- [13] 刘晓峰,高丙团,李扬. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术,2018,42(8):2704-2711.  
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711.
- [14] 林文键,朱振山,温步瀛. 含电动汽车和智能软开关的配电网动态重构[J]. 电力自动化设备,2022,42(10):202-209.  
LIN Wenjian, ZHU Zhenshan, WEN Buying. Dynamic reconfiguration of distribution network with electric vehicles and soft open point[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 202-209.
- [15] 姚天宇,李勇,乔学博,等. 计及安全边界和智能软开关协同配

- 置的配电网分布式光伏准入容量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 63-70.
- YAO Tianyu, LI Yong, QIAO Xuebo, et al. Hosting capacity optimization of distributed photovoltaic in distribution network considering security boundary and coordinate configuration of SOP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 63-70.
- [16] 王志强, 方正, 刘文霞, 等. 基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 37-44.
- WANG Zhiqiang, FANG Zheng, LIU Wenxia, et al. Robust operation optimization of flexible distribution network based on probabilistic multi-scenario[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 37-44.
- [17] 胡玉, 顾洁, 马睿, 等. 面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 85-91.
- HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
- [18] 张剑, 崔明建, 何怡刚. 计及分时电价的电缆配电网多时段二阶段有功与无功协调快速鲁棒优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 94-100.
- ZHANG Jian, CUI Mingjian, HE Yigang. Fast and robust optimal scheduling method for multi-period and two-stage active and reactive power coordination of cable distribution network considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 94-100.
- [19] 杨世博, 孙亮, 陈立东, 等. 计及分时电价的含冷热电联供型微电网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 15-23.
- YANG Shibo, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 15-23.

#### 作者简介:

陈骁龙(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性配电网运行与控制、智能配电网(E-mail: 1072206319@qq.com);

孙嘉(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性配电网运行与控制、新能源发电与微电网(E-mail: 254062114@qq.com);

张俊林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: 2396419750@qq.com);

倪良华(1966—), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: 2270152236@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

## Soft open point siting scheme for distribution network with Stackelberg game between new energy accommodation and user-side response

CHEN Xiaolong, SUN Jia, ZHANG Junlin, NI Lianghua, LÜ Ganyun

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** After a large number of distributed generations are connected to the distribution network, the insufficient regulation and control capacity of the distribution network leads to low level of new energy accommodation and poor economic indicators of user expenditure, a nested model and method for the soft open point (SOP) siting scheme of the distribution network with new energy on-site accommodation and user expenditure Stackelberg game is proposed. A model structure with the maximum penetration rate of new energy and the best power quality index is established in the outer layer considering traditional regulation methods. Considering the time-of-use electricity price of accommodation of new energy users, energy storage device charging and discharging cost and daily operating cost, a demand response model that can meet the lowest user expenditure cost is constructed in the inner layer. The CPLEX solver is called to solve the mixed integer nonlinear programming model, and the user-side and the distribution network-side models optimize the decision variables through iterative games, and the Stackelberg game inner layer optimization uses an improved particle swarm optimization algorithm to speed up the convergence. The improved IEEE 33-bus system is used as an arithmetic example for analysis, which verifies the effectiveness of the proposed SOP siting scheme.

**Key words:** Stackelberg game; SOP siting scheme; new energy permeability rate; demand response; new energy accommodation

## 附录 A

约束条件如下。

1) OLTC 约束。

$$\begin{cases} U_{\min}^2 \leq (V_{j,t}^{\text{OLTC}})^2 r_{j,t} \leq U_{\max}^2 \\ r_j^{\min} \leq r_{j,t} \leq r_j^{\max} \end{cases} \quad j \in \Omega_{\text{OLTC}} \quad (\text{A1})$$

式中： $\Omega_{\text{OLTC}}$  为接入 OLTC 的节点集合； $V_{j,t}^{\text{OLTC}}$  作为变压器  $t$  时刻高压侧在  $j$  节点的电压值，其值始终恒定不变； $r_j^{\max}$ 、 $r_j^{\min}$ 、 $r_{j,t}$  分别为 OLTC 变比上下限平方和 OLTC 实际变比平方， $r_{j,t}$  作为变压器变比平方值，其比值为离散变量，通过变换得到下式含 0-1 变量的关系：

$$r_{j,t} = r_j^{\min} + \sum_s \gamma_{j,s} \sigma_{j,t}^{\text{OLTC}} \quad t, j \in \Omega_{\text{OLTC}} \quad (\text{A2})$$

式中： $\gamma_{j,s}$  为 OLTC 相邻档位  $s$  和  $s-1$  变比平方的差值，即档位调节变量； $\sigma_{j,t}^{\text{OLTC}}$  为 0-1 接入状态量。

2) 无功补偿约束。

$$Q_{j,t,\min}^{\text{svc}} \leq Q_{j,t}^{\text{svc}} \leq Q_{j,t,\max}^{\text{svc}} \quad (\text{A3})$$

$$Q_{j,t}^{\text{CB}} = n_{j,t}^{\text{CB}} Q_j^{\text{CB,step}} \quad (\text{A4})$$

$$0 \leq n_{j,t}^{\text{CB}} \leq N_j^{\text{CB,max}} \quad (\text{A5})$$

$$n_{j,t}^{\text{CB}} \in Z \quad (\text{A6})$$

式中： $Q_{j,t,\max}^{\text{svc}}$ 、 $Q_{j,t,\min}^{\text{svc}}$  分别为 SVC 装置在  $j$  节点  $t$  时段内无功补偿量的上、下限； $Q_{j,t}^{\text{CB}}$  和  $n_{j,t}^{\text{CB}}$  为电容器在  $j$  节点  $t$  时段内无功补偿容量和投入组数，投入组数取整； $Q_j^{\text{CB,step}}$  为电容器在  $j$  节点的每组无功补偿容量； $N_j^{\text{CB,max}}$  为投入最大组数； $Z$  为整数集合。

3) ESS 约束。

ESS 需考虑多时段的约束限制，主要包括充放电的状态、功率和 ESS 容量的限制。

充放电限制：

$$u_{j,t}^{\text{discharge}} + u_{j,t}^{\text{charge}} \leq 1 \quad j \in \Omega_{\text{ESS}} \quad (\text{A7})$$

功率极限：

$$u_{j,t}^{\text{discharge}} P_{j,\min}^{\text{discharge}} \leq P_{j,t}^{\text{discharge}} \leq u_{j,t}^{\text{discharge}} P_{j,\max}^{\text{discharge}} \quad (\text{A8})$$

$$u_{j,t}^{\text{charge}} P_{j,\min}^{\text{charge}} \leq P_{j,t}^{\text{charge}} \leq u_{j,t}^{\text{charge}} P_{j,\max}^{\text{charge}} \quad (\text{A9})$$

容量极限：

$$E_{j,t+1}^{\text{ESS}} = E_{j,t}^{\text{ESS}} + \alpha_j^{\text{charge}} P_{j,t}^{\text{charge}} - \alpha_j^{\text{discharge}} P_{j,t}^{\text{discharge}} \quad (\text{A10})$$

$$E_{j,\min}^{\text{ESS}} \leq E_{j,t}^{\text{ESS}} \leq E_{j,\max}^{\text{ESS}} \quad (\text{A11})$$

式中： $\Omega_{\text{ESS}}$  为包含 ESS 的节点的集合， $u_{j,t}^{\text{charge}}$ 、 $u_{j,t}^{\text{discharge}}$  分别为 ESS 充、放电状态； $P_{j,\max}^{\text{discharge}}$ 、 $P_{j,\min}^{\text{discharge}}$  分别为 ESS 放电功率上、下限， $P_{j,\max}^{\text{charge}}$ 、 $P_{j,\min}^{\text{charge}}$  分别为 ESS 充电功率上、下限； $P_{j,\max}^{\text{charge}}$ 、 $P_{j,\min}^{\text{charge}}$  分别为考虑 ESS 寿命等因素的上、下限； $\alpha_j^{\text{charge}}$ 、 $\alpha_j^{\text{discharge}}$  分别为充、放电效率系数。

4) DG 约束。

当节点  $j$  接入 DG，出力约束应满足下式：

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t,\max}^{\text{DG}} \quad (\text{A12})$$

$$Q_{j,t}^{\text{DG}} = P_{j,t}^{\text{DG}} \times \tan \varphi \quad (\text{A13})$$

式中： $P_{j,t}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{DG}}$  分别为 DG 在  $j$  节点处  $t$  时段内的实际有功和无功出力； $P_{j,t,\max}^{\text{DG}}$  为 DG 在  $j$  节点  $t$  时段内的最大出力； $\varphi$  为功率因数决定 DG 的恒功率因数运行。

## 附录 B

通过引入公式，得到下式：

$$u_{i,t} = U_{i,t}^2 \quad (\text{B1})$$

$$i_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \quad (B2)$$

式中： $u_{i,t}$ 、 $i_{ij,t}$  分别为节点电压、支路电流的平方项。

将式 (B1) 和式 (B2) 代入式 (5)、(7) — (10)，进行线性化。

$$i_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}} \quad (B3)$$

对上式其进行 SOCR 进行松弛得到下式：

$$i_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}} \quad (B4)$$

通过等价变化，可以写成标准二阶锥形式，即

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ i_{ij,t} - u_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq i_{ij,t} + u_{i,t} \quad (B5)$$

### 附录 C

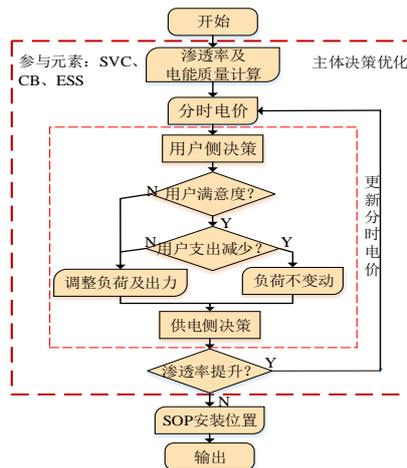
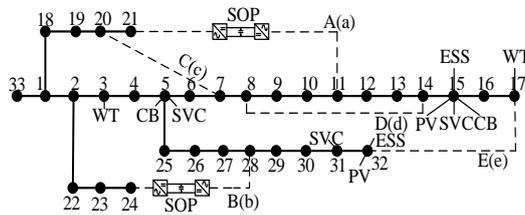


图 C1 主从博弈策略空间

Fig.C1 Strategy space of Stackelberg game



注：虚线所示为含联络开关的备选支路。

图 C2 IEEE 33 节点配电系统

Fig. C2 IEEE 33-bus distribution system

表 C1 DG 配置参数

Table C1 Configuration parameters of DG

DG 类型	接入位置	容量/kW	DG 类型	接入位置	容量/kW
风电机组	节点 3	400	光伏系统	节点 15	514
	节点 17	400		节点 32	386

表 C2 无功补偿装置配置参数

Table C2 Configuration parameters of reactive power compensation device

参数类型	接入位置	补偿范围	DG 类型	接入位置	补偿范围
SVC(连续)	节点 5	-100 kvar~300 kvar	CB (离散)	节点 5	100 kvar,共 5 组
	节点 15			节点 15	
	节点 31				

表 C3 ESS 配置参数

Table C3 Configuration parameters of ESS

参数类型	接入位置	容量/kW
ESS	15	300
	32	200

表 C4 单 SOP、双 SOP 安装模式下系统的评估指标

Table C4 Evaluation indicators of system in single SOP and double SOP installation mode

SOP 安装模式	$\eta$ /%	$C_1$ /万元	$\varepsilon$	SOP 安装模式	$\eta$ /%	$C_1$ /万元	$\varepsilon$
无 SOP	30.07	0.5643	0.0086	(a,d)	28.66	0.5603	0.0057
a	31.16	0.5500	0.0069	(a,e)	24.11	0.5678	0.0063
b	29.35	0.5525	0.0078	(b,c)	30.59	0.5709	0.0067
c	31.53	0.5493	0.0069	(b,d)	27.54	0.5632	0.0070
d	28.08	0.5553	0.0068	(b,e)	22.41	0.5711	0.0041
e	22.81	0.5707	0.0032	(c,d)	28.76	0.5607	0.0054
(a,b)	30.79	0.5565	0.0068	(c,e)	24.35	0.5684	0.0051
(a,c)	30.81	0.5573	0.0055	(d,e)	21.67	0.5721	0.0028

表 C5 混合安装模式下系统的评估指标

Table C5 Evaluation indicators of system in mixed installation mode

SOP 安装模式	$\eta$ /%	$C_1$ /万元	$\varepsilon$	SOP 安装模式	$\eta$ /%	$C_1$ /万元	$\varepsilon$
(a,B)	30.04	0.5577	0.0065	(c,D)	28.78	0.5601	0.0068
(a,C)	30.70	0.5568	0.0078	(c,E)	29.00	0.5595	0.0075
(a,D)	28.54	0.5605	0.0070	(d,A)	28.52	0.5610	0.0060
(a,E)	23.59	0.5686	0.0077	(d,B)	27.47	0.5633	0.0069
(b,A)	29.96	0.5580	0.0071	(d,C)	28.73	0.5608	0.0061
(b,C)	30.60	0.5574	0.0075	(d,E)	20.86	0.5729	0.0074
(b,D)	27.87	0.5626	0.0076	(e,A)	22.31	0.5712	0.0030
(b,E)	21.25	0.5720	0.0081	(e,B)	22.48	0.5705	0.0033
(c,A)	31.36	0.5558	0.0071	(e,C)	23.52	0.5685	0.0041
(c,B)	31.27	0.5558	0.0069	(e,D)	21.51	0.5729	0.0027

附录 D

表 D1 不同 DG 装机容量 SOP 安装模式下系统的评估指标

Table D1 Evaluation indicators of system under SOP installation mode of different DG installed capacity

DG 装机容量占比	选址结果与指标	无 SOP	单 SOP	双 SOP	混合安装
40%	SOP 选址结果	无	a	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	39.62	41.39	40.65	41.16
	用户支出成本/万元	0.5516	0.5480	0.5491	0.5458
50%	SOP 选址结果	无	c	a、b	A(c)
	风光渗透率/%	48.27	52.20	50.14	51.50
	用户支出成本/万元	0.5411	0.5392	0.5521	0.5374

表 D2 不同季节 SOP 安装模式下系统的评估指标

Table D2 Evaluation indicators of system under SOP installation mode in different seasons

季节	选址结果与指标	无 SOP	单 SOP	双 SOP	混合安装
春	SOP 选址结果	无	a	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	30.07	31.53	30.81	31.36
	用户支出成本/万元	0.5643	0.5573	0.5583	0.5558
夏	SOP 选址结果	无	c	a、b	A(c)
	风光渗透率/%	30.16	30.89	30.27	31.29
	用户支出成本/万元	0.5642	0.5685	0.5589	0.5560
秋	SOP 选址结果	无	c	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	29.94	31.4	30.29	30.79
	用户支出成本/万元	0.5646	0.5582	0.5632	0.5562
冬	SOP 选址结果	无	c	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	29.37	30.13	31.13	31.16
	用户支出成本/万元	0.5654	0.5569	0.5590	0.5553

表 D3 SOP 不同容量安装模式下系统的评估指标

Table D3 Evaluation indicators of system under SOP installation mode in different capacity

SOP 容量	选址结果与指标	单 SOP	双 SOP	混合安装
300 kV A	SOP 选址结果	c	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	31.22	30.80	31.14
	用户支出成本/万元	0.5557	0.5580	0.5961
800 kV A	SOP 选址结果	c	a、c	A(c)
	风光渗透率/%	31.16	30.59	31.27
	用户支出成本/万元	0.5513	0.5565	0.5524